

MÁRTON ANDRÁS

FELFORGATÓ TECHNOLÓGIÁK AZ ENERGIAIPARBAN

BEVEZETÉS

A 20. század végének és a 21. századnak az egyik legnagyobb célkitűzése lett a fenntartható fejlődés, miután az emberiség ráébredt a korábbi globális piaci verseny és az anyagi jólét maximalizálására törekvő fogyasztói magatartás fenntarthatatlanságára. A globális klímaváltozás nem elhanyagolható mértékben antropogén eredetű (ipar, közlekedés, hulladékkezelés), aminek fő (civilizációs) mozgatórugói az ipari forradalom és a népességrobbanás. Rájöttünk, hogy ha a rohamosan növekvő népesség olyan ütemben használja fel a Föld erőforrásait és bocsátja ki a szennyező anyagokat és hulladékot, mint az elmúlt 100 évben, akkor belátható időn belül ellehetetlenítjük a jövő generációit attól, hogy saját szükségleteiket kielégítsék. Ennek a magatartásnak a megváltoztatására alkották meg a fenntartható fejlődés koncepcióját.¹

A fenntartható fejlődésnek kiemelt terepe az energiaipar, a biztonságos energiaellátás, a diverzifikált és lehetőség szerint független energiaportfólió. Az ENSZ fenntartható fejlődési céljai (Sustainable Development Goals, röviden SDG), az Európai Unió stratégiái és azokhoz illeszkedve a magyar stratégiák is számos célt és fejlesztési pontot határoznak meg az energetikával kapcsolatban. Ezzel párhuzamosan az operatív programok, a nemzeti és a nemzetközi támogatások (pályázati kiírások) is számos esetben kisebb vagy nagyobb szintű energetikai rendszerek, hálózatok fejlesztésére irányulnak.

Az elektrifikációs és digitalizációs trendek különösen felerősítik az energetika jelentőségét. Ebben a tanulmányban azonban nem a fokozatos fejlesztések és a már meglévő trendek, hanem az ugrásszerű fejlődés lehetőségét magukban foglaló technológiák, innovációk állnak a középpontban.

A kutatás célja a különböző felforgató technológiák – köztük a mesterséges intelligencia (MI) – azonosítása az energiaiparban globálisan, valamint azok magyarországi hasznosítási lehetőségei. A cél teljesítése kvalitatív, feltáró jellegű szakértői előrejelzés készítését követeli meg. A kutatás jellege és a 8–10 éves időhorizont miatt különösen indokolt a jövőorientált gondolkodás és a jövőkutatási megközelítés mind a szemlélet, a fogalomhasználat, mind pedig a módszertan tekintetében.

A fentiek alapján kutatási kérdésem, amelyet ezzel a tanulmánnyal megválaszolni igyekszem, a következőképpen fogalmazható meg: milyen felforgató technológiák elterjedése várható 2030-ig az energiaiparban globálisan, és ezek közül melyek megjelenésére lehet számítani Magyarországon?

¹ Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Oxford University Press, Oxford, 1987.
<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>; letöltés: 2022.10.14.

A kutatási kérdés megválaszolása összetett módszertant igényel. Az általános globális trendek feltárását a témakörhöz kapcsolódó szakirodalmak kritikai elemzésével végzem el, a technológiák magyarországi elterjedésének előrejelzéséhez pedig hazai szakértőkkel szervezett workshopok, konferenciák és szakértői nyilatkozatok elemzésével jutok el. A vizsgálataim eredményét, azaz a várhatóan betörő technológiákat trendként, gyenge jelként vagy szabadkártyaként csoportosítom, ami a döntéshozók számára iránymutatást adhat a figyelemre méltó és a hazánk szempontjából kevésbé releváns technológiák figyelésére, támogató politikák és stratégiák kidolgozására.

A tanulmány elméleti megalapozással kezdődik, amelyben rendszerezem az általam használt jövőkutatási, innovációs és technológiai fogalmakat. A következő rész a szakirodalmi áttekintést és elemzést tartalmazza, amelyben részben összefoglaló (ún. review) típusú, részben egy-egy technológiát részletesen bemutató tudományos publikációkat vizsgálok. A publikációk javarészt a globális technológiai trendeket és innovációkat mutatják be, a hazai perspektíva megismeréséhez tehát az ezt követő fejezetben a Magyarországon megrendezett, témába illő workshopok és konferenciák szakértői előadásait, nyilatkozatait összegzem. A tanulmány összefoglaló fejezettel és irodalomjegyzékkel zárul.

ELMÉLETI MEGALAPOZÁS

Mint a bevezetőben is bemutatam, a tanulmány alapját képező kutatásommal az energiaiparban azonosítható és előrejelezhető felforgató technológiákat kívánom feltárni a megfelelő szakirodalmak és szakértői vélekedések összegzésével. Ahhoz, hogy ezeket a megfelelő ismereteket rendszerezni tudjam, szükséges az elméleti keretrendszer előkészítése, valamint a fogalmi tér meghatározása. A szakértői előrejelzés keretrendszerét és fogalmi terét olyan megközelítésben célszerű felállítani, hogy választ adjon arra, hol helyezkednek el a felforgató technológiák az innováció és a jövőkutatás mint két nagyobb érintett tématerület metszetében.

Az innovációról röviden

A gazdaságtudományban az innováció fejezi ki az újítás tényét vagy lehetőségét a vállalatoknál és általában a gazdaságban, de emellett léteznek társadalmi, környezeti és egyéb innovációk is (lásd pl. az evolúciót). Gazdaságtudományi megközelítésben innováció alatt az alábbiakat értjük:²

- új termék;
- új eljárás;
- új piac (értékesítés új helye);
- új beszerzési forrás;
- új szervezet.

² SCHUMPETER, Joseph A.: A gazdasági fejlődés menete. Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó, Budapest, 1980.

Miként jelenhetnek meg az áttörő technológiák ebben az innovációs rendszerben? Jellege miatt a technológiai fejlődés leginkább az „új termék” kategóriában játszhat döntő szerepet, de az imént felsorolt alapvető innovációs formák mindegyikében megjelenhet, sőt a tudományos és a műszaki fejlődés az innováció kiváltója is lehet.³

Moore⁴ szerint a piac (vagy a termék, a szolgáltatás) életciklusának függvényében kell kiválasztani a megfelelő innovációmenedzsment-eszközöket és -eljárásokat, amelyek közül döntően a kezdeti szakaszban (korai piac) merül fel a radikális technológiai újítások, a K+F, illetve a megbontó innovációk szerepe. Természetesen a K+F és az innováció az adott termék, a szolgáltatás, a vállalat vagy a piac életciklusában a későbbiekben is szerepet kaphat, de az esetek döntő többségében ott már inkább új eljárás, piac, beszerzési forrás vagy szervezeti átalakulás képében (a meglévő technológiára építkezve), vagy – technológiai fejlődés esetén – csak fokozatos (inkrementális) innováció formájában.

Az innovációs szakirodalom alapján tehát a felforgató technológiák a korai piac szakaszában jutnak szerephez megbontó innovációkként. A megbontó innovációk áttörő jellege vagy normál változási ütemet, de nagy hatást, vagy pedig gyors ütemet takar. A megbontó innovációk számos formában megjelenhetnek: a piac vagy az üzleti modellek felforgatása, a szabályozás felforgatása, a szereplők és a hálózataik áttörése, az üzleti magatartás, a gyakorlat és a kultúra felforgatása.⁵

Az érintett jövőkutatói fogalmak áttekintése

A jövőkutatás nem igazán széles körben ismert tudomány, viszont a felforgató technológiák jövőbeli kibontakozása szempontjából lényeges a fogalmainak az ismerete, ezért az elméleti megalapozás részeként röviden bemutatom e tudomány alapjait.

A jövőkutatás a jövőbeli folyamatok, események, illetve a jövővel kapcsolatos várakozásaink feltárásával, előrejelzésével foglalkozó multidiszciplináris társadalomtudomány, amelynek tárgyai a még le nem zajlott folyamatok, még létre nem jött kapcsolatok, még ki nem alakult állapotok, valamint ezek kölcsönös összefüggései.⁶ A jövőkutatás legfőbb célja a minőségileg új jövők felvázolása,

³ HOFFER Ilona – IVÁNYI Attila Szilárd: Gondolatok az innováció működési mechanizmusáról. *Vezetéstudomány*, 39. évfolyam 4. szám, 2008. pp. 51–55.
<https://doi.org/10.14267/VEZTUD.2008.04.05>; letöltés: 2022.10.11.

⁴ MOORE, Geoffrey A.: Darwin and the Demon – Innovating Within Established Enterprises. *Harvard Business Review*, Volume 82, Issue 7-8, July 2004. pp. 86–92.
<https://hbr.org/2004/07/darwin-and-the-demon-innovating-within-established-enterprises>;
letöltés: 2022.12.10.

⁵ KIVIMAA, Paula – LAAKSO, Senja – LONKILA, Annika – KALJONEN, Minna: Moving beyond disruptive innovation: A review of disruption in sustainability transitions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Volume 38, March 2021, pp. 110–126.
<https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.12.001>; letöltés: 2022.11.26.

⁶ HIDEG Éva – KOROMPAI Attila – KOVÁCS Géza – NOVÁKY Erzsébet: *Jövőkutatás*. Aula, Budapest, 1999.

valamint (főleg komplex előrejelzéseknél) azoknak az érintetteknek a bevonása a jövőfeltárásba, akiknek a jövőjéről kutatást végzünk.⁷

A jövőkutatás eszköztárába tartoznak más tudományterületekről átvett előrejelzési módszerek (pl. matematikai-statisztikai módszerek, kérdőíves felmérés, Delphi-kérdőívezés), de jövőkutatók alkottak saját módszereket is (pl. jövőfeltáró műhelyek, jövőkereső konferenciák, jövőfürkészés). A magyar jövőkutató tudósok is kivették részüket a jövőkutatás mint tudomány és módszertana fejlesztésében,⁸ amely – az egész világon zajló folyamatoknak megfelelően – az egzaktabb matematikai-statisztikai módszerek irányából elmozdult a kvalitatívabb jellegű, komplex részvételi módszerek irányába. Utóbbira jó példa a komplex módszertanú jövőfürkészés, amelynek első hazai alkalmazása – társkutatókkal közösen – e tanulmány szerzőjéhez is kötődik.⁹

A jövőkutatásnak a trendek és azok további folytatódása mellett fontos eleme azoknak a tényezőknek, faktoroknak a feltárása is, amelyek alapvetően befolyásolhatják a meglévő trendek alakulását vagy újak kibontakozását. Ezekre a jövőkutatási szakirodalom különböző elnevezéseket használ, attól függően, hogy milyen bekövetkezési valószínűség és milyen hatás rendelhető hozzájuk, és hogy mennyire meglévő vagy mennyire jövőben várható eseményről, változásról van szó.

A trend jövőkutatási fogalma megegyezik a statisztikai fogalommal, a múltban gyökerező, jelenünkben is jól követhető fejlődési pályán mozgó folyamatot értünk alatta. A gyenge jel egy olyan környezeti jel (esemény, folyamat, változás), amely a jelenben még strukturálatlan, nehezen azonosítható, akár jelentéktelennek tűnő, de a jövőben trenddé fejlődhet és jelentős változásokat hozhat.¹⁰ A gyenge jel lényegében a potenciális jövőbeli trendek nagyon korai előjeleiként értelmezhető. A szabadkártya pedig azon kis bekövetkezési valószínűségű jövőbeli eseményeket jelöli, amelyek – ha mégis bekövetkeznek – a jelenlegi struktúrákban drasztikus változásokat hoznak.¹¹ Egy megvalósuló szabadkártyából is fejlődhet ki később trend, de míg a gyenge jelek nagyobb valószínűséggel következnek be, a szabadkártyák előfordulása (definíció szerint) ritkább és meghatározóbb.

⁷ A jövőkutatást a magyar és az angol szakirodalomban is többféle néven használják: jövőkutatás, futurológia, előrejelzés, illetve futures research, futures studies, futures field stb. Ebben a tanulmányban az elnevezések között nem teszünk különbséget.

⁸ NOVÁKY Erzsébet – KRISTÓF Tamás: A comprehensive review of Hungarian futures studies in light of international journal articles. *European Journal of Futures Research*, Volume 10, Issue 14, 2022. <https://doi.org/10.1186/s40309-022-00201-x>; letöltés: 2022.12.30.

⁹ HIDEG Éva – MIHÓK Barbara – GÁSPÁR Judit – SCHMIDT Péter – MÁRTON András – BÁLDI András: Assessment in horizon scanning by various stakeholder groups using Osgood's semantic differential scale – A methodological development. *Futures*, Volume 126, February 2021. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2020.102677>; letöltés: 2022.11.04.

¹⁰ MENDONÇA, Sandro – CARDOSO, Gustavo – CARAÇA, João: The strategic strength of weak signal analysis. *Futures*, Volume 44, Issue 3, April 2012. pp. 218–228. https://www.researchgate.net/publication/251724953_The_strategic_strength_of_weak_signal_analysis; letöltés: 2022.11.18.

¹¹ PETERSEN, John L.: *Out of the Blue: How to Anticipate Big Future Surprises*. Madison, Lanham, 1999.

A gyakorlatban sem a gyenge jel, sem a szabadkártya nem korlátozódik le emberi cselekvésre vagy technológiára: egy természeti katasztrófa is lehet szabadkártya, vagy gyenge jel például a távmunka és a távoktatás elterjedése (bizonyos előnyeik miatt), ami fel is erősödött a koronavírus-járvány alatt. Ebből is látható, hogy a távmunka és a távoktatás elterjedéséhez, valamint a társadalmat és a gazdaságot átalakító, ma már jelentősnek mondható erejéhez kellett a megfelelő technológiai háttér és felhasználói tudás is.

Az új technológiák az innovációhoz hasonlóan a jövőkutatás felfogásában is részei lehetnek a „csendes mederben” folytatódó jövőnek (trendként, inkrementális fejlesztéseként), de a felforgató technológiák az ember által teremtett jövőben (amelyben sok változás figyelhető meg)¹² inkább gyenge jelnek vagy szabadkártyának minősülnek. Példán keresztül könnyebben megragadható ez a csoportosítás: a számítógépek számítási kapacitásának növekedése (lásd Moore törvénye) trend, a kvantumszámítógépek megjelenése a piacon gyenge jel, az emberi tudat digitalizálása (totális transzhumanizmus)¹³ a belátható jövőben pedig inkább szabadkártyának tekinthető.

A felforgató technológiák alatt a kutatásban alkalmazott elméleti megközelítésben tehát elsősorban olyan megbontó innovációkat értek, amelyek gyenge jelként vagy szabadkártyaként jelentősen befolyásolhatják az energiaipar jövőjét. A továbbiakban – a szakirodalom kritikai elemzésénél és a szakértői vélekedések vizsgálatánál – ebben a fogalmi keretrendszerben értelmezem az előrejelzéseket.

A SZAKIRODALOMBAN FELBUKKANÓ FELFORGATÓ ENERGIaipari Technológiák

Az alábbi fejezetben a széles körben áttekintett szakirodalmak eredményeit mutatom be, amelyeket kritikai elemzésnek vettem alá, és rendszerezem az eredményeket aszerint, hogy trendről, gyenge jelről vagy szabadkártyáról beszélünk.

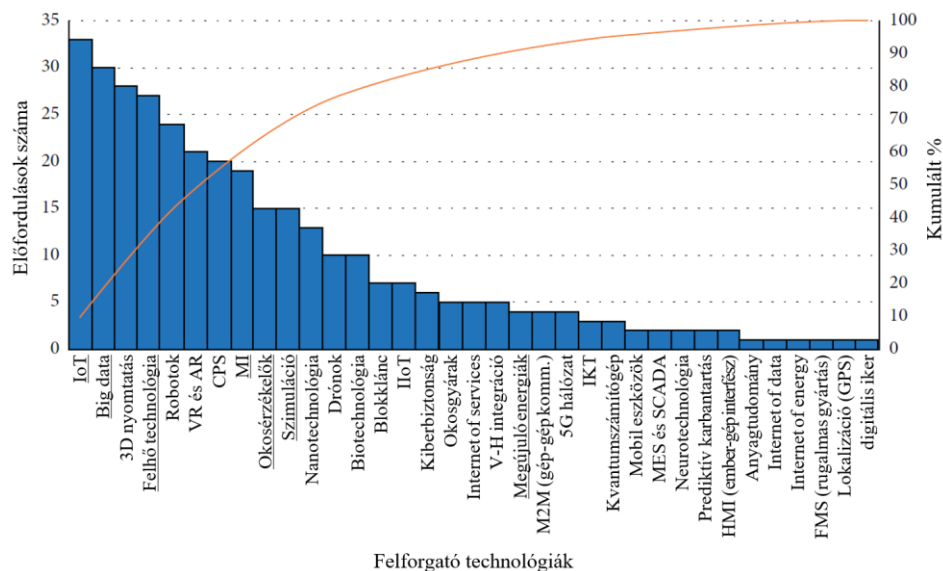
A fejezetet alfejezetekre bontom: önálló alfejezetként írok a kutatás kiemelt fókuszterületének tekintett mesterséges intelligencia megjelenéséről az energiaiparban, valamint a szakirodalmak alapján azonosított nagyobb technológiai kihívásokról, azaz a moduláris erőművekről, a fúziós energiáról és az energiatárolásról. Egy külön alfejezet szól egyéb olyan felforgató technológiákról, amelyek kisebb átfedésben lehetnek az energiaszektoralal, de a tanulmányban mindenképpen említést érdemelnek.

¹² NOVÁKY Erzsébet: Jövőkutatás és felelősség. Magyar Tudomány, 167. évfolyam 9. szám, 2006. pp. 1090–1098.
<http://www.matud.iif.hu/2006-09.pdf>; letöltés: 2022.10.08.

¹³ Totális transzhumanizmus alatt itt az emberi tudat digitalizálását, valamint az ember biológiai szervezetének mellőzését értem.

Mesterséges intelligencia az energiaszektorban

Bongomin és kollégái¹⁴ kiterjedt szakirodalmi elemzést végeztek az Ipar 4.0-ban megjelenő felforgató technológiákról, amelyek nagy része köthető e technológiák energiaipari megjelenéséhez is (1. ábra). Az ábrán látható számos felforgató technológia részben átfedésben van egymással, de az energiaipar szempontjából ebben a tanulmányban nem releváns a szigorú megkülönböztetésük, ezért ezeket csoportosítva (lásd az aláhúzott technológiák), valamint saját gyűjtés alapján újabakkal kiegészítve elemzem ebben a fejezet részben.



1. ábra. A felforgató technológiák előfordulása az Ipar 4.0 szakirodalmában
Szerkesztette: Márton András

A mesterséges intelligencia alkalmazásával kapcsolatban (mint sok más új technológia esetében is) meghatározó, hogy mennyire ismerik az emberek, mennyire hajlandók elfogadni, és mennyire nyitottak a használatukra. Felmérések¹⁵ szerint az MI-megoldásokkal leginkább a vállalati döntéshozók és tulajdonosok, az egyetemi végzettségűek és a magasabb jövedelmű rétegek vannak tisztában (70–75% között), egyben közülük kerülnek ki többen (50%) az MI-technológiát használó cégekben megbízó egyének is. Ugyanakkor érdemes megemlíteni, hogy a fejlődő országok körében jellemzőbb az, hogy az MI-t jobban ismerik, bíznak az MI-t használó

¹⁴ BONGOMIN, Ocident – OCEN, Gilbert Gilibrays – NGANYI, Eric Oyondi – MUSINGUZI, Alex – OMARA, Timothy: Exponential Disruptive Technologies and the Required Skills of Industry 4.0. Journal of Engineering, Volume 2020.

<https://doi.org/10.1155/2020/4280156>; letöltés: 2022.10.24.

¹⁵ Global opinions and expectations about Artificial Intelligence: A Global Advisory survey. Ipsos, January 2022.

<https://www.ipsos.com/sites/default/files/ct/news/documents/2022-01/Global-opinions-and-expectations-about-AI-2022.pdf>; letöltés: 2022.08.25.

vállalatokban, illetve bíznak abban is, hogy az MI-n alapuló termékek és szolgáltatások jobbra fogják tenni az életüket (főleg az oktatás, a szórakozás, az utazás, az otthoni szolgáltatások és a vásárlások terén). Ez a Nyugaton (és Magyarországon) ma még kissé bizalmatlan hozzáállás, illetve a jövőre vonatkozó derülő laikus várakozások az MI-vel kapcsolatban azt erősítik, hogy ez a technológia általánosságban gyenge jelként azonosítható még akkor is, ha tudatosítjuk magunkban, hogy már ma is sok napi használatú digitális eszközünkbe és alkalmazásunkba beépül a mesterséges intelligencia. (Vagyis közel áll ahhoz, hogy még több alkalmazási területen trenddé fejlődjön.)

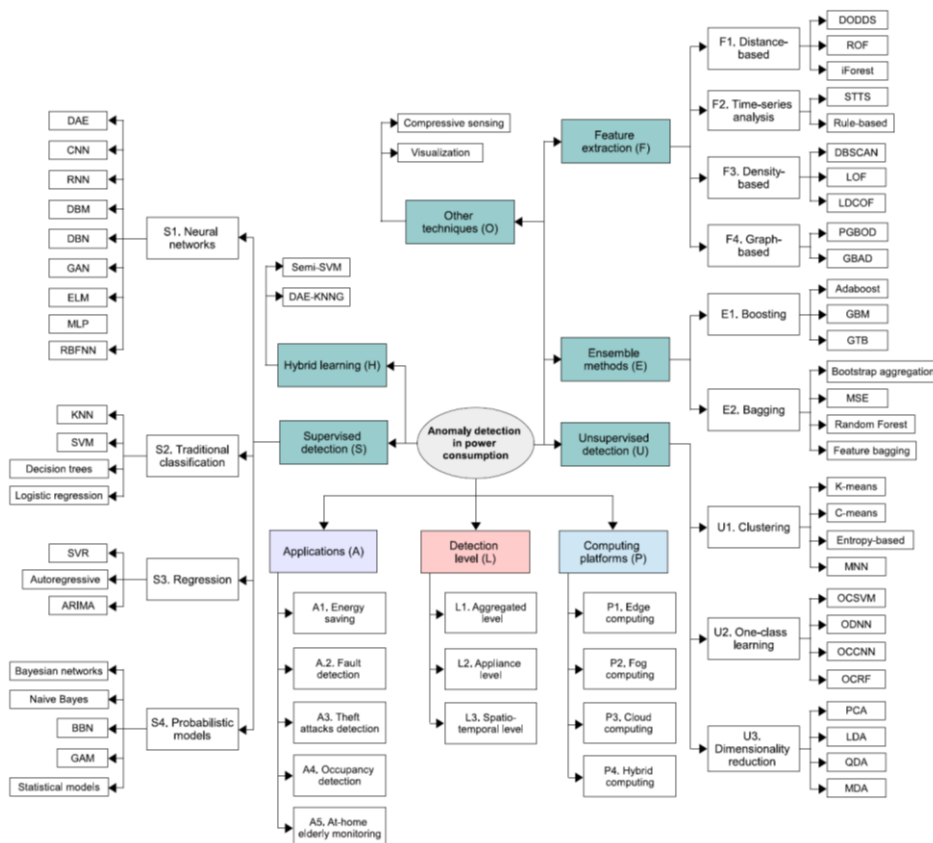
Ha az emberi tényezőtől függetlenül magát a technológiát vizsgáljuk, akkor elmondható, hogy az MI-t az energiaszektor három területén lehet hasznosítani: a rendszerkonfiguráció optimalizálásában, az okos energiamenedzsmentben (rendszerirányítás), valamint a paraméterbecsléseknél – a rendszer állapotának minél pontosabb és adaptív monitorozása és előrejelzése érdekében.¹⁶ Más megfogalmazásban az MI szerepe a hatékonyságra, az ellenőrzésre és az előrejelzésre összpontosul,¹⁷ ami széles körű és magas felelősségi szintű alkalmazást jelent. Több szakkikk és tanulmány tételesen felsorolja azokat az MI-szoftvereket, amelyek egyik vagy másik területen használhatók. Ezek felsorolását a tanulmányban mellőzöm, a technológia sokrétűsége a szoftverek számában és a felhasználásban azonban nagyon jól kirajzolódik a 2. ábrán, amely az energiafelhasználási anomáliák előrejelzésére alkalmazható MI-szoftvereket rendszerezi.

Az energetikai vállalatoknál nagy mennyiségű adat képződik (Big Data), ami egyben a hatékony MI-alapú megoldások, így az okoshálózati infrastruktúra alapja és egyik legfontosabb kiindulási feltétele.¹⁸ Ahhoz azonban, hogy az energetikai cégek az MI-ben rejlő legtöbb potenciált hatékonyan ki tudják használni, más feltételeknek is eleget kell tenniük. Ezek a megfelelő, MI-t támogató vezetői képességek, naprakész hálózati infrastruktúra, decentralizált és diverzifikált energiaportfólió, résztvevői mechanizmus. Ez utóbbi feltétel tovább bontható – és a tanulmány későbbi részeiben is megerősítést nyer –, mivel az energiaszektorban nemcsak a szolgáltatók, hanem a fogyasztók oldalán is fel kell építeni az MI-infrastruktúrát, ezáltal fontos a kisfogyasztók aktív részvétele, megfelelő számítási kapacitások, robotizált, automatizált rendszerek, szenzorok, széles körű IoT-alkalmazás stb.

¹⁶ ABDALLA, Ahmed N. – NAZIR, Muhammad Shahzad – TAO, Hai – CAO, Suqun – Ji, Rendong – JIANG, Mingxin – YAO, Liu: Integration of energy storage system and renewable energy sources based on artificial intelligence: An overview. *Journal of Energy Storage*, Volume 40, August 2021. <https://sci-hub.se/uptodate/S2352152X21005387.pdf>; letöltés: 2023.02.04.

¹⁷ KOW, Ken Weng – WONG, Yee Wan – RAJKUMAR, Rajparthiban Kumar – RAJKUMAR, Rajprasad Kumar: A review on performance of artificial intelligence and conventional method in mitigating PV grid-tied related power quality events. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 56, April 2016. pp. 334–346. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.064>; letöltés: 2022.12.14.

¹⁸ AHMAD, Tanveer – ZHANG, Dongdong – HUANG, Chao – ZHANG, Hongcai – DAI, Ningyi – SONG, Yonghua – CHEN, Huanxin: Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, Volume 289, 20 March 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125834>; letöltés: 2022.12.02.



2. ábra. Az energiafelhasználás anomáliáinak észlelésére használható MI-alkalmazások rendszere¹⁹

Az MI minél hatékonyabb bevezetéséhez és vállalati működtetéséhez az energetikai cégeknél támogató szervezetet kell tudni kialakítani, amelynek egyik kulcsfontja a vezetők meggyőzése az MI sokoldalú vállalati bevethetőségéről, hogy maguk is elkötelezett támogatói legyenek a negyedik ipari forradalom legmeghatározóbb technológiájának. Ezek közé olyan előnyök tartoznak, mint például az, hogy az MI növeli a vállalati produktivitást; a vállalati MI-érettség mérhető, fejleszthető; az érintettek miatt fontos a transzparens MI-stratégia kialakítása; fontos az MI etikai és biztonsági aspektusait kezelni; az MI nagyban hozzájárulhat a vállalat fenntartható fejlődéséhez (karbonlábnyom csökkentése, hulladékcökkentés, logisztikai optimalizálás, a beszállítókra és a fogyasztókra is kiterjeszhető megoldások).²⁰ A megfelelő MI-vel kapcsolatos

¹⁹ HIMEUR, Yassine – GHANEM, Khalida – ALSALEMI, Abdullah – BENSAAALI, Faycal – AMIRA, Abbas: Artificial intelligence based anomaly detection of energy consumption in buildings: A review, current trends and new perspectives. Applied Energy, Volume 287, April 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116601>; letöltés: 2022.10.16.

²⁰ Empowering AI Leadership: AI C-Suite Toolkit. World Economic Forum, Geneva, Switzerland, 2022. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Empowering_AI_Leadership_2022.pdf; letöltés: 2022.12.28.

képességek a munkavállalók oldalán is nagyon fontosak: 2010–2019 között a számítástechnikai és a mérnöki szakmákra irányuló munkapiaci kereslet a modern technológiák közül az MI-vel kapcsolatos állásoknál számottevően nőtt (míg a menedzsment és a pénzügyi területen valamivel csökkent), de például a robotikai és a felhőalapú technológiák körében mindegyik vizsgált szakmai területen (tehát a menedzsmenten és a pénzügyin is) növekedés volt tapasztalható a munkaerő-keresletben.²¹

A vállalati képességek mellett több szerző következtetése szerint is a decentralizált rendszer az MI-alapú energiamenedzsment másik kiemelt eleme, Chen és kollégái²² azonban arra is felhívják a figyelmet, hogy mivel alacsony a mikrohálózatok méretgazdaságossága, az új befektetők (a magas belépési költségek miatt) csak akkor vonzhatók be, ha kellő állami vagy közszférás támogatást kapnak (pénzügyi ösztönzők, adókedvezmények stb. révén).

Az előbbieken felsorolt előnyök és lehetőségek segítségével az MI számos formában hatékonyan támogathatja a változékony megújuló erőforrások hálózatba integrálását:²³

- 20–30%-kal javíthatja a nap- és a szélenergia-termelésének (vagy előrejelzésének) pontosságát. Ebben például a gépi tanulás segíthet, ahogy a DeepMind (a Google gépi tanulásra szakosodott leányvállalata) is tette, amely jó megbízhatóságú, 36 órás előrejelzést készített 700 MW-nyi szélenergia-termelésre az Amerikai Egyesült Államok középső területein.²⁴

- A kereslet változásait is pontosabban előre tudja jelezni a fogyasztók szegmentálásával, amihez többek között ágenssimulációt, mesterséges neurális hálót vagy evolúciós játékelméleten alapuló technikát lehet alkalmazni.

- Segíthet a kereslet-kínálat kiegyenlítésében, amiből az energiatermelő vállalatok hasznot is húzhatnak: megfelelő szimuláció és modellezés mellett akár 15–20%-os bevétel-növekedés is elérhető. Ennek alapja, hogy az MI (főleg a neurális hálók) által készített előrejelzések pontosabbak az idősorok nem lineáris és más problematikus modellezése esetén.²⁵

²¹ LYU, Wenjing – LIU, Jin: Artificial Intelligence and emerging digital technologies in the energy sector. *Applied Energy*, Volume 303, December 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117615>; letöltés: 2022.10.08.

²² CHEN, Cheng – HU, Yuhua – KARUPPIAH, Marimuthu – KUMAR, Priyan Malarvizhi: Artificial intelligence on economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 47, October 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101358>; letöltés: 2022.11.15.

²³ BOZA, Pal – EVGENIOU, Theodoros: Artificial intelligence to support the integration of variable renewable energy sources to the power system. *Applied Energy*, Volume 290, May 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116754>; letöltés: 2022.11.16.

²⁴ MAKALA, Baloko – BAKOVIC, Tonci: Artificial Intelligence in the Power Sector. *EM Compass*, Note 81, April 2020.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34011.18729>; letöltés: 2022.11.02.

²⁵ METAXIOTIS, K. – KAGIANNAS, A. – ASKOUNIS, Dimitris – PSARRAS, John: Artificial intelligence in short term electric load forecasting: a state-of-the-art survey for the researcher. *Energy Conversion and Management*, Volume 44, Issue 9, June 2003. pp. 1525–1534.

[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00148-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00148-6); letöltés: 2022.10.14.

- A hálózat optimalizálásával karbantartási költségeket és áramkimaradásokat minimalizálhat az MI-t alkalmazó hálózati irányítási vállalat (Magyarországon pl. a MAVIR). Erre bevethető a hangyakolónia-algoritmus, illetve a gépi tanulás, amely New York városában segített a városi hálózat zavarmentes működési napjainak számát 61%-kal javítani.

- Az MI hatékony az energiátárolási megoldások és műveletek támogatásában, ezáltal jelentősen hozzájárulhat a keresletingadozásokhoz történő valós idejű alkalmazkodás fejlesztéséhez. Egy ilyen komplex megoldás rendkívüli előnye, hogy a rendszer kompletten, hardverrel és szoftverrel együtt is átadható például az okosvárosoknak.²⁶

Az MI energiaipari alkalmazásával kapcsolatban konklúzióként elmondható, hogy ebben a szektorban már sok használható MI-eszköz van, de még csak pilot vagy demonstrációs jelleggel, egy-egy projektnél, ezért ez a technológia gyenge jelként azonosítható, különösen akkor, ha a fogyasztói oldalt is megvizsgáljuk. Az MI széles körű térnyeréséhez mindenképpen az IoT, az okosotthonok, az okos szenzorok és más eszközök, alkalmazások további elterjedése szükséges. Ennek gyors lejátszódását ugyanakkor két dolog is gátolja. Az egyik az, hogy az energiarendszerek és a hálózat digitalizációja újfajta fenyegetés lehetőségét is hordozza: hackerek és kibertámadások célpontjává teszi az energiainfrastruktúrát, ami a társadalom és a gazdaság szempontjából akár a természeti csapásokkal egyenértékű károkhöz is vezethet. A másik, hogy az egyéni felhasználók esetében az IoT és az MI felvet problémákat a privát élettér védelmével kapcsolatban. Utóbbi probléma etikai és jogi aspektusait több tanulmány vizsgálja ebben a kötetben is.

Fúziós atomenergia

A tudományos-fantasztikus irodalomban már régóta a jövő legígéretesebb energiaforrásaként tekintenek a hidrogénre, amely az atommagok összeolvadása (fúziója) során keletkező, jelentős mennyiségben felszabaduló energia hasznosításának a kulcseleme. A fúziós atomenergia két közismerten nagy előnye van bármely más energiaforrással szemben: maga a nyersanyag a világegyetem leggyakoribb eleme – azaz könnyen és nagy mennyiségben hozzáférhető, gyakorlatilag végtelen –, valamint rendkívül környezetbarát – vagyis szinte nincs káros melléktermék az energiaelőállítási folyamat során. Természetesen a technológia számos más előnyét is fel lehet sorolni:²⁷

²⁶ ȘERBAN, Andrea Claudia – LYTRAS, Miltiadis D.: Artificial Intelligence for Smart Renewable Energy Sector in Europe – Smart Energy Infrastructures for Next Generation Smart Cities. IEEE Access, Volume 8, 2020. pp. 77364–77377.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990123>; letöltés: 2022.11.10.

²⁷ UDDIN, Md. Nasir – RASHID, Mahbub – MOSTAFA, Mohammad Golam – BELAYET, H. – SALAM, Syed Munim – NITHE, Na: New Energy Sources: Technological Status and Economic Potentialities. Global Journal of Science Frontier Research, Volume 16, Issue 1, March 2016. pp. 24–37.
https://globaljournals.org/GJSFR_Volume16/3-New-Energy-Sources-Technological.pdf; letöltés: 2022.09.10.
ONGENA, Jef: Nuclear fusion and its large potential for the future world energy supply. Nukleonika, Volume 61, Issue 4, 2016. pp. 425–432.
<https://doi.org/10.1515/nuka-2016-0070>; letöltés: 2022.12.02.

- nagy az üzemanyag energiasűrűsége;
- alacsony a katasztrófakockázat (egyszerre kevés üzemanyagot használ, kevés maradék, ezért minimális a leolvadási kockázat stb.);
- lehetővé teszi a külső energiafüggetlenséget;
- nagyon kevés és viszonylag gyorsan (50–100 év alatt) lebomló sugárzó hulladék keletkezik az energia előállításakor.

A fúziós energia-előállítás technikai megvalósítását tekintve két fő típus létezik: az inerciális lézer és a tokamak. Az inerciális lézeres technológia lényege, hogy egy kisebb adagnyi deutérium és trícium keveréket lézerekkel hevítenek a fúzióhoz szükséges hőfokra, ami a reakció beindulása után képes az önfenntartó üzemelésre. A tokamak a hidrogén-üzemanyag plazma állapotban történő felhasználása, amely során a forró plazmát egy mágneses tóruszkamra közepén tartják, és hidrogénfúzió közben felszabaduló energiát a kamrafal mögé épített eszközökkel fogják be.

A világ számos laboratóriumában (egyetemen és kutatóintézetekben) kísérleteznek mindkét módszerrel, de laboratóriumi körülmények között a lézeres technológia elterjedtebb. Bár a hidrogénfúzióval történő és a maghasadáson alapuló energiafelszabadulás elmélete és hadiipari gyakorlata szinte egyidősnek tekinthető (lásd a második világháborút), a szabályozott energiahasznosításban (az energiaiparban) a fúziós eljárást már régóta hasznosítjuk, a fúziós technológiának viszont még a laboratóriumi kísérletek többségénél sem sikerült elérni a pozitív energiamérleget – igaz, döntően nem is volt céljuk. Ma már Európa gyakorlatilag minden országában van a fúziós technológiát kutató intézmény, emellett többek között az Amerikai Egyesült Államok, Ausztrália, Brazília, Dél-Korea, India, Izrael, Japán, Kanada, Kína, Malajzia, Oroszország és Ukrajna az, ahol különböző egyetemen és intézetekben folyik ilyen irányú kutatás.²⁸ A nemzetközi összefogásban megvalósuló legjelentősebb kutatási projektek (különösen abból a szempontból, hogy ezek már a kereskedelmi célú fúziós energiatermelés lehetőségeit vizsgálják) az ITER, a JET, a DEMO és az EuroFusion.

Az ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) egy kísérleti fúziós reaktor, amely célkitűzését és volumenét tekintve a legfigyelemreméltóbb ilyen projekt. Az ITER nemzetközi részvétellel (Amerikai Egyesült Államok, India, Japán, Kína, Korea, Oroszország és az EU) zajlik, maga a tokamak rendszerű fúziós atomerőmű pedig Dél-Franciaországban épül. Megjegyzendő, hogy az ITER-nek sem célja a kereskedelmi energiaelőállítás (azaz a tervek szerint nem lesz a villamos hálózatra kötve), leginkább a technológia megvalósíthatósága a kísérlet tárgya. Az első plazmakísérletek 2025-re vannak beütemezve, a deutérium–trícium-kísérletek – vagyis a tényleges fúziós energiaelőállítás – pedig 2035-re.²⁹ Az ITER-nek nagy jelentősége van a világgazdaság, sőt az egész civilizáció szempontjából, mivel a projekt sikerén is múlik, hogy a jövőben épülnek-e majd fúziós atomerőművek.

²⁸ Fusion research worldwide. Max Planck Institute for Plasma Physics. <https://www.ipp.mpg.de/1740642/weltweit>; letöltés: 2022.01.30.

²⁹ About ITER. In a few lines. <https://www.iter.org/proj/inafewlines>; letöltés: 2023.01.30.

Habár a laboratóriumi kísérletek célja általában a fúzió minél hatékonyabb és biztonságosabb kivitelezése, csak 2022 végén adtak hírt először a pozitív energiamérlegű, inerciálislézer-alapú kísérlet sikeréről, amelyet az amerikai National Ignition Facility-ben értek el: a kutatási beszámolók szerint 54%-kal több energiát sikerült kivonni a rendszerből, mint amennyi a fúzió beindításához volt szükséges. Megjegyzendő, hogy a lézerek működtetésébe befektetett energiával együtt még így is erősen negatív volt az egyenleg, de a kutatóintézetben használnál lényegesen hatékonyabb lézerek is használhatók lehetnek a fúzió beindításához, így az ITER (és a tokamakrendszerű újabb fúziós erőművek) mellett a lézeres technológiának is érdemes figyelmet szentelni.³⁰

A szakirodalmak szerint a fúziós energiával kapcsolatban fontos vizsgálati terület, hogy megvalósítható-e gazdaságosan kisebb méretben, vagy csak a nagyerművi kategóriában. A szakértői álláspontok szerint ezen a téren a lézeres technológia nagyobb valószínűséggel lesz célravezető. Jelentős előrelépés történhet a lézeres fúzió esetén, ha sikerül stabilan tartani az önmagát mágnesező plazmát – például a plazmatank geometriájának fejlesztésével –, ahol a magegyesülés lezajlik,³¹ miáltal könnyebben, illetve ténylegesen kisebb méretben (pár méteres nagyságrendben) is megvalósítható lenne a fúziós energia hasznosítása. Könnyű belátni, hogy a „garázméretű” fúziós reaktorok a földi és a bolygóközi térben is páratlan lehetőséget teremtenének a gyakorlatilag korlátlan energia előállításának lehetőségével.

Amennyiben a fenntartható fejlődés iránti elköteleződés domináns marad (vagy lesz) a világban, illetve viszonylag szigorú vállalásokat teszünk a szennyezés csökkentésére – amivel párhuzamosan viszonylag alacsony diszkontrátát veszünk figyelembe –, akkor a hosszabb távú előrejelzések szerint a fúziós energia fogja a legnagyobb részben kielégíteni a jövő energiaszükségleteit, másodsorban pedig a megújuló erőforrások.³² Ha viszont a diszkontráta magasan alakul, akkor a szén-dioxidot megkötő és tároló technológiák (*carbon capture and storage*, CCS) dominanciája valószínűsíthető. A tendenciákat alapul véve a megújuló erőforrások terén jelentős előrelépések várhatók még (mind technológiában, mind volumenben, a termelt energia arányában), ezért a szakértők³³ szerint érdemes foglalkozni azzal is, hogy meddig éri meg nem megújuló (köztük akár fúziós!) energiában gondolkodni. Hiszen pusztán a jelenlegi trendek extrapolálásával is a karbonsemleges energiaeállítás felé haladunk, amelyben a megújuló erőforrásoké a kulcsszerep, miközben a fúziós energia – mint felforgató technológia – nem ígérkezik olcsónak és gyorsan megtérülő alternatívának.

³⁰ TOLLEFSON, Jeff – GIBNEY, Elizabeth: Nuclear-fusion lab achieves ‘ignition’: what does it mean? *Nature*, Volume 612, News Explainer, 2022.12.13. pp. 597–598. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-04440-7>; letöltés: 2022.12.16.

³¹ SHUMLAK, Uri: Z-pinch fusion. *Journal of Applied Physics*, Volume 127, Issue 20, 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0004228>; letöltés: 2022.12.06.

³² CABAL, Helena – LECHÓN, Yolanda – BUSTREO, C. – GRACCEVA, Francesco – BIBERACHER, Markus – WARD, D. – DONGIOVANNI, Danilo Nicola – GROHNHEIT, Poul Erik: Fusion power in a future low carbon global electricity system. *Energy Strategy Reviews*, Volume 15, March 2017. pp. 1–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2016.11.002>; letöltés: 2022.12.30.

³³ NICHOLAS, T. E. – DAVIS, Thomas P. – FEDERICI, F. – LELAND, J. – PATEL, B. S. – VINCENT, C. – WARD, S. H.: Re-examining the role of nuclear fusion in a renewables-based energy mix. *Energy Policy*, Volume 149, February 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112043>; letöltés: 2022.10.16.

Az iménti dilemmák miatt a kisebb cégek nagyon töreksenek a kisebb méretben megvalósítható fúziós erőművek kifejlesztésére (pl. ritkaföldfémek felhasználásával a mágneseknél), amelyeknél a kezdeti tőkeköltség sokkal alacsonyabb, mint egy nagyerőműnél. Ha sikerül ilyen módon, illetve a már említett lézeres technológiával kis méretben megvalósítani a fúziós reaktort, akkor ennek az energiatípusnak a megtérülése kiemelkedően nagy lehet. A technológia készütségi szintjét azonban jelenleg 10-ből 3-ra lehet becsülni, míg a megújulók, a gázerőművek vagy a klasszikus és IV. generációs atomerőművek (amiről az atomenergia hazai alkalmazásánál még esik szó) 8–9-es szinten vannak. A fúziós kutatások megtérülését más tényezők is befolyásolják: az amerikai hírszerzési tanács (National Intelligence Council, NIC) jelentése³⁴ megemlíti, hogy a klímaváltozással számos arktiszi és antarktisi olaj- és gázmező válik elérhetővé (a fémek és az ásványok mellett), ami jelentősen leronthatja az innovatív energiaipari technológiák versenyképességét.

Végezetül érdemes említést tenni a fúziós energia társadalmi megítélésének fontosságáról. Bár ebben a témakörben még viszonylag kevés kutatás született, a technológia megítélését megvizsgálták néhány európai országban (pl. Belgiumban, Csehországban),³⁵ és az nem egyértelműen támogató. Ennek fontos oka, hogy a döntően tudományos, technológiai vagy üzleti megközelítésű híradásokat nem fogadják be igazán könnyen a laikusok, valamint a fúzió kétséges megtérülésű, távoli jövőben esedékes technológiának tűnik számukra. Ha nem így lenne, akkor viszont egyértelműen pozitív megítélés alá esne a hazai vizsgálatok szerint is.³⁶ A technológia gyenge jelből trenddé (vagy felforgatóból bevett technológiává)éréséhez fontos lenne a főáramú médiatémák között szerepeltetni, és a technikai-gazdasági előnyei helyett (vagy azok mellett) az életmódra, az egyéni befektetési lehetőségekre, a klasszikus értékekre gyakorolt hatásaira fókuszálni, ugyanakkor döntéshozói szinten a környezeti politikák és stratégiák részévé is kellene tenni.³⁷

³⁴ Climate Change and International Responses Increasing Challenges to US National Security Through 2040. National Intelligence Council, USA, 2021.

https://www.dni.gov/files/ODNI/documents/assessments/NIE_Climate_Change_and_National_Security.pdf, letöltés: 2022.08.25.

³⁵ PRADES, A. – DELICADO, A. – SCHMIDT, L. – TURCANU, C. – MESKENS, G. – PERKO, T. – WARD, D. – OLTRA, C.: Social Research on Fusion. 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan, 17–22 October 2016.

<https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Shared%20Documents/FEC%202016/fec2016-preprints/preprint0470.pdf>; letöltés: 2022.11.27.

³⁶ MÁRTON András: A környezetileg fenntartható stratégiai menedzsment jövőkutatói alapozása. Doktori (PhD) értekezés. Budapesti Corvinus Egyetem, Közgazdasági és Gazdaságinformatikai Doktori Iskola, 2022.

http://phd.lib.uni-corvinus.hu/1162/1/Marton_Andras_dhu.pdf; letöltés: 2022.12.14.

³⁷ ČABELKOVÁ, Inna – STRIELKOWSKI, Wadim – STREIMIKIENE, Dalia – CAVALLARO, Fausto – STREIMIKIS, Justas: The social acceptance of nuclear fusion for decision making towards carbon free circular economy: Evidence from Czech Republic. *Technological Forecasting & Social Change*, Volume 163, February 2021. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120477>; letöltés: 2022.12.28.

Kisméretű moduláris erőművek

Az energiahálózat részleges decentralizációja az MI térnyerésén túl más technológiai fejlesztéseket is elindított, például a kisebb (általában max. 300 MW-os) és kevésbé költséges, a helyi igényeket rugalmasan kielégíteni képes moduláris erőműveket (*small-scale modular reactor*, SMR). A moduláris erőművekkel számos szakirodalom foglalkozik, illetve több projekt is a megvalósítás folyamatában van a világ különböző pontjain (3. ábra). Ám ezekre is igaz, ami a fúziós technológiára, hogy egyelőre inkább kísérleti jelleggel folynak az építkezések, a moduláris erőművek a piaci bevezetés fázisában vannak – ezért tekinthető ez a megoldás pillanatnyilag gyenge jelnek, illetve felforgató technológiának.

A fúziós atomenergiával más ponton is összefűződik az SMR-technológia. Miként a fúziós energia hasznosítása kapcsán már említést nyert, a nagyerőművek helyett a kiserőművek képezhetik a jövőbeli decentralizált energiarendszer alapját, így elsősorban a fission és a fúziós atomerőműveknél merül fel a moduláris technológia. (Másképpen a fosszilis energiahordozók esetében már régóta léteznek eszközök arra, hogy kis méretben valósuljon meg az energia-előállítás, például kisméretű motorok, generátorok által.)

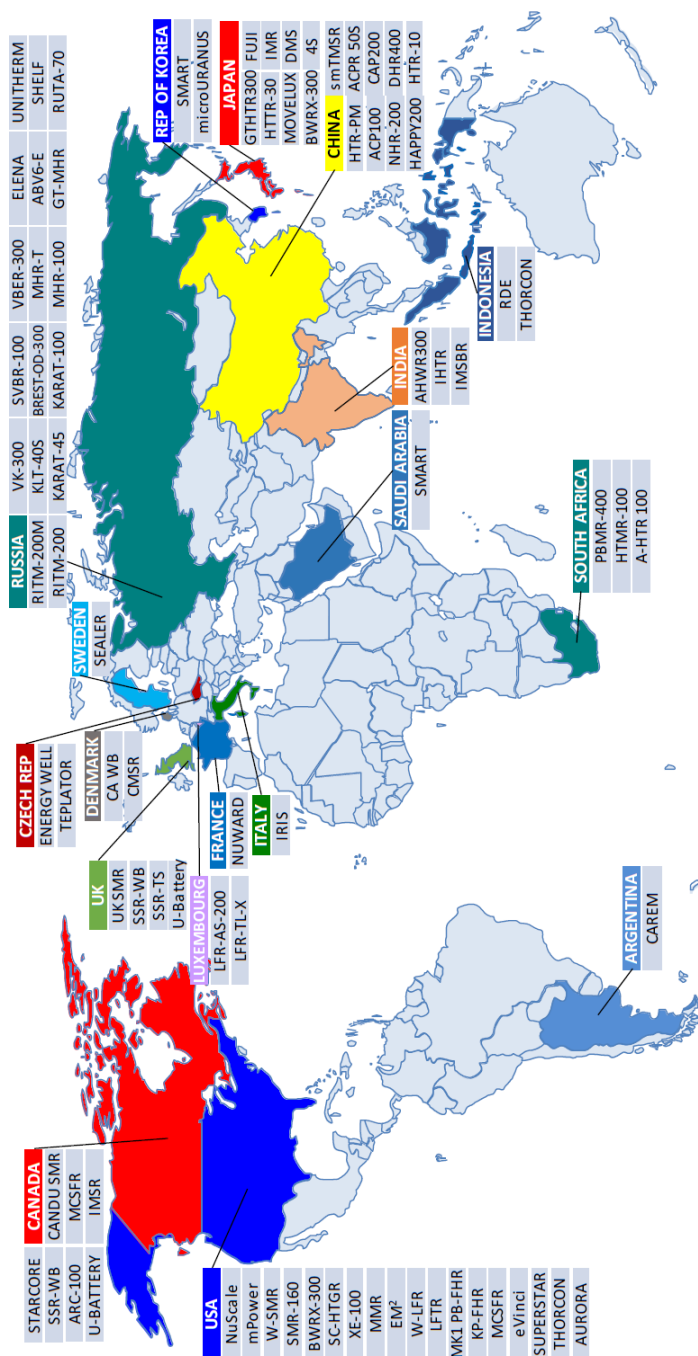
A fission kiserőművek gyakorlatilag az összes létező fission technológiát tudják hasznosítani, azaz a vízhűtéses, gázhűtéses, folyékony fémes, olvasztott són alapuló és egyéb reaktorok is megépíthetők moduláris rendszerben.³⁸ A moduláris erőműveknek számos előnyük van:³⁹ kisebb és nagyobb erőművek is felszerelhetők; idő- és költségkímélő kialakítás; rövidebb telepítési idő; méretgazdaságos energiatermelés és tömegtermelés ötvözése; a helyi igényeket jobban kiszolgáló terheléskövetés; hibrid üzemeltetés lehetősége (kombinálva pl. megújuló erőművekkel). Egyes szimulációs modellszámítások szerint a moduláris fúziós erőművi konstrukció a nagyerőművi fúziós technológiánál akár 50%-kal is alacsonyabb költséggel állíthatna elő egységnyi energiát.

A moduláris atomerőműveket az amerikai hírszerzési tanács is fontos feltörekvő technológiaként tartja számon (többek között a zöld hidrogén mellett, amit később még részletesen bemutatok), de felhívja a figyelmet a szabályozási, bürokratikus, biztonsági és költségekkel kapcsolatos kihívásokra. A kockázatok és kihívások miatt a legmodernebb moduláris atomerőműveket (pl. az ACP100-at Kínában) olyan módon tervezik meg, hogy passzív kockázatcsökkentő megoldásokkal legyenek képesek extrém időjárás jelenségek vagy sorozatos üzemhibák esetén is kiküszöbölni a komolyabb radioaktív szivárgásokat.⁴⁰

³⁸ Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2020. https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf, letöltés: 2022.08.25.

³⁹ CHUYANOV, Valery A. – GRYAZNEVICH, Mikhail P.: Modular fusion power plant. Fusion Engineering and Design, Volume 122, November 2017. pp. 238–252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.07.017>; letöltés: 2022.09.26.

⁴⁰ World Nuclear Performance Report 2022. World Nuclear Association, England, 2022. <https://world-nuclear.org/getmedia/9dafaf70-20c2-4c3f-ab80-f5024883d9da/World-Nuclear-Performance-Report-2022.pdf.aspx>, letöltés: 2022.08.25.



3. ábra. A világban megvalósuló kisméretű moduláris erőművek

Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2020.

https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf; letöltés: 2022.08.25.

Az ilyen módon biztonságossá tett moduláris erőművekkel kapcsolatban a társadalom is elfogadóbb lehet (erről a hazai szakértők előadásait összegző fejezetben még említést teszek), így a jövőben a kis reaktorok akár fel is válthatják a robusztus atomerőműveket, és a fúziós technológia sikeres fejlesztése esetén már kipróbált módszer lehet a moduláris építkezés.

Az energiatárolás lehetőségei és kihívásai

Az energiaipar egyik régóta fennálló, és továbbra sem tökéletesen megoldott problémája a villamos energia tárolása. Mivel a különböző energiaforrások nagy részéből elektromos áramot állítunk elő, az elektrifikációs és digitalizációs trendek pedig egyre gyorsulnak, kritikus lenne ennek a problémának a megoldása.

A villamos energia átmeneti tárolására számos módszer létezik, de rendszerszinten egyelőre nem megoldott a hatékony tárolás, az alkalmazott módszerek pedig viszonylag nagy energiavesztéssel járnak. Több tudományos forrás⁴¹ is rendszerezi az energiatárolási módszereket, e módszerek legnagyobb része azonban régóta ismert, adott esetben gazdaságosan alkalmazható is, áttörő újítás viszont alig valószínűsíthető. A meglévő tárolási technológiákat az 1. táblázat foglalja össze.

Tárolás típusa	Tárolás módszere	Példa a tárolási megoldásra
mechanikai	potenciális	sűrített levegő, vízpumpa, gravitációs
	kinetikus	lenderék
elektromos	elektrosztatikus	kondenzátor és szuperkondenzátor
	mágneses	szupravezető mágnes
kémiai	elektrokémiai	hagyományos akkumulátor (pl. Li-ion), folyadékkáros akkumulátor
	kémiai (üzemanyag)	üzemanyagcella
	termokémiai	ammónia és metán disszociáció és rekombináció, nap-hidrogén
hő	alacsony hőmérsékletű	hidegvizes, kriogén
	magas hőmérsékletű	olvasztott fém, olaj, olvasztott só, grafit, kőzet, homok, gőz és forró víz, fázisváltó anyagok

1. táblázat. Az energiatárolás lehetséges típusai, módszerei⁴²
Szerkesztette: Márton András

⁴¹ PRASAD, Kushal A. – CHAND, Aneesh A. – KUMAR, Nallapaneni Manoj – NARAYAN, Sumesh – MAMUN, Kabir A.: A Critical Review of Power Take-Off Wave Energy Technology Leading to the Conceptual Design of a Novel Wave-Plus-Photon Energy Harvester for Island/Coastal Communities' Energy Needs. Sustainability, Volume 14, Issue 4, 2022.
<https://doi.org/10.3390/su14042354>; letöltés: 2022.12.06.

TETTEH, Sampson – YAZDANI, Maryam Roza – SANTASALO-AARNIO, Annukka: Cost-effective Electro-Thermal Energy Storage to balance small scale renewable energy systems. Journal of Energy Storage, Volume 41, September 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102829>; letöltés: 2022.10.28.

⁴² Uo.

A szakirodalomban két olyan ígéretesnek tűnő megoldás szerepelt, amelyek gyenge jelként, illetve felforgató technológiaként azonosíthatók: a (zöld) hidrogén előállítása (azaz a megújuló erőforrásból származó elektromos áram konvertálása hidrogénné), valamint a hőközege energiátárolás egyes innovatív formái (pl. homokakkumulátor).

A tudományos cikkek többsége a hidrogénnek fontos szerepet jósol a közeli jövőben. A hidrogénnek ugyanis nagy előnye, hogy a felhasználása több formában lehetséges (lehet üzemanyag járművekbe vagy erőművekbe, használható fűtésre, acélipari és vegyipari felhasználása jelenleg is számottevő), a meglévő üzemanyagszállítási infrastruktúra (így a logisztika, a tárolási kapacitások) részben felhasználható a hidrogénhez,⁴³ emellett környezeti hatása is kedvezőbb a fosszilis tüzelőanyagokénál.

A hidrogén előállítható víz elektrolízisével, ami egy már ismert és kiforrott technológia, viszont ennek kombinálása a leginkább ingadozó termelésű megújuló erőforrásokkal (naperőművekkel és szél erőművekkel) egy innovatív megoldás lehet az áramfejlesztés kisimítására.⁴⁴ Ezt nevezzük zöld hidrogénnek. A szél- és napenergián alapuló hidrogéntárolós erőmű (részecskeeraj alapú és kémiai optimalizálással) az elsődleges áramelőállítás után elektrolízissel oxigént és hidrogént is elő tud állítani, amely hidrogént részben eladhatja a piacon, részben eltárolhatja üzemanyagcellákban és felhasználhatja energia-előállításra a megújuló erőforrások ingadozásai esetén. Továbbá a zöld hidrogén előállítása és használata nemcsak a klasszikus üvegházhatású gázok (szén-dioxid, metán) kibocsátását csökkentené, hanem más légszennyező anyagokét is (szén-monoxid, illékony szerves vegyületek, nitrogén-oxidok).⁴⁵

Az elemzések szerint nem mindegy, hogy a zöld hidrogén előállítására milyen összetételben használunk fel különböző típusú megújuló erőforrásokat. Két esettanulmány vizsgálatai alapján az inkább szél erőművekre támaszkodó megújuló rendszer hidrogéntárolókkal kiegészített életciklusköltsége jelentősen alacsonyabb lenne, mint a döntően naperőművekre támaszkodó (167 vs. 227 \$/MWh), viszont ha a hidrogén-előállító eszközök rugalmasan működtethetők, a gyors tárolók (akkumulátorok) hatékonyak, és a rendszerben valamennyi energiavesztés megengedett (azaz hagyunk energiaellátási vagy megbízhatósági rést), akkor mindkét megoldás életciklusköltsége jelentősen csökken, és a köztük lévő különbség az egységköltségben is 10% alá esik. De bármelyik mixet vesszük is alapul, a megújuló

⁴³ Fugitive Hydrogen Emissions in a Future Hydrogen Economy. Frazer-Nash Consultancy, March 2022. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1067137/fugitive-hydrogen-emissions-future-hydrogen-economy.pdf; letöltés: 2022.12.30.

⁴⁴ KONG, Lingguo – LI, Liangyuan – CAI, Guowei – LIU, Chuang – MA, Ping – BIAN, Yudong – MA, Tao: Techno-economic analysis of hydrogen energy for renewable energy power smoothing. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 3, January 2021, pp. 2847–2861. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.231>; letöltés: 2022.12.02.

CHEN, Chao – LU, Yangsiyu – XING, Lei: Levelling renewable power output using hydrogen-based storage systems: A techno-economic analysis. *Journal of Energy Storage*, Volume 37, May 2021. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102413>; letöltés: 2022.12.14.

⁴⁵ WARWICK, Nicola – GRIFFITHS, Paul – KEEBLE, James – ARCHIBALD, Alexander – PYLE, John – SHINE, Keith: Atmospheric implications of increased Hydrogen use. Open Government Licence, April 2022. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1067144/atmospheric-implications-of-increased-hydrogen-use.pdf; letöltés: 2022.12.30.

energiaforrásokat és a hidrogént támogató tudósok többsége szerint a politikának az ilyen hibrid megújuló tárolórendszereket érdemes lenne támogatnia.

Ennek a technológiának is vannak gyenge pontjai. A hidrogén hosszú távú tárolása nem ideális megoldás a tárolók és a kompresszorok költségei és a biztonsági kockázatok (pl. a robbanásveszély) miatt. A kockázatok enyhítése érdekében további átalakítás (pl. ammóniává, metanollá) lehet szükséges, ami viszont csökkenti a technológia gazdaságosságát. Több tanulmány⁴⁶ felhívja a figyelmet egy fontos további kockázatra, a hidrogén szivárgására, ami bizonyos százalék fölött nemcsak anyagi, hanem jelentős környezeti károkat is okozhat. A hidrogéngáz nagyobb mennyiségben ugyanis csökkenti azon molekulák (hidroxilgyökök) koncentrációját az atmoszférában, amelyek lebontják az üvegházhatást okozó gázokat, és növeli a vízgőz mennyiségét (ami szintén az üvegházhatáshoz járul hozzá). Ezért a szakértők szerint nagyon fontos a hidrogénszivárgások megfelelő monitorozása és elhárítása, amire e technológia áttörése és széles körű elterjedése esetén fokozottan ügyelni kell.

A hőközegezes tárolás az energiatárolás egy másik kibontakozó megoldása, amely lehetővé teszi az (ingadozó) energiakínálat illesztését az (ingadozó) energiakereslethez. A hőközegezes tárolás előnye, hogy általában olyan anyagokra támaszkodik, amelyek nagyobb mennyiségben rendelkezésre állnak és könnyebben hozzáférhetők, mint például a lítium és más ritka fémek az akkumulátor-technológiához. A hőközegezes tárolásra felhasznált legjellemzőbb anyagok például az olaj, az olvasztott só, bizonyos fémek, kőzetek (lásd az 1. táblázatot).

Az újabb tanulmányok a homokot vizsgálják mint hőtároló anyagot, mivel az még a fentebb sorolt anyagoknál is olcsóbb és nagyobb mennyiségben elérhető. A könnyű és olcsó hozzáférés miatt a homokakkumulátoros technológia hozzájárulhat az energiatárolás eléréséhez, valamint többek között az afrikai fejlődő országok felzárkózásához, ahol (a homok kedvező összetétele miatt) az energiatárolás mellett édesvíz előállításához is hasznosítani lehet ezt a technológiát a desztillálótelepeken.⁴⁷ A homok mellett szól az az érv is, hogy az üzemi hőmérséklete sokkal szélesebb skálán szabályozható, mint például az olajé vagy a sóé, ezáltal a moduláris energiatárolóban való felhasználása a modellezés szerint 85%-os hatékonysági szintet is elérhet (az olaj 44%-os és a só 32%-os hatékonyságával szemben), miközben a teljes költsége alacsony szinten marad: körülbelül 69 \$/kWh.

⁴⁶ OCKO, Ilissa B. – HAMBURG, Steven P.: Climate consequences of hydrogen emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume 22, Issue 14, 2022. pp. 9349–9368.
<https://doi.org/10.5194/acp-22-9349-2022>; letöltés: 2022.12.28.

FAN, Zhiyuan – SHEERAZI, Haida – BHARDWAJ, Amar – CORBEAU, Anne-Sophie – LONGOBARDI, Kathryn – CASTAÑEDA, Adalberto – MERZ, Ann-Kathrin – WOODALL, Caleb – AGRAWAL, Mahak – OROZCO-SANCHEZ, Sebastian – FRIEDMANN, Julio: Hydrogene Leakage – A Potential Risk for the Hydrogene Economy. Columbia SIPA, Center on Global Energy Policy, 2022.07.05.
<https://www.energypolicy.columbia.edu/research/commentary/hydrogen-leakage-potential-risk-hydrogen-economy>; letöltés: 2022.12.30.

⁴⁷ ATTIA, Mohammed El Hadí – KABEEL, A. E. – ABDELGAIED, Mohamed: Optimal concentration of El Oued sand grains as energy storage materials for enhancement of hemispherical distillers performance. *Journal of Energy Storage*, Volume 36, April 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102415>; letöltés: 2022.12.06.

Egyéb felforgató technológiák

A megújuló erőforrások inkrementális fejlesztése mellett felmerül azok kombinálása is abból a célból, hogy az egyik erőforrásban jelentkező szezonális vagy napon belüli ingadozást a másik erőforrás helyben pótolni tudja, így a kapacitás és a kimenő energia (elsősorban elektromos áram) nagyobb megbízhatósággal tartható egy bizonyos szinten. Az ezt az elvet hasznosító hibrid eszközök kettő vagy több erőforrás kitermelését kombinálják, amilyen például a hullám–nap-erőmű (HWPE Harvester), amely kis mérete miatt könnyen telepíthető és áthelyezhető, viszont csak akkumulátorba tudja gyűjteni az elektromos áramot (közvetlen hálózati betáplálás nem lehetséges), valamint viszonylag jelentős hullámenergiára van szükség a hatékony működtetéséhez. Más (már létező vagy korábban bemutatott) technológiákhoz képest kevésbé tűnik valószínűnek ennek a módszernek az elterjedése a közeli jövőben, ezért kategóriájában inkább szabadkártyának tekinthető.

Ugyancsak a már említett decentralizálást támogatja a virtuális erőművek koncepciója: a virtuális erőmű egy szoftveralapú hálózati irányítási felhőstruktúra, amely nagy adatbázisok (*big data*) kezelését és többirányú információáramlást tesz lehetővé⁴⁸ – szemben a klasszikus központi rendszerirányítással, amely napjainkban a centralizált energiarendszereket jellemzi. A virtuális erőmű lényegében a következő lépés az erőműirányításban, amelyben több okoseszköz vesz részt (de még nem az MI irányítja), ezáltal hatékonyabb lehet az energiaátvitel, rugalmasabb a rendszerkarakterisztika és jobban szabályozott az ellenőrzés. A kutatók további előnyei közé sorolják,⁴⁹ hogy a virtuális erőmű segítségével kiegyensúlyozottabb lehet a hálózat a kereslet–kínálat viszonyainak megfelelően, kevésbé problematikus a kereslet–kínálat pontatlan előrejelzése, gyorsabb és olcsóbb hozzáférést biztosít az energiapiacokhoz, illetve kiaknázható a kétirányú hálózatba táplálás (pl. az elektromos autók tartalékainak betáplálása a rendszerbe). Az új generációs virtuális erőművek pedig már a perifériákra decentralizált, MI-n, IoT-on és nagy adathalmazok valós idejű elemzésén alapuló intelligens energiaszolgáltatást biztosíthatnak. (Megjegyzendő, hogy ezen a ponton lényegében összemosódik a virtuális erőmű és az MI-technológia.)

Mindazonáltal a virtuális erőműveknek viszonylag kevés valódi alkalmazása ismeretes, mivel van bennük egy igen komoly kockázati tényező: a többretegű rendszerarchitektúra több ponton sebezhető, mint a klasszikus rendszer, ha kibertámadások célkeresztjébe kerül. Márpedig az elmúlt években számos ilyen támadás történt, amelyek célja információszivárogtatás vagy internetkimaradás, IT-rendszer összeomlása, áramszünet, illetve urándúsító meghibásodásának előidézése volt. Amíg ezeket a kockázatokat nem sikerült kielégítő mértékben kiküszöbölni, a virtuális erőművi technológia gyenge jelnek minősül.

⁴⁸ BHUIYAN, Erphan A. – HOSSAIN, Md. Zahid – MUYEEN, S. M. – FAHIM, Shahriar Rahman – SARKER, Subrata K. – DAS, Sajal K.: Towards next generation virtual power plant: Technology review and frameworks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 150, October 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111358>; letöltés: 2022.12.02.

⁴⁹ NAVAL, Natalia – YUSTA, Jose M.: Virtual power plant models and electricity markets – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 149, October 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111393>; letöltés: 2022.11.17.

A banki-pénzügyi szektor után az energiaszektorban is felmerült a blokklánc-technológia (*blockchain*) felhasználási lehetősége,⁵⁰ mert a blokkláncok az energiaszektorban is alkalmasak a decentralizáció, a kereslet-kínálat kiegyenlítése, az átláthatóság és a tranzakcióbiztonság megvalósítására. Az energiablokklánc használatának feltétele az IoT és a nagy adathalmazok, valamint fontos szerep jut az MI-nek is a hatékonyság fokozása érdekében (pl. automata szerződések kötésénél). A technológia előnyeként említi a szakirodalom a megbízhatóságot (a megosztott adatbázis miatt), az integrált adatokat, a könnyű hozzáférést az energiapiachoz, a szerződésautomatizálás lehetőségét, valamint azt, hogy nincs szükség közbenső szereplőkre. Hátránya viszont a magas számítási kapacitás és energia iránti igény, a fogyasztói jogok tisztázatlansága és adatvédelmi problémák (tekintve, hogy a megosztott blokklánc hálózat adatai nyilvánosak), továbbá a méretezési rugalmatlanság (a túl sok csatlakoztatott szereplő miatt lassulhat a rendszer). A technológia sok rokonságot mutat az MI-vel, ám míg az MI a blokkláncok nélkül is minden bizonnyal nagy szerepet fog játszani az energiaiparban, a blokklánc-technológia önállóan nem valószínű, hogy betör a szektorra – ha mégis, akkor jelentős változást hozhat, így szabadkártyának értékelhető.

A globális klímaváltozás és a technológiai fejlődés egy további érzékeny területen kapcsolódik össze: a geomérnökség a Föld természeti (ezáltal klíma-) folyamataiba való tervezett beavatkozás, amelyre már számos ötlet felmerült, mint például árnyékolók telepítése az ürbe, planktonok intenzív szaporítása az óceánokban stb. A geomérnökség mindenképpen felforgató technológia, hiszen egy olyan komplex rendszerbe történő beavatkozást jelent, amelynek pontos következményei nem jelezhetők előre, és a következmények előjele és mértéke miatt nemzetközi konfliktusba torkollhat. A klímaváltozás illetően megállítása nyilvánvalóan befolyásolná az energiaipart, a további fejlesztéseket, a megtérülési számításokat. A geomérnökség mindenképpen a szabadkártya kategóriába tartozik, de hatása miatt az amerikai hírszerzés is foglalkozott vele, és jelentésében azonosított néhány olyan országot, amelyek fokozottan ki vannak téve a klímaváltozás hatásainak már középtávon is, ami miatt ezekben az országokban nagyobb az önkényes geomérnöki tevékenységek kockázata: Afganisztán, Burma, India, Pakisztán, Észak-Korea (Dél- és Kelet-Ázsia), Guatemala, Haiti, Honduras, Nicaragua (Közép-Amerika), Kolumbia és Irak.

Mindenképpen fontos szót ejteni a megújuló erőforrások további kiaknázásában rejlő potenciálról, hiszen globálisan az olyan mértékű, ami az egész emberiségnek elegendő energia termelését biztosítaná. Például a világ hullámenergia-potenciálja akár évi 80 000 TWh is lehet, azonban ennek nagy része a déli vizeken (Dél-Amerika, Dél-Afrika, Ausztrália déli vizein) lenne kitermelhető, ahol kevés a szárazföld és jelentősek az időjárási szélsőségek, ezért ott az energiatermelés is problematikus.⁵¹

⁵⁰ TEUFEL, Bernd – SENTIC, Anton – BARMET, Mathias: Blockchain energy: Blockchain in future energy systems. *Journal of Electronic Science and Technology*, Volume 17, Issue 4, December 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2020.100011>; letöltés: 2022.08.30.

⁵¹ CURTO, Domenico – FRANZITTA, Vincenzo – GUERCIO, Andrea: Sea Wave Energy. A Review of the Current Technologies and Perspectives. *Energies*, Volume 14, Issue 20, October 2021. <https://doi.org/10.3390/en14206604>; letöltés: 2022.11.08.

Érthető, hogy a különböző erőforrásokban rejlő potenciál miatt a megújuló technológiai fejlődése folyamatos és jelentős, de a szakirodalomban nemigen találkozni ugrásszerű, a jelenlegi rendszereket felforgató hatású újítással, technológiával.

A megújuló közlül felforgató technológia a kitermelés helye miatt leginkább az űrből lesugárzott napenergia lehet. A japán és a kínai űrhivatal már a 2000-es évek óta foglalkozik az űrben gyűjtött és az űrből mikrohullámmal vagy lézerrel a földre sugárzott napenergia hasznosítási lehetőségével, amelynek gazdaságossági küszöbét (az akkori előrejelzések szerint) a 2020–2030-as években érhetjük el.⁵² Az űrbe telepített napelemek előnye a napi 24 órás, a légköri folyamatoktól, időjárástól független üzemelés mellett az, hogy nem a földi élettől veszi el az életteret, hátránya viszont a jelentős telepítési költség. A kutatók szerint^{53,54} ezért az újrahasználható rakéták és a könnyebb fajsúlyú anyagok fejlesztésén nagymértékben múlik az űrnapelemek elterjedése.

A jelenlegi technológiák mellett az űrbe telepített napelemek kb. 17%-os összesített hatékonysággal tudnának működni az átjátszási, a légköri és egyéb veszteségeket is beleszámolva. Az űrparban fontos a Föld körüli pályára állítandó rakomány tömege, ezért egyes modellezések a kilogrammonként elérhető kapacitást (vagy megtermelt energiát) vizsgálják: a kb. 32-33%-os hatékonyságú napelemekkel 0,5–1 kW/kg érhető el, ami már közelíti a gazdaságosnak tekinthető 1–10 kW/kg-os határt, a koncentrált napsugárzást hasznosító űrnaperőmű pedig (könnyebb konstrukció lévén) pedig akár a 4,1 kW/kg-os értéket is elérheti. Az eredmények alapján valószínűsíthető, hogy a jövőben – ha az ember részben az űrben és más égitesteken is megtelepszik – ez fontos energiaforrás lesz, ezért a technológia felforgató jellegűnek és gyenge jelnek tekinthető.

SAKÉRTŐI VÁRAKOZÁSOK AZ ENERGIAIPARI TECHNOLÓGIÁK JÖVŐJÉRŐL MAGYARORSZÁGON

Ebben a fejezetben különböző, a tanulmány témakörében rendezett események tapasztalatai, szakértői előadásai és nyilatkozatai alapján mutatok be energiaipari felforgató technológiákat, illetve azok magyarországi megjelenését, lehetséges jövőbeli szerepvállalását a hazai energiaszektorban.

⁵² MORI, Masahiro – KAGAWA, Hideshi – SAITO, Yuka: Summary of studies on space solar power systems of Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). *Acta Astronautica*, Volume 59, Issue 1–5, July–September 2006. pp. 132–138.

<https://doi.org/10.1016/J.ACTAASTRO.2006.02.033>; letöltés: 2022.11.06.

⁵³ JAFFE, Paul: 24 – Space Solar. In: LETCHER, Trevor. M. (szerk.): *Future Energy (Third Edition). Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet*. Elsevier, 2020. pp. 519–542.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00024-4>; letöltés: 2022.12.28.

⁵⁴ WARMANN, Emily C. – ESPINET-GONZALEZ, Pilar – VAIDYA, Nina – LOKE, Samuel – NAQAVI, Ali – VINOGRADOVA, Tatiana – KELZENBERG, Michael – LECLERC, Christophe – GDOUTOS, Eleftherios – PELLEGRINO, Sergio – ATWATER, Harry A.: An ultralight concentrator photovoltaic system for space solar power harvesting. *Acta Astronautica*, Volume 170, May 2020. pp. 443–451.

<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.12.032>; letöltés: 2022.10.14.

Az elemzésbe vett tudományos események időrendben az alábbiak voltak:

- *A mesterséges intelligencia átfogó hatásainak vizsgálata* tudományos workshop (Katonai Nemzetbiztonsági Szolgálat, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2022. november 3.);
- 2022. évi *Magyar Tudomány Ünnepe* rendezvénysorozat (Magyar Tudományos Akadémia, 2022. november 3–30.);
- *Hidak és utak – II. innovációs konferencia – Lehetőségből cselekvés* (Budapesti Corvinus Egyetem, 2022. november 24–25.).⁵⁵

Az események követése során magától értetődően tapasztalható volt, hogy több esetben a szakirodalomban is feldolgozott technológiákról van szó, de az innovációk sokszor előrébb tartanak a tudományos publikálásuknál, a publikációk pedig a stratégiáknál és más hosszú távú tervdokumentumoknál. Elsősorban ezért tartottam fontosnak és hasznosnak a szakmai fórumok, konferenciák tapasztalatainak beépítését a tanulmányba, a fejezet áttekintést ad az ismertett technológiák magyarországi alkalmazási lehetőségeire. A világszínvonalú technológiák tanulmányozása során ugyanis fontos lenne, hogy a szoftverfejlesztés, adatkezelés és a finomhangolás a fizikai térben sem hazánktól távol történjen, ezen túlmenően pedig egyedi ökoszisztémákra és integrált megközelítésre van szükség mind nemzetbiztonsági szempontból,⁵⁶ mind az energetikára vonatkozóan. Általánosságban mégis széles körben egyetértettek a szakértők⁵⁷ abban, hogy nem látható olyan áttörő technológia (paradigmaváltás) az energiaiparban, amely 10–20 éven belül gyökeres változást hozhat Magyarországon.

Mesterséges intelligencia a magyar energiaszektorban

A hazai szakértők szerint az MI legfontosabb gyengéje (jelenleg) a kontextusba helyezés hiánya (ami az embernél részben a heurisztikával rokonítható), de érzékeny a külső (kiber-) támadásokra és a belső manipulációkra is, például a szabotázsra.⁵⁸ Az energiaszektor tekintetében az első gyengeség kevésbé releváns, de a belső manipuláció kockázata és a kiberbiztonság nagyon fontos, így a támadások mellett az adatmérgezés (azaz az MI tanuló adatbázisába szándékosan illesztett rossz adatok) is valós kiberveszély lehet.⁵⁹

⁵⁵ A hivatkozott szakértők névsora részben az idézeteknél, részben az irodalomjegyzékben olvasható.

⁵⁶ ERDÉSZ Viktor: Milyen lehetőségeket hoz az új technológiák elterjedése a felderítés számára? KNBSZ–NKE workshop, 2022.11.03.

⁵⁷ IMRE Attila – OBERFRANK Ferenc – GOLDFÁRTH József – HORVÁTH Ákos – KOVÁCS Pál – KISS Csaba – SZABÓ István – TOMPOS András: A tudomány és a szakpolitika együttműködési lehetőségei az energiaellátás biztonsága, megfizethetősége és fenntarthatósága érdekében. Tudomány és Parlament: A nemzeti energiapolitika stratégiai kihívásai. Előadások és panelbeszélgetés, 2022.11.10. <https://www.youtube.com/watch?v=siw7XzEsHEY&t=13624s>; letöltés: 2022.12.04.

⁵⁸ CSÁKI Csaba: A mesterséges intelligencia és egyéb felforgató technológiák elterjedéséből adódó kockázatok vizsgálata, azok kezelésének lehetőségei. KNBSZ–NKE workshop, 2022.11.03.

⁵⁹ BEREZKI Dávid: Milyen kihívásokat jelent az új technológiák elterjedése az elhárítás számára? KNBSZ–NKE workshop, 2022.11.03.

Magyarországon az utóbbi időszakban az energetikai szektor egyre inkább centralizálódott, így a Magyar Villamos Műveknek (MVM) mint legmeghatározóbb, állami tulajdonú nagyvállalatnak kell helyt állnia az energiaátmenet kihívásaival szemben. Az MVM képviselőjében a konferencián megjelent szakértő⁶⁰ elmondása szerint a vállalat több területen is igyekszik innovatívan szembenézni a kihívásokkal, amelyekben helyt kapnak különböző MI-alkalmazások:

- innovatív mérőn túli szolgáltatások bevezetése: gépi tanulással (MI) támogatott IoT-platform, elemző és robotizált folyamatautomatizálási rendszer (ERPA);
- startup inkubáció: programok és szolgáltatások nyújtása, *design thinking* akciók (innovációs garázs), közvetlen befektetés, mentorálás, tesztkörnyezet-bérbeadás (MVM-telephelyeken).

Az MI magyarországi hasznosítása az energiaszektorban az okosvárosok terén is teret nyerhet a jövőben. Az okosváros egyik koncepciójának részét képezi a digitális iker (értsd leképezés), amelyben fontos szerep jut a hálózatoknak, az IoT-nek, az automatizációnak és az ember–robot kommunikációnak, adott esetben pedig a transzhumanizmusnak is. A szakértő⁶¹ elmondása szerint külföldön (pl. Amerikában) jelentős támogatást élveznek az ilyen projektek, de hazánkban is van példa ezek implementálására – Szegeden és Szombathelyen. Jellemző, hogy az ilyen projektek először az ipari, iparosodott városokban jönnek létre, amelyek leginkább nyitottak és motiváltak a hatékonyságjavító technológiák befogadására, alkalmazására.

A vizsgálatba vont konferenciák tanulsága, hogy a fejezet bevezetésében említett technológiai olló (a fejlett országok és hazánk között) az MI tekintetében szélesre nyílik: míg a tudományos szakirodalomban és a nyugati országokban az MI kutatása és illeszkedése az energiaiparba rendkívül szerteágazó, Magyarországon a szakértők nem szántak kiemelt figyelmet erre a témakörre.

Az atomenergia és a moduláris reaktorok lehetséges hazai alkalmazása

Magyarországon az atomenergia jelentősége vitathatatlan, hiszen évtizedek óta a hazai villamosenergia-termelés mintegy kétharmadát a paksi atomerőmű biztosítja, és jelenleg is zajlik a Paks 2 néven futó új atomerőmű-építési projekt. A magyar szakértők többsége egyetértett abban a különböző fórumokon, hogy az atomenergia megkerülhetetlen tényező Magyarország jövőjében is, mivel mind fizikai, gazdasági, mind környezeti (dekarbonizációs) szempontból megfelel a nemzetközi elvárásoknak, előírásoknak, miközben stabil energiaforrásként funkcionál. Eközben a különböző politikai alkuk eredményeként – a zöld NGO-k küzdelme ellenére – az atomenergia és a földgáz 2023. január 1-jétől bekerült az EU zöld taxonómiájába, mivel az átfogó vizsgálatok eredményeként a teljes életciklus szennyezését tekintve nem károsabbak a többi energiaforrásnál, sőt a megújulóknál sem (vagy nem számottevően).⁶²

⁶⁰ BERTALAN Zsolt: Innováció egy nagyvállalatnál. Hogyan innovál egy nagyvállalat? Előadás. Hidak és utak – II. Innovációs Konferencia. Lehetőségből cselekvés. Budapesti Corvinus Egyetem, 2022.11.24-25.

⁶¹ GYULAI Tamás: Mesterséges intelligencia a jövő okos városában. KNBSZ–NKE workshop, 2022.11.03.

⁶² VÉGH János: EU zöld taxonómia és atomenergia. Tudományünnep+, 2022.11.16. <https://www.youtube.com/watch?v=GglM2og3M6o>; letöltés: 2022.12.04.

Az évtizedek során a többek között a súlyos nukleáris katasztrófák miatt felerősödött társadalmi bizalmatlanság, sőt elutasítás egyik legfontosabb oka – amire a környezeti szempontokat figyelő civil szervezetek is felhívják a figyelmet – a sugárzó hulladék kezelésének a problémája. Ennek következtében ez az egyik kérdés, amiben a technológia fejlődése és hazai adaptálása változást hozhat, és több szakértő is hosszan elemezte a várható változásokat, fejlesztéseket.

A kiegészített nukleáris üzemanyag kezelésére nézve biztató, hogy annak több mint 90%-a újrahasznosítható további energiaelőállítás céljára, csak a fennmaradó rész kellene mint nagy aktivitású sugárzó hulladékot elhelyezni, például mélygeológiai tárolókban.⁶³ A technológia erre előrehaladott állapotban van, viszont az elmúlt 50 évben túl drága volt, ezért nem alkalmazták, jelen energiapiaci helyzetben viszont fontolásra veendő a szélesebb körű elterjesztése. A fűtőelemek újrahasznosítása mellett az aktinidák (hosszú felezési idejű nukleáris hulladékok) átalakítása (transzmutációja) is egy lehetséges feldolgozási technológia, amelyről kutatás folyik Szegeden (a lézeres kutatóközpontban), illetve magyar részvétellel a V4-országokkal közösen futó, 4. generációs gázhűtéses gyorsreaktor-projektekben (lásd pl. ALLEGRO-projekt).⁶⁴ Az előadásokból⁶⁵ kiderült, hogy a 4. generációs gyorsreaktorok nem feltétlenül leváltanák, hanem kiegészítenék a termikus reaktorokat a magasabb hőmérsékletű üzemeléssel, ami szükséges a kiegészített hasadóanyag további hasznosításához, de amire a nyomottvízes (így pl. a paksi) technológia már nem alkalmas.

A kisméretű moduláris reaktorok hazai alkalmazása ugyancsak lehetséges eljárásnak tűnt a szakértők szerint, de ebben nincs teljes összhang a tudósok között. Boros⁶⁶ felhívta a figyelmet, hogy az SMR-ek egyik előnye (a szakirodalomban ismertetettek kivételével), hogy még nincs hozzájuk kapcsolódó negatív tapasztalat, térben (és időben) elszórtan jelenhetnek meg (nem koncentráltan), és a társadalomban nincs félelem az alkalmazásával szemben. Ezen előnyök segítségével könnyebb lehet elfogadtatni új moduláris atomreaktorok építését a közvéleménnyel, mint a hagyományos atomerőművekéit. Más szempontból az SMR-ek a gazdasági és a társadalmi előnyeik ellenére (amely miatt pl. a csehek és a lengyelek már szerződéseket kötöttek gyártókkal, kivitelezőkkel) nem biztos, hogy széles körben elterjednek, mert az engedélyeztetés nem gyorsabb, mint a nagyerőművek esetében, miközben ez az atomerőművek építését egyik legjobban gátló tényező. Megjegyzendő, hogy Magyarországon az elérhető információk alapján nem szerepel a tervdokumentumokban és stratégiákban sem az SMR, sem más technológia a Paks 2 beruházás alternatívájaként, bár igen kevés információ áll rendelkezésre a Paks 2 projektdokumentumainak titkosítása miatt. Mindazonáltal a konferenciákon elhangzott,

⁶³ ASZÓDI Attila: Feszítő kérdések az energetikában: ellátásbiztonság vagy dekarbonizáció? Vagy és? Tudományünnep+, 2022.11.09

<https://www.youtube.com/watch?v=nP6qUIgNGYs>; letöltés: 2022.12.04.

⁶⁴ HORVÁTH Ákos: Hasítunk-e? A nukleáris energia jövője az EU-ban. Tudományünnep+, 2022.11.15.

<https://www.youtube.com/watch?v=jmrEiMfRVf0>; letöltés: 2022.12.04.

⁶⁵ SZIEBERTH Máté: A gyorsreaktorok szerepe a nukleáris üzemanyagciklusban. Tudományünnep+, 2022.11.16.

<https://www.youtube.com/watch?v=GgIM2og3M6o>; letöltés: 2022.12.04.

⁶⁶ BOROS Ildikó: Mikor lehet SMR-ünk? Az atomerőművi kisreaktorok fejlettségi státusza. Tudományünnep+, 2022.11.16.

<https://www.youtube.com/watch?v=GgIM2og3M6o>; letöltés: 2022.12.04.

hogyan az EU-ban érzékelhető a szándék arra, hogy a nukleáris engedélyeztetési szabályozást harmonizálják, és az engedélyeztetést egyszerűsítsék és gyorsítsák.

Az energiatárolás legígéretesebb jelöltje: a hidrogén

A hidrogén előállítását és használatát az energiaszektorban a szakértők széles köre az egyik legígéretesebb eseménynek várja Magyarországon is. Ezt alátámasztja az a tény is, hogy hazánkban nemcsak kutatások, de pilotprojektek és gyakorlati alkalmazások is folyamatban vannak, ami alább példát is írok.

Az orosz–ukrán háború a hidrogén stratégiai kihasználását jelentősen felgyorsította az EU-ban – bizonyos 2050-es célokat előrehoztak 2030-ra –, de az operatív megvalósítás nem tudta ilyen gyorsan lekövetni a felerősödő igényt. Az EU irányvonalához illeszkedve Magyarország hidrogénstratégiája⁶⁷ kiemeli a hidrogént jelenleg is nagyobb mennyiségben felhasználó ipari tömörüléseket, amelyekhez a hidrogénelőállítás és -tárolás is kapcsolódhat: északkeleti hidrogénvölgy (Miskolc, Tiszaújváros, Kazincbarcika) és a dunántúli hidrogén-ökoszisztéma (Pétfürdő, Százhalombatta, Dunaújváros, Beremend, Királyegyháza). A hidrogénstratégia a fokozatosságot tartja szem előtt, következésképp – még az EU korábbi iránymutatásnak megfelelően – 2030-ig az előkészítő szakasz tart.⁶⁸

Hazánkban a hosszabb időre (pl. nyárról télre) történő energiatárolás – más adottságok és erőforrások híján – elsősorban a kémiai tárolás útján lehetséges. A hidrogén mint energiatároló közeg tömegarányosan előnyös, és sóbányákban vagy kimerült geológiai földgázkamrákban lehet tárolni,⁶⁹ amely már hazánk számára is stratégiai előnyt jelenthet. Ezt az előnyt a Magyar Földgáztároló Zrt. (MFGT)⁷⁰ is igyekszik hasznosítani: a meglévő földgáztározóhoz és infrastruktúrához külföldről berendelt elektrolizáló berendezést és puffertartályokat fognak létesíteni, amelyek összteljesítménye 2,5 MW lesz, és elsősorban demonstrációs célokat szolgál. Ezzel párhuzamosan Bükkábrányban is készül egy kisebb hidrogénelektrolizáló és -tároló komplexum, egy valamivel nagyobb (10 MW-os) megvalósítását pedig a MOL tűzte ki célul.⁷¹ A kémiai tárolás, esetünkben a hidrogéntechnológia a hazai szakértői várakozások szerint elsősorban az iparban és részben az energetikában erősödhet meg a következő 10 évben, a személyi mobilitásban az előrejelzések szerint valószínűleg kisebb lesz a szerepe, mivel nem méretgazdaságos az alkalmazása kis léptékben.

⁶⁷ Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája. ITM, 2021.06.02.

<https://kormany.hu/dokumentumtar/magyarorszag-nemzeti-hidrogenstrategiaja>, letöltés: 2023.01.02.

⁶⁸ TOMPOS András: Hidrogén és tüzelőanyagcella-szektor a változó világban. Tudományünnep+, 2022.11.15.

<https://www.youtube.com/watch?v=jmrEiMfRVf0>; letöltés: 2022.12.04.

⁶⁹ JANÁKY Csaba: A megújuló energiaforrásokról közérthetően: csodaszor, vagy zsákutca? Tudományünnep+, 2022.11.10.

<https://www.youtube.com/watch?v=5vRwPfhvSG8>; letöltés: 2022.12.04.

⁷⁰ KRISTON Ákos: Innováció a Magyar Földgáztárolónál. Előadás. Hidak és utak – II. Innovációs Konferencia. Lehetőségből cselekvés. Budapesti Corvinus Egyetem, 2022.11.24-25.

⁷¹ HORVÁTH Ákos – KADERJÁK Péter – TOMPOS András – TOMPA Ferenc – MOLNÁR Gábor: Az energiaellátás biztonsága – hogyan merre? Első szekció: termelés és tárolás. Tudományünnep+, kerekasztalbeszélgetés, 2022.11.15.

<https://www.youtube.com/watch?v=jmrEiMfRVf0>; letöltés: 2022.12.04.

A hidrogén energetikai felhasználását gyorsíthatja, hogy a gázturbinagyártók már fel vannak készülve a hidrogén fogadására: ha lesz elég hidrogéntermelés, az erőművek a korszerű gázturbináikkal 25–100%-ban tudnak hidrogént is égetni. Végző soron a magyar szakértők is megvalósíthatóknak és jövőbe mutató technológiának tartják a zöld hidrogén előállítását.

Egyéb áttörő technológiák Magyarországon

A konferenciák és a workshopok konklúziói szerint a megújuló erőforrások rendszerintegrációja és a megfelelő menetrendezés egy komoly, megoldandó probléma. Ennek kapcsán merültek fel olyan további technológiák és eljárások az MVM oldaláról, amelyek igen előremutatók, egyelőre azonban csak terv vagy próbaprojekt szintjén léteznek. Ilyen projekt az energiaközösség létrehozása Keszthelyen, valamint az úgynevezett „black start” képesség⁷² fejlesztése Litéren. Bár ezek a projektek részben az energiaszektor decentralizációja irányába hatnak, a korábbi elemzésből kiderült, hogy alapvetően a magyar energiastratégiát nem jellemzi a decentralizációs törekvés.

Egyes szakértők⁷³ szerint a tárolókkal kombinált megújuló erőművek meg tudják oldani saját rendszerintegrációjukat azonnali és rövid távú (pl. szezonális) tárolással, de ezt nem kizárólag, sőt nem elsősorban hidrogénnel, hanem akár relatíve kisebb akkumulátoros tárolókkal is elérhetjük. Különösen, ha a 2022-ben kritikussá vált földgáz felhasználását tekintjük, a fogyasztók oldaláról a legjobb költségmegtakarítást a megújuló erőforrásokkal (14 Ft/m³/év), a tárolókkal kiegészített menetrendezéssel, geotermikus távhőszolgáltatással, majd a teljes lakáshőszigeteléssel (35–45 Ft/m³/év) lehet elérni a számítások szerint.

Az itt felsoroltakon kívül a szakirodalomban említett többi felforgató technológia vagy egyáltalán nem merült fel a hazai szakértői körökben (pl. virtuális erőmű, blokklánc, fúziós technológia csak említés szintjén), vagy nem releváns számunkra (hullámenergia, úrnaperőmű, geomérnökség).

ÖSSZEGZÉS: A FELFORGATÓ TECHNOLÓGIÁK ÉS MAGYARORSZÁGI ALKALMAZÁSUK

Magyarország a közepes fejlettségű országok közé sorolható, ennél fogva jellemzően vannak lemaradásaink a technológiai fejlettségben a fejlett nyugati országokhoz képest. Ebben a tanulmányban megvizsgáltam azokat az energiaipari felforgató technológiákat, amelyek gyenge jelként vagy szabadkártyaként meg-megjelennek az angol nyelvű nemzetközi szakirodalomban, és néhány hazai energetikai szakértői fórum, workshop és konferencia tudományos nyilatkozatainak és előadásainak feldolgozásával értékeltem a felforgató technológiák hazai megítélését és alkalmazási lehetőségeit.

⁷² A „black start” a külső feszültség nélküli indítást jelenti, így részben a szigetüzemű működéshez hasonlítható.

⁷³ KADERJÁK Péter: Az energiatárolókkal kombinált megújuló erőművek lehetséges szerepe a magyar energiaszuverenitás biztosításában. Tudományünnep+, 2022.11.15. <https://www.youtube.com/watch?v=jmrEiMfRVf0>; letöltés: 2022.12.04.

A szakirodalomban azonosított legjelentősebbnek tekinthető felforgató technológiák a mesterséges intelligencia, a fúziós atomenergia, valamint a moduláris erőművi konstrukció. Ezek közül Magyarországon az MI tekinthető egyértelműen relevánsnak a következő 8–10 évben, a moduláris erőműveket több hazai szakértő is ígéretesnek tartja, de elterjedésük a közeljövőben nem valószínű, a fúziós atomenergia pedig csak az ország hosszú távú jövőjének képezheti részét. A kutatási kérdésekre, miszerint 2030-ig milyen felforgató technológiák elterjedése várható az energiaiparban globálisan, és ezek közül melyek megjelenésére lehet számítani Magyarországon, a fent írtakat is magában foglaló 2. táblázat ad összefoglaló választ.

Felforgató technológia az energiaiparban	Gyenge jel (kibontakozó trend korai megjelenése)	Szabadkártya (kis valószínűségű, de nagy hatású esemény)	Magyarországon 10 éven belül relevánsnak tekinthető technológia
Mesterséges intelligencia	J		J
Fúziós atomenergia	J		J
Moduláris erőművek	J		(J)
Kombinált erőművek		J	(J)*
Virtuális erőművek	J		
Blokklánc		(J)	
Geomérnökség		J	
Úrnaperőmű	J		
IV. generációs atomerőmű	J		
Energiaközösség*	(J)		J
„Black start” képesség**	(J)		

* A szakértői fórumok alapján Magyarországon a tárolóval kombinált megújuló alapú erőművet (is) értjük alatta.
** Erre vonatkozó szakirodalmat nem tártam fel, de véleményem szerint több fejlett országban ezek már vagy gyenge jelnek, vagy kibontakozó trendnek tekinthetők.

2. táblázat. A szakirodalomból és a szakértői előadásokból kiemelt felforgató technológiák összefoglaló táblázata
Szerkesztette: Márton András

A magyar energiaipar nyugati gyakorlatot követő magatartása (ezáltal késése) csak az egyik ok, ami miatt a hazai szakértők nem várnak áttörést az energetikai technológiák terén, mert ha lenne ilyen, azt Nyugaton (vagy épp Keleten) már látnánk. Konszenzusos álláspont látszott kirajzolódni a nyilatkozatok és az előadások alapján abban is, hogy az energetikában azért nincsenek felforgató technológiák, mert az energiaválság alapvetően Európa problémája (más kutatóközpontoknak és agytrösztöknek nincs erős és sürgős motivációja), ráadásul a megoldást az EU-n belül is sokféleképpen képzelik el. A legjobb energiaipari útírányt és fejlesztéseket tekintve nincs sem szakmai, sem társadalmi egyetértés, valamint meglehetősen szétartóak a gazdasági és a geopolitikai érdekek. Természetesen, ha valamelyik fent

említett technológia mégis betör a következő évtizedben, és valóban felforgatja az energiaszektor, akkor előbb-utóbb Magyarországon is megjelenhet, vagy ha adottságai miatt ez nem lehetséges, akkor is profitálhat hazánk az új technológiából az összekapcsolt hálózatokon, a tudástranszferen vagy más kapcsolatokon keresztül. Ám arra a tudományos cikkek és a szakértők is felhívták a figyelmet, hogy megfelelő kiberbiztonság szükséges ahhoz, hogy az MI, a virtuális erőművek, a blokklánc, az IoT vagy bármely digitális alkalmazás elfogadhatóan alacsony kockázattal épülhessen be az energiaszektorba, ezáltal a társadalom és a gazdaság mindennapjaiba.

Magyarország energiaiparának a középtávú jövőben minden jel szerint az új paksi erőmű lesz a legmeghatározóbb szereplője, de a szektor a szakértői várakozások szerint ki fog egészülni a megújuló erőforrásokkal, esetleg kiegészítő szerepű IV. generációs gyorsreaktorral, valamint a hidrogéntekológiával. Ez utóbbi a Zrínyi 2026 terv szerint fontos szerepet játszhat a védelmi iparban is. A tárolóval kombinált megújuló erőművek valamelyest a decentralizáció irányába viszik majd el a hazai villamosenergia-rendszert, és ehhez kapcsolódóan a szakértők azt is felvetették, hogy a rendszeregyensúly ezáltal fogyasztói oldalról is részben biztosítható lenne, és ebben hangsúlyosabbá válhat az MI használata is.

Összegzésként fontos kiemelni a társadalmi akarat jelentőségét. A tanulmányból is kikövetkeztethető, hogy azért, mert valamely technológia gyenge jelként vagy megbontó innovációként rendelkezésre el, netán már el is indult a trenddé válás útján, még mindig előfordulhat, hogy nem válik széles körben alkalmazott technológiává, ha az emberek számára nem elfogadható az a jövőkép, amelyhez vezet. A társadalom által kívánatosnak tartott jövőben azok a technológiák foglalhatnak helyet, amelyekkel kapcsolatban megvan a kellő ismeret, amelyek iránt van nyitottság, befogadási készség, később pedig kellő tudás az alkalmazásra. Az újdonság megismertetésére és a tudás átadására a tudomány képes, de a technológia biztonságos bevezetése és elterjesztése a politika és a gazdaság feladata.

IRODALOMJEGYZÉK

ABDALLA, Ahmed N. – NAZIR, Muhammad Shahzad – TAO, Hai – CAO, Suqun – Ji, Rendong – JIANG, Mingxin – YAO, Liu: Integration of energy storage system and renewable energy sources based on artificial intelligence: An overview. *Journal of Energy Storage*, Volume 40, August 2021. <https://sci-hub.se/uptodate/S2352152X21005387.pdf>; letöltés: 2023.02.04.

About ITER. In a few lines. <https://www.iter.org/proj/inafewlines>; letöltés: 2023.01.30.

Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2020. https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf; letöltés: 2022.08.25.

- AHMAD, Tanveer – ZHANG, Dongdong – HUANG, Chao – ZHANG, Hongcai – DAI, Ningyi – SONG, Yonghua – CHEN, Huanxin: Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, Volume 289, 20 March 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125834>; letöltés: 2022.12.02.
- ASZÓDI Attila: Feszítő kérdések az energetikában: ellátásbiztonság vagy dekarbonizáció? *Vagy és? Tudományünnep+*, 2022.11.09.
<https://www.youtube.com/watch?v=nP6qUIgNGYs>; letöltés: 2022.12.04.
- ATTIA, Mohammed El Hadi – KABEEL, A. E. – ABDELGAIED, Mohamed: Optimal concentration of El Oued sand grains as energy storage materials for enhancement of hemispherical distillers performance. *Journal of Energy Storage*, Volume 36, April 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102415>; letöltés: 2022.12.06.
- BERECZKI Dávid: Milyen kihívásokat jelent az új technológiák elterjedése az elhárítás számára? *KNBSZ–NKE workshop*, 2022.11.03.
- BERTALAN Zsolt: Innováció egy nagyvállalatnál. *Hogyan innovál egy nagyvállalat? Előadás. Hidak és utak – II. Innovációs Konferencia. Lehetőségből cselekvés.* Budapesti Corvinus Egyetem, 2022.11.24-25.
- BHUIYAN, Erphan A. – HOSSAIN, Md. Zahid – MUYEEN, S. M. – FAHIM, Shahriar Rahman – SARKER, Subrata K. – DAS, Sajal K.: Towards next generation virtual power plant: Technology review and frameworks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 150, October 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111358>; letöltés: 2022.12.02.
- BONGOMIN, Ocident – OCEN, Gilbert Gilibrays – NGANYI, Eric Oyondi – MUSINGUZI, Alex – OMARA, Timothy: Exponential Disruptive Technologies and the Required Skills of Industry 4.0. *Journal of Engineering*, Volume 2020.
<https://doi.org/10.1155/2020/4280156>; letöltés: 2022.10.24.
- BOROS Ildikó: Mikor lehet SMR-ünk? Az atomerőművi kisreaktorok fejlettségi státusza. *Tudományünnep+*, 2022.11.16.
<https://www.youtube.com/watch?v=GglM2og3M6o>; letöltés: 2022.12.04.
- BOZA, Pal – EVGENIOU, Theodoros: Artificial intelligence to support the integration of variable renewable energy sources to the power system. *Applied Energy*, Volume 290, May 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116754>; letöltés: 2022.11.16.
- CABAL, Helena – LECHÓN, Yolanda – BUSTREO, C. – GRACCEVA, Francesco – BIBERACHER, Markus – WARD, D. – DONGIOVANNI, Danilo Nicola – GROHNHEIT, Poul Erik: Fusion power in a future low carbon global electricity system. *Energy Strategy Reviews*, Volume 15, March 2017. pp. 1–8.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2016.11.002>; letöltés: 2022.12.30.
- ČABELKOVÁ, Inna – STRIELKOWSKI, Wadim – STREIMIKIENE, Dalia – CAVALLARO, Fausto – STREIMIKIS, Justas: The social acceptance of nuclear fusion for decision making towards carbon free circular economy: Evidence from Czech Republic. *Technological Forecasting & Social Change*, Volume 163, February 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120477>; letöltés: 2022.12.28.

CHEN, Chao – LU, Yangsiyu – XING, Lei: Levelling renewable power output using hydrogen-based storage systems: A techno-economic analysis. *Journal of Energy Storage*, Volume 37, May 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102413>; letöltés: 2022.12.14.

CHEN, Cheng – HU, Yuhan – KARUPPIAH, Marimuthu – KUMAR, Priyan Malarvizhi: Artificial intelligence on economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 47, October 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101358>; letöltés: 2022.11.15.

CHUYANOV, Valery A. – GRYAZNEVICH, Mikhail P.: Modular fusion power plant.

Fusion Engineering and Design, Volume 122, November 2017. pp. 238–252.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.07.017>; letöltés: 2022.09.26.

Climate Change and International Responses Increasing Challenges to US National Security Through 2040. National Intelligence Council, USA, 2021.

https://www.dni.gov/files/ODNI/documents/assessments/NIE_Climate_Change_and_National_Security.pdf, letöltés: 2022.08.25.

CURTO, Domenico – FRANZITTA, Vincenzo – GUERCIO, Andrea: Sea Wave Energy. A Review of the Current Technologies and Perspectives. *Energies*, Volume 14, Issue 20, October 2021.

<https://doi.org/10.3390/en14206604>; letöltés: 2022.11.08.

CSÁKI Csaba: A mesterséges intelligencia és egyéb felforgató technológiák elterjedéséből adódó kockázatok vizsgálata, azok kezelésének lehetőségei. KNBSZ–NKE workshop, 2022.11.03.

Empowering AI Leadership: AI C-Suite Toolkit. World Economic Forum, Geneva, Switzerland, 2022.

https://www3.weforum.org/docs/WEF_Empowering_AI_Leadership_2022.pdf; letöltés: 2022.12.28.

ERDÉSZ Viktor: Milyen lehetőségeket hoz az új technológiák elterjedése a felderítés számára? KNBSZ–NKE workshop, 2022.11.03.

FAN, Zhiyuan – SHEERAZI, Haida – BHARDWAJ, Amar – CORBEAU, Anne-Sophie – LONGOBARDI, Kathryn – CASTAÑEDA, Adalberto – MERZ, Ann-Kathrin – WOODALL, Caleb – AGRAWAL, Mahak – OROZCO-SANCHEZ, Sebastian – FRIEDMANN, Julio: Hydrogene Leakage – A Potential Risk for the Hydrogene Economy. Columbia SIPA, Center on Global Energy Policy, 2022.07.05.

<https://www.energypolicy.columbia.edu/research/commentary/hydrogen-leakage-potential-risk-hydrogen-economy>; letöltés: 2022.12.30.

Fugitive Hydrogen Emissions in a Future Hydrogen Economy.

Frazer-Nash Consultancy, March 2022.

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1067137/fugitive-hydrogen-emissions-future-hydrogen-economy.pdf; letöltés: 2022.12.30.

Fusion research worldwide. Max Planck Institute for Plasma Physics.

<https://www.ipp.mpg.de/1740642/weltweit>; letöltés: 2022.01.30.

Global opinions and expectations about Artificial Intelligence: A Global Advisory survey.

Ipsos, January 2022

<https://www.ipsos.com/sites/default/files/ct/news/documents/2022-01/Global-opinions-and-expectations-about-AI-2022.pdf>; letöltés: 2022.08.25.

GYULAI Tamás – Mesterséges intelligencia a jövő okos városában.
KNBSZ–NKE workshop, 2022.11.03.

HIDEG Éva – KOROMPAI Attila – KOVÁCS Géza – NOVÁKY Erzsébet: Jövő kutatás.
Aula, Budapest, 1999.

HIDEG Éva – MIHÓK Barbara – GÁSPÁR Judit – SCHMIDT Péter – MÁRTON András – BÁLDI András: Assessment in horizon scanning by various stakeholder groups using Osgood's semantic differential scale – A methodological development. *Futures*, Volume 126, February 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.futures.2020.102677>; letöltés: 2022.11.04.

HIMEUR, Yassine – GHANEM, Khalida – ALSALEMI, Abdullah – BENSALI, Faycal – AMIRA, Abbas: Artificial intelligence based anomaly detection of energy consumption in buildings: A review, current trends and new perspectives. *Applied Energy*, Volume 287, April 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116601>; letöltés: 2022.10.16.

HOFFER Ilona – IVÁNYI Attila Szilárd: Gondolatok az innováció működési mechanizmusáról. *Vezetéstudomány*, 39. évfolyam 4. szám, 2008. pp. 51–55.
<https://doi.org/10.14267/VEZTUD.2008.04.05>; letöltés: 2022.10.11.

HORVÁTH Ákos – KADERJÁK Péter – TOMPOS András – TOMPA Ferenc – MOLNÁR Gábor: Az energiaellátás biztonsága – hogyan merre? Első szekció: termelés és tárolás. Tudományünnep+, kerekasztalbeszélgetés, 2022.11.15.
<https://www.youtube.com/watch?v=jmrEiMfRVf0>; letöltés: 2022.12.04.

HORVÁTH Ákos: Hasítunk-e? A nukleáris energia jövője az EU-ban. Tudományünnep+, 2022.11.15.
<https://www.youtube.com/watch?v=jmrEiMfRVf0>; letöltés: 2022.12.04.

IMRE Attila – OBERFRANK Ferenc – GOLDFÁRTH József – HORVÁTH Ákos – KOVÁCS Pál – KISS Csaba – SZABÓ István – TOMPOS András: A tudomány és a szakpolitika együttműködési lehetőségei az energiaellátás biztonsága, megfizethetősége és fenntarthatósága érdekében. Tudomány és Parlament: A nemzeti energiapolitika stratégiai kihívásai. Előadások és panelbeszélgetés, 2022.11.10.
<https://www.youtube.com/watch?v=siw7XzEsHEY&t=13624s>; letöltés: 2022.12.04.

JAFFE, Paul: 24 – Space Solar. In: LETCHER, Trevor. M. (szerk.): *Future Energy (Third Edition). Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet*. Elsevier, 2020. pp. 519–542.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00024-4>; letöltés: 2022.12.28.

JANÁKY Csaba: A megújuló energiaforrásokról közérthetően: csodaszor, vagy zsákutca? Tudományünnep+, 2022.11.10.
<https://www.youtube.com/watch?v=5vRwPfHvSG8>; letöltés: 2022.12.04.

KADERJÁK Péter: Az energiatárolókkal kombinált megújuló erőművek lehetséges szerepe a magyar energiaszuverenitás biztosításában. Tudományünnep+, 2022.11.15.
<https://www.youtube.com/watch?v=jmrEiMfRVf0>; letöltés: 2022.12.04.

KIVIMAA, Paula – LAAKSO, Senja – LONKILA, Annika – KALJONEN, Minna: Moving beyond disruptive innovation: A review of disruption in sustainability transitions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Volume 38, March 2021, pp. 110–126.
<https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.12.001>; letöltés: 2022.11.26.

KONG, Lingguo – LI, Liangyuan – CAI, Guowei – LIU, Chuang – MA, Ping – BIAN, Yudong – MA, Tao: Techno-economic analysis of hydrogen energy for renewable energy power smoothing. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 3, January 2021. pp. 2847–2861.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.231>; letöltés: 2022.12.02.

KOW, Ken Weng – WONG, Yee Wan – RAJKUMAR, Rajparthiban Kumar – RAJKUMAR, Rajprasad Kumar: A review on performance of artificial intelligence and conventional method in mitigating PV grid-tied related power quality events. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 56, April 2016. pp. 334–346.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.064>; letöltés: 2022.12.14.

KRISTON Ákos: Innováció a Magyar Földgáztárolónál.

Előadás. Hidak és utak – II. Innovációs Konferencia. Lehetőségből cselekvés.

Budapesti Corvinus Egyetem, 2022.11.24-25.

LYU, Wenjing – LIU, Jin: Artificial Intelligence and emerging digital technologies in the energy sector. *Applied Energy*, Volume 303, December 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117615>; letöltés: 2022.10.08.

Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája. ITM, 2021.06.02.

<https://kormany.hu/dokumentumtar/magyarorszag-nemzeti-hidrogenstrategiaja>,

letöltés: 2023.01.02.

MAKALA, Baloko – BAKOVIC, Tonci: Artificial Intelligence in the Power Sector.

EM Compass, Note 81, April 2020.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34011.18729>; letöltés: 2022.11.02.

MÁRTON András: A környezetileg fenntartható stratégiai menedzsment jövőkutatási alapozása. Doktori (PhD) értekezés. Budapesti Corvinus Egyetem, Közgazdasági és Gazdaságinformatikai Doktori Iskola, 2022.

http://phd.lib.uni-corvinus.hu/1162/1/Marton_Andras_dhu.pdf; letöltés: 2022.12.14.

MENDONÇA, Sandro – CARDOSO, Gustavo – CARAÇA, João: The strategic strength of weak signal analysis. *Futures*, Volume 44, Issue 3, April 2012. pp. 218–228.

https://www.researchgate.net/publication/251724953_The_strategic_strength_of_weak_signal_analysis; letöltés: 2022.11.18.

METAXIOTIS, K. – KAGIANNAS, A. – ASKOUNIS, Dimitris – PSARRAS, John: Artificial intelligence in short term electric load forecasting: a state-of-the-art survey for the researcher. *Energy Conversion and Management*, Volume 44, Issue 9, June 2003. pp. 1525–1534.

[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00148-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00148-6); letöltés: 2022.10.14.

MOORE, Geoffrey A.: Darwin and the Demon – Innovating Within Established Enterprises.

Harvard Business Review, Volume 82, Issue 7-8, July 2004. pp. 86–92.

<https://hbr.org/2004/07/darwin-and-the-demon-innovating-within-established-enterprises>; letöltés: 2022.12.10.

MORI, Masahiro – KAGAWA, Hideshi – SAITO, Yuka: Summary of studies on space solar power systems of Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA).

Acta Astronautica, Volume 59, Issue 1–5, July–September 2006. pp. 132–138.

<https://doi.org/10.1016/J.ACTAASTRO.2006.02.033>; letöltés: 2022.11.06.

- NAVAL, Natalia – YUSTA, Jose M.: Virtual power plant models and electricity markets – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 149, October 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111393>; letöltés: 2022.11.17.
- NICHOLAS, T. E. . – DAVIS, Thomas P. – FEDERICI, F. – LELAND, J. – PATEL, B. S. – VINCENT, C. – WARD, S. H.: Re-examining the role of nuclear fusion in a renewables-based energy mix. *Energy Policy*, Volume 149, February 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112043>; letöltés: 2022.10.16.
- NOVÁKY Erzsébet – KRISTÓF Tamás: A comprehensive review of Hungarian futures studies in light of international journal articles. *European Journal of Futures Research*, Volume 10, Issue 14, 2022. <https://doi.org/10.1186/s40309-022-00201-x>; letöltés: 2022.12.30.
- NOVÁKY Erzsébet: Jövőkutatás és felelősség. *Magyar Tudomány*, 167. évfolyam 9. szám, 2006. pp. 1090–1098. <https://www.matud.iif.hu/2006-09.pdf>; letöltés: 2022.10.08.
- OCKO, Ilissa B. – HAMBURG, Steven P.: Climate consequences of hydrogen emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume 22, Issue 14, 2022. pp. 9349–9368. <https://doi.org/10.5194/acp-22-9349-2022>; letöltés: 2022.12.28.
- ONGENA, Jef: Nuclear fusion and its large potential for the future world energy supply. *Nukleonika*, Volume 61, Issue 4, 2016. pp. 425–432. <https://doi.org/10.1515/nuka-2016-0070>; letöltés: 2022.12.02.
- PETERSEN, John L.: *Out of the Blue: How to Anticipate Big Future Surprises*. Madison, Lanham, 1999.
- PRADES, A. – DELICADO, A. – SCHMIDT, L. – TURCANU, C. – MESKENS, G. – PERKO, T. – WARD, D. – OLTRA, C.: *Social Research on Fusion*. 26th IAEA Fusion Energy Conference, Kyoto, Japan, 17–22 October 2016. <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Shared%20Documents/FEC%202016/fec2016-preprints/preprint0470.pdf>; letöltés: 2022.11.27.
- PRASAD, Kushal A. – CHAND, Aneesh A. – KUMAR, Nallapaneni Manoj – NARAYAN, Sumesh – MAMUN, Kabir A.: A Critical Review of Power Take-Off Wave Energy Technology Leading to the Conceptual Design of a Novel Wave-Plus-Photon Energy Harvester for Island/Coastal Communities' Energy Needs. *Sustainability*, Volume 14, Issue 4, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14042354>; letöltés: 2022.12.06.
- Report of the World Commission on Environment and Development: *Our Common Future*. Oxford University Press, Oxford, 1987. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>; letöltés: 2022.10.14.
- SCHUMPETER, Joseph A.: *A gazdasági fejlődés menete*. Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó, Budapest, 1980.
- ŞERBAN, Andreaa Claudia – LYTRAS, Miltiadis D.: Artificial Intelligence for Smart Renewable Energy Sector in Europe – Smart Energy Infrastructures for Next Generation Smart Cities. *IEEE Access*, Volume 8, 2020. pp. 77364–77377. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990123>; letöltés: 2022.11.10.

SHUMLAK, Uri: Z-pinch fusion. *Journal of Applied Physics*, Volume 127, Issue 20, 2020.
<https://doi.org/10.1063/5.0004228>; letöltés: 2022.12.06.

SZIEBERTH Máté: A gyorsreaktorok szerepe a nukleáris tüzemanyagciklusban.
Tudományünnep+, 2022.11.16.
<https://www.youtube.com/watch?v=GglM2og3M6o>; letöltés: 2022.12.04.

TETTEH, Sampson – YAZDANI, Maryam Roza – SANTASALO-AARNIO, Annukka:
Cost-effective Electro-Thermal Energy Storage to balance small scale renewable energy
systems. *Journal of Energy Storage*, Volume 41, September 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102829>; letöltés: 2022.10.28.

TEUFEL, Bernd – SENTIC, Anton – BARMET, Mathias: Blockchain energy:
Blockchain in future energy systems. *Journal of Electronic Science and Technology*,
Volume 17, Issue 4, December 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2020.100011>; letöltés: 2022.08.30.

TOLLEFSON, Jeff – GIBNEY, Elizabeth: Nuclear-fusion lab achieves ‘ignition’: what does it
mean?
Nature, Volume 612, News Explainer, 2022.12.13. pp. 597–598.
<https://doi.org/10.1038/d41586-022-04440-7>; letöltés: 2022.12.16.

TOMPOS András: Hidrogén és tüzelőanyagcella-szektor a változó világban.
Tudományünnep+, 2022.11.15.
<https://www.youtube.com/watch?v=jmrEiMfRVf0>; letöltés: 2022.12.04.

UDDIN, Md. Nasir – RASHID, Mahbub – MOSTAFA, Mohammad Golam – BELAYET, H. –
SALAM, Syed Munimus – NITHE, Na: New Energy Sources: Technological Status and
Economic Potentialities. *Global Journal of Science Frontier Research*, Volume 16, Issue 1,
March 2016. pp. 24–37.
https://globaljournals.org/GJSFR_Volume16/3-New-Energy-Sources-Technological.pdf;
letöltés: 2022.09.10.

VÉGH János: EU zöld taxonómia és atomenergia. Tudományünnep+, 2022.11.16.
<https://www.youtube.com/watch?v=GglM2og3M6o>; letöltés: 2022.12.04.

WARMANN, Emily C. – ESPINET-GONZALEZ, Pilar – VAIDYA, Nina – LOKE, Samuel –
NAQAVI, Ali – VINOGRADOVA, Tatiana – KELZENBERG, Michael – LECLERC, Christophe –
GDOUTOS, Eleftherios – PELLEGRINO, Sergio – ATWATER, Harry A.:
An ultralight concentrator photovoltaic system for space solar power harvesting.
Acta Astronautica, Volume 170, May 2020. pp. 443–451.
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.12.032>; letöltés: 2022.10.14.

WARWICK, Nicola – GRIFFITHS, Paul – KEEBLE, James – ARCHIBALD, Alexander –
PYLE, John – SHINE, Keith: Atmospheric implications of increased Hydrogen use.
Open Government Licence, April 2022.
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/
file/1067144/atmospheric-implications-of-increased-hydrogen-use.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1067144/atmospheric-implications-of-increased-hydrogen-use.pdf); letöltés: 2022.12.30.

World Nuclear Performance Report 2022. World Nuclear Association, England, 2022.
[https://world-nuclear.org/getmedia/9dafaf70-20c2-4c3f-ab80-f5024883d9da/World-Nuclear-
Performance-Report-2022.pdf.aspx](https://world-nuclear.org/getmedia/9dafaf70-20c2-4c3f-ab80-f5024883d9da/World-Nuclear-Performance-Report-2022.pdf.aspx), letöltés: 2022.08.25.