

# Ellátásbiztonság az energiaátmenet időszakában

Csermely Ágnes, Kaderják Péter , Lengyel Balázs, Mészégető Anna, Szolnoki Palma\* 

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Zéró Karbon Központ, Budapest, Magyarország

\*Levelező szerző, e-mail: szolnoki.palma@bme.hu

Beérkezett: 2024. február 9.; elfogadva: 2024. március 28.

## Összefoglalás

A zöld energetikai átállás folyamatát leggyakrabban klímavédelmi szempontok alapján elemzik. Ebben a cikkben az energiabiztonságra gyakorolt hatását vizsgáljuk a megújuló energiahordozók térnyerésének. A mérleg pozitív serpenyőjében szerepel az energiafüggetlenséghez való hozzájárulás, a széles körben elérhető technológia és a fosszilis energiahordozókhoz képest kiszámítható árazás. A folyamat ugyanakkor számos kihívással is együtt jár, melyek közül kiemeljük a szezonális tárolás lehetőségének korlátosságát, az ellátásbiztonsághoz szükséges nem időjárásfüggő tartalékkapacitások fenntartásának nehézségeit, a hálózatüzemeltetéssel kapcsolatos problémákat, a digitalizációval együtt növekvő kiberbiztonsági kockázatokat és a kritikus alapanyagok koncentrációjából fakadó kihívásokat. E kihívásokra költséghatékony megoldásokat kell kialakítani, így a zöldenergia térnyerése komplex, a szakpolitika koordinációját igénylő, több évtizeden áthúzódó folyamat lesz.

**Kulcsszavak:** energiaátmenet, ellátásbiztonság, időjárásfüggők, tárolás

## Security of supply in times of energy transition

Ágnes Csermely, Péter Kaderják, Balázs Lengyel, Anna Mészégető, Palma Szolnoki

Budapest University of Technology and Economics, Zero Carbon Hub, Budapest, Hungary

### Summary

The green energy transition process is most often analysed from a climate protection perspective. In this article, we look at the impact of rising renewable generation on the security of energy supply. On the positive side there is renewables' contribution to energy independence, their widespread availability, and their predictable pricing compared to fossil fuels. However, the process of increasing the share of renewables also carries several challenges, including the limitations of seasonal storage, the difficulties of maintaining non-weather-dependent reserve capacity for security of supply, grid management issues, the growing cyber security risks associated with digitalisation and the concentration of the availability of critical minerals. Cost-effective solutions to these challenges need to be developed, making the take-up of green energy a complex process that requires policy coordination over the next several decades.

**Keywords:** energy transition, security of supply, VRE, storage

## 1. Bevezetés

Az energiaátmenet vagy zöld energetikai átállás alatt azt értjük, hogy az energiaszektor egyre kevésbé támaszkodik a fosszilis alapú energiatermelési és -fogyasztási megoldásokra – ideértve a kőolajat, a földgázt és a szenet –, és egyre nagyobb mértékben alkalmaz megújuló energiaforrásokat, főként szél- és napenergiát, és a villamos energia tárolására alkalmas berendezéseket. Az átállási

folyamat során nemcsak az energia kínálata alakul át, hanem az energia felhasználásának módja is változik, erőteljes elektrifikáció valósul meg, kiváltva a korábbi fosszilis energiahordozók használatát például az épületek fűtés-hűtése és a közlekedés területén. Mindez együtt jár az energiatermelés topológiájának megváltozásával is, a megújuló energiatermelés ugyanis a hagyományos több száz megawattos erőművek helyett sokkal kisebb méretű egységekben, gyakran lokálisan valósul meg, így a nagy,

már piacon lévő integrált nagyvállalatok mellett egyre több szereplő, akár fogyasztók (termelő-fogyasztók, angolul prosumerek) is be tudnak kapcsolódni az energiatermelésbe és a rendszerszintű szolgáltatások piacára. A változó topológia és az időjárásfüggő energiakínálat új kihívásokat jelent a rendszerüzemeltető számára, a hálózat gyors fejlesztése és a rendszerek digitalizációja szükséges ahhoz, hogy a termelési pontok és felhasználási igények drasztikus növekedésével megbirkózzanak. Ezzel párhuzamosan elindul a fosszilis energiahordozók zöld hidrogénnel és annak származékaival történő kiváltása, bár ez a folyamat még korántsem olyan előrehaladott, mint a megújuló villamos energia térnyerése. E sokdimenziós folyamatot hívjuk energiaátmenetnek.

Az energiaátmenet fontosságát elsősorban klímavédelmi megfontolásból szokták hangsúlyozni, de az elmúlt időszakban, különösen az orosz–ukrán háború és a Gázai-konfliktus tükrében az ellátásbiztonság szempontjából is felértékelődött a szerepe.

Az IEA (2024) meghatározása szerint az energiabiztonság az energiaforrások megfizethető áron történő zavartalan elérhetősége. Az energiabiztonságnak több aspektusa van: a hosszú távú energiabiztonság főként a változó igényeknek és változó környezeti hatásoknak megfelelő energiaellátást lehetővé tevő beruházások időben történő megvalósításával foglalkozik. A rövid távú energiabiztonság az energiarendszer azon képességére összpontosít, hogy gyorsan reagáljon a kereslet-kínálat egyensúlyának hirtelen változásaira.

A megújuló energiák egyre nagyobb mértékű alkalmazása jelentősen átalakítja az energiabiztonsági kihívásokat. Alapvetően pozitív irányú változásokat hoz a zöld energetikai átállás, de új kihívások is jelentkeznek, amelyek még számos innovatív megoldás kialakítását, illetve a már ismert megoldások széles körű használatának elterjesztését teszik szükségessé. Ebből fakad, hogy a zöld átállás egy komplex, a szakpolitika koordinációját igénylő, több évtizeden áthúzódó folyamat lesz. A klímavédelem élharcosának számító Európai Unió is 2050-re tűzte ki célul a karbonsemlegesség elérését.

## 2. A zöld átállás pozitív hatása az ellátásbiztonságra

Magyarország és Európa egésze szempontjából a zöld átállással együtt járó legfontosabb pozitív változás, hogy az új technológiák mérséklék az importfüggőséget. A fosszilis energiahordozók globálisan egyenetlenül vannak elosztva, ami mindig függőségi viszonyt jelent az ezen erőforrásokat exportáló és importáló országok között. Így a fosszilis energiatermelés biztonságának egyik kulcskérdése az útvonal és forrásdiverzifikáció: arra kell törekedni, hogy egy ország mindig képes legyen alternatív forrást eljuttatni a piacára abban az esetben is, ha valamely szállítóját le kell cserélnie, vagy a szokásos szállítási útvonalon ellehetetlenül a szállítás. Ez nemcsak a források elérhetősége szempontjából fontos, de a ver-

senképes áraknak is előfeltétele. Mindaddig, amíg egy szállító nélkülözhetetlen ellátója egy országnak, a vevő kiszolgáltatott helyzetben van, így az eladónak lehetősége van az erőfölényes árazásra. Az alternatív kínálat elérhetősége hatékonyan korlátozza az eladó piaci erejét, és így megfizethető forráshoz juttatja az országot.

Ezzel szemben a megújuló energiák valamely formája praktikus mindennapi rendelkezésre áll, és a kiaknázásukhoz szükséges technológiák megvásárolhatók. Ezzel az energiához való hozzáférés hasonlatossá válik a feldolgozóipari tevékenységhez, ami – hatékonysági különbségekkel – praktikus bárhová telepíthető. Így az energiaátmenet révén az importált energiahordozóktól való függőség jelentősen mérséklődik.

A másik lényeges változás, hogy a piaci helyzet változásaira, az igények átalakulására sokkal gyorsabban lehet reagálni. Egy olaj- vagy földgázmező fejlesztése 5–10 év, egy fosszilis erőmű megépítése is legalább 5 évet vesz igénybe, így a közeljövő kínálatát az 5–10 évvel korábban meghozott beruházási döntések határozzák meg, akkor is, ha a kereslet lényegesen eltér attól, amit a beruházási döntések meghozatalának időpontjában feltételeztek. Ugyanakkor egy naperőmű telepítése vagy a fogyasztói rugalmassági képességek bevonása a villamosenergia-piacra néhány hónap alatt megvalósítható. Persze itt is szükség van hosszú távú tervezésre, hiszen egy nukleáris vagy vízerőmű megépítése szintén tíz évig tarthat, és a hálózatfejlesztés is csak sokkal lassabban kivitelezhető, de egy olyan helyzetben, amikor egy fosszilis energiahordozó ára sokszorosára emelkedik (mint pl. a földgáz ára az orosz–ukrán háború kitörése után), vagy egy korábbi forrás elérhetősége kiesik, a megújuló energiák gyors telepítése nagyon fontos alkalmazkodási lehetőséget biztosít ahhoz, hogy a fogyasztók megfizethető árú energiához jussanak.

Az is pozitív ellátásbiztonsági hozadék a megújuló termelésre alapozott energiafelhasználásnak, hogy kiszámíthatóbb árkörnyezetet teremt. Ahogy azt az elmúlt években megtapasztaltuk, a fosszilis energiahordozók ára rendkívül volatilis, 2020 és 2022 között a földgáz ára bejárta az 5–300 €/MWh tartományt, a kőolajé 5–100 USD/hordó tartományban alakult. E szélsőséges áringadozás meghaladta azt a mértéket, amire a korábbi időszak tapasztalatai alapján, gondos kockázatkezelés mellett fel lehetett készülni. Az egekbe szökő energiaárak számos termelőüzem leállítását eredményezték, számos energiaintenzív nagyvállalat szorult állami mentőővre a csőd elkerülése érdekében. Azokban az országokban, ahol a fogyasztók ellátása nem szabályozott áron, egyetemes szolgáltatás keretében történik, a háztartások élet-színvonalát is jelentősen rontotta a rezsi költségek többszörösére emelkedése.

Ahogy az elmúlt két évben megtapasztaltuk, az energiaárak szélsőséges ingadozása nemcsak egyéni, vállalati szinten befolyásolja a gazdaság működését, hanem jelentős makrogazdasági kockázatokkal is együtt jár. A nullához közelítő árak az exportáló országokban, míg a

2022-es energiaársokk a nagy importfüggőséggel jellemezhető országokban okozott stabilitási problémákat. Egyrészt jelentős fizetési mérlegromlást szenvedtek el, a fogyasztók támogatása jelentős költségvetésdeficit-növekedést okozott, a kialakuló ikerdeficit következtében megemelkedett az importfüggő országok kockázati primuma, az általános hozamemelkedés pedig hozzájárult ahhoz, hogy az ország gazdasági teljesítménye az energiaársokk közvetlen hatásán túlmenően is visszaessen (Kandracs 2023).

A fosszilis energiahordozókkal szemben a megújuló termelés sokkal kiszámíthatóbb költségszinten áll rendelkezésre, tehát a zöld átmenet mérsékli a fogyasztók kitétségét a szélsőséges energiaár-ingadozás hatásainak. A költségek megfizethető és tervezhető alakulását azért tudja támogatni a zöld energia, mert a megújuló energiatermelés legtöbb formája (a szél-, a nap- és a vízerőművek) olyan technológiákra épül, amelyek beruházási költsége magas, de ha megépültek, a termelés változó költsége már rendkívül alacsony a fosszilis technológiákhoz képest. Így a megújuló energia termelési költségét a tőkeköltés dominálja, ami elsősorban a beruházási összegtől és a kamatszinttől függ. Ha egy beruházás fix kamatozású forrásból valósul meg, akkor a megtermelt energia praktikusán változatlan költségszinten érhető el a berendezés teljes élettartama alatt, ezért is hajlandóak a megújuló beruházók fix árú (esetleg inflációval indexált árú) hosszú távú szerződéseket kötni. A megújulókat tehát egy kiszámítható áron elérhető forrást jelenthetnek a gazdaság szereplőinek, akár úgy, hogy energiaellátásuk egy részét saját maguk termelik meg (pl. háztartási, ipari és kereskedelmi felhasználók által telepített naperőművek), vagy olyan formában, hogy hosszú távú szerződést kötnek a megújuló beruházókkal (ún. PPA szerződések).

### 3. Új energiabiztonsági kihívások a zöld átállás időszakában

A zöld energetikai átállással együtt járó új ellátásbiztonsági kihívások a folyamat két legfőbb jellemzőjének kombinációjából fakadnak. E két jellemző az elektrifikáció, azaz az áramfelhasználás teljes primerenergia felhasználáson belüli jelentős aránynövekedése, és ezzel párhuzamosan az áramtermelésen és -felhasználáson belül az időjárásfüggő megújuló energiaforrások arányának masszív térnyerése a fosszilis energiahordozók<sup>1</sup> rovására.

Az elektrifikáció folyamata a Nemzeti Energia- és Klímatervezetere alapján (European Commission 2023a) Magyarországon azt jelenti, hogy 2050-re a villamosenergia összes primerenergia felhasználáson belüli aránya a 2020-as év 17%-áról 50%-ra nő. Ugyanebben az időszakban a hazai villamosenergia-termelésen belül az idő-

járársfüggő megújulók aránya 16%-ról (2022) 31%-ra nő, a fosszilizéké (szén és földgáz) 32%-ról 8%-ra csökken.

A fosszilis energiahordozók jól készletezhetőek és a mindenkori igényeknek megfelelően adagolhatóak. A hőerőművekben termelt villamosenergia mennyisége is mindig igazodik a kereslethez. A zsinórban üzemelő atomerőművek mellett a menetrendtartó és szabályozható szén- és földgáztüzelésű erőművek teljesítményének folyamatos finomhangolása biztosítja, hogy a kereslet és kínálat minden pillanatban egyensúlyban legyen, és ne alakuljanak ki frekvenciaingadozások a rendszerben. Így – ha a beruházási horizonton releváns kérdésektől eltekintünk – a fosszilis energiahordozók esetében alapvetően a havária eseményekre (extrém időjárás, infrastruktúra-kiesés, forráskiesés) kell felkészülni az ellátás zavartalan biztosítása érdekében.

Ezzel szemben viszont a megújuló energiakínálat változékonysága alapesetnek tekinthető. A nap-, illetve szélenergiát hasznosító erőművek időjárásfüggő megújuló energián alapuló berendezések: mind a két technológia csak azokban az időszakokban termel, és olyan volumenben, amikor és ahogy az adott erőforrás éppen rendelkezésre áll (Hernandez-Gençer 2021). A vízerőművek termelése is jelentős mértékben függ a vízhozamtól. Kivételt a zöld hidrogén, a biomassa, a biogáz, a geotermikus energia, illetve az abból előállított villamos energia jelenti, mely esetében jobban tervezhető a termelt mennyiség.

Az időjárásfüggés következtében a rendelkezésre álló megújuló energia egyfelől változékonyságot mutat különböző idődimenziókban, illetve magasabb bizonytalanság is jellemzi őket. A napsugárzás és a szélesebbesség alakulása egy napon, illetve egy éven belül ciklikus mintázatot követ, ennek megfelelően a nap- és szélerőművek termelésének lefutása is relatíve kiszámítható mintázatot mutat napi és szezonális szinten (Hernandez-Gençer 2021). Itt a fő probléma abból fakad, hogy ez a mintázat egyáltalán nincs szinkronban a fogyasztási igényekkel. Az esti órákban, napnyugta után a legmagasabb a villamosenergia-fogyasztás, és télen sokkal több energiát fogyasztunk, mint a nyári időszakokban (Vulic et al. 2023; IRENA 2020). A magyar éves villamosenergia-csúcsfogyasztás például az utóbbi években tipikusan téli és esti időszakra esett, amikor a szél- és napenergia hozzájárulása a kereslet kielégítéséhez nulla közeli volt. Ezért meg kell találni azokat a technológiai megoldásokat, amelyek áthidalják a termelés és a fogyasztás eltérő mintázatából fakadó különbségeket.

A változékonyság mellett nehezebb kiszámíthatóság is jellemzi ezeket a technológiákat: a váratlan, gyors lefutású változások az időjárási körülményekben (mint a felhők mozgása) hirtelen és meredek változást eredményezhetnek az időjárásfüggők termelésében (Babatunde et al. 2020).

Az időjárásfüggő áramtermelő kapacitások térnyerése a növekvő jelentőségű villamosenergia-ellátás biztonsága szempontjából két kritikus kérdést vet fel.

<sup>1</sup> A nukleárisenergia-felhasználás klímavédelmi szempontból kedvező, ezért a zöld energetikai átállást támogató technológiának minősül.

Az első, hogy az időjárásfüggő megújuló termelés nélküli időszakokban a villamosenergia-rendszer kínálati oldalán elegendő kapacitás áll-e rendelkezésre ahhoz, hogy a kereslet ezekben az időszakokban is maradéktalanul kielégíthető legyen hazai termelői kapacitások aktiválása és határkeresztező kereskedelem révén (rendszermegfelelés). Magyarország a határkeresztező hálózati összeköttetésekkel európai szinten az egyik legerősebben összekötött villamosenergia-rendszerrel rendelkezik, ez a kérdés ezért csak összeurópai elemzések révén válaszolható meg. Az átviteli társaságok európai szervezete rendszeresen végez ilyen jellegű elemzéseket a szervezethez tartozó rendszerek, köztük Magyarország vonatkozásában is (*ENTSO-E 2022a*). Ezek arra utalnak, hogy az összeurópai dekarbonizációs törekvések, ennek részeként az időjárásfüggő megújuló gyors térnyerése és a fosszilis kapacitások fokozódó kivonása miatt a 2030-ig terjedő időszakban a kapacitáshiányos időszakok kockázata jelentőssé válik a kontinensen és Magyarországon is.

Az időjárásfüggő áramtermelés térnyerésével kapcsolatos másik, rövid távú probléma rendszerintegrációs jellegű. A villamos hálózatokra csatlakoztatott időjárásfüggő termelői kapacitások terjedése ugyanis egyre nagyobb üzembiztonsági kihívás elé állítja az átviteli (TSO) és az elosztó (DSO) hálózatok üzemeltetőit.

Az alábbiakban a következő ellátásbiztonsági kihívásokkal és ezek megoldási irányvaival foglalkozunk részletesebben. Először bemutatjuk a villamosenergia-tárolás fejlődési trendjeit. Ez a legfontosabb előfeltétele annak, hogy egy tiszta zöld rendszerben összhangba lehessen hozni a kereslet és az aktuálisan megtermelhető zöldenergia mennyiségének egy napon belüli, napi és szezonálisan jelentkező eltéréseit. Ma még e technológiák üzleti alkalmazása épp csak elkezdett terjedni, így a legtöbb olyan országban, ahol gyorsan mélyül a megújuló energiák penetrációja, szűkösség alakul ki rugalmas, illetve tartalék-ként igénybe vehető kapacitásokból. A második alpontban bemutatjuk, hogy a megújuló terjedése hogyan növeli meg a rendszerirányítók (átviteli [TSO] és elosztási [DSO] hálózat üzemeltetők) rugalmassági igényét. A növekvő rugalmassági igények és a hosszú távú tárolás megoldatlansága alapján is látható, hogy az átmenet időszakában is rendelkezésre kell állni fosszilis kapacitásoknak. Ez azért kihívás, mert fosszilis erőforrások kitermelése, új szállítási útvonalak kialakítása, új fosszilis erőművek létesítése hosszú időt vesz igénybe, és jelentős tőkeberuházást igényel, miközben ezek fenntartása hosszú távon nem perspektivikus. E kérdést járja körül a 3.3. alpont. A hálózatüzemeltetés kihívásaira részben olyan megoldások születtek, amelyek szükségessé teszik mind a rendszerirányítók, mind a fogyasztók és termelők berendezéseinek digitalizálását. A távirányítás és digitalizáció azonban kiteszi e rendszereket a kiberbiztonsági kockázatoknak. Így a 3.4. alpontban a kiberbiztonság kérdéseit érintjük. Végül az utolsó alpontban a zöld energetikai technológiákkal kapcsolatos háttérpar és anyagok rendelkezésre állása, az importkitértség kérdéseit járjuk körül.

### 3.1. Tárolás

A fosszilis energiahordozók esetében az ellátásbiztonságot, a kereslet ingadozásából, illetve a kínálati sokkokból fakadó kihívások kezelését az útvonal és forrásdiverzifikáció mellett alapvetően a tárolás biztosítja.

A világon ma a legnagyobb arányban használt energiahordozó, a szén és a lignit esetében legkönnyebb a tárolás, amelynek az időtartama is szinte tetszőleges időre megoldható.

A kőolaj és a főbb kőolajtermékek készletezése a Nemzetközi Energia Ügynökség (IEA) tagországai, így Magyarország számára is kötelező. Magát a szervezetet is az 1973-as olajválságra válaszul hozták létre, amikor a Kőolaj-exportáló Országok Nemzetközi Szervezete (OPEC) által hirdetett kőolajembargó következtében Nyugat-Európa és az Egyesült Államok egyaránt olajellátási krízissel küzdött. Az Ügynökség Nemzetközi Energiaprogram Együttműködésével összhangban minden IEA-tagország köteles legalább 90 napi nettó olajimportnak megfelelő olajkészletet tartani, és készen kell állnia arra, hogy közösen reagáljon a globális olajpiacot érintő súlyos ellátási zavarokra (*IEA 2022*).

A földgázkészletek fenntartására nincs hasonlóan széles körű előírás, mert a földgázkészletezési képesség alapvetően geológiai adottságtól függ. A földgáz nagy mennyiségben történő tárolására ugyanis föld alatti geológiai formációkban, gyakran kimerült gázmezők igénybevételel kerül sor. Ugyanakkor számos olyan országban, ahol rendelkezésre állnak tárolók, a nemzeti szabályozás a kereskedők számára készletezési kötelezettségeket ír elő az ellátásbiztonság garantálása céljából. Olyan országok is vannak, amelyek úgynevezett stratégiai földgázkészletet tartanak a kereskedők által tároltatott készleteken felül az ellátásbiztonsági kockázatok további mérséklésére. Magyarországon a lakossági fogyasztókat egyetemes szolgáltatás keretében ellátó kereskedő számára van hatályos készletezési kötelezettség, illetve stratégiai földgáztároló, kapcsolódó szabályozás és intézményrendszer (Magyar Szénhidrogén Készletező Szövetség) is működik. Az orosz–ukrán háború kitörését követően az EU tárolófeltöltési kötelezettséget is előírt tagországai számára, amelyet a 2023/24-es gázévre is meghosszabbított: a tagországoknak legalább a fogyasztásuk 35%-ának megfelelő földgázt kell tárolniuk, vagy ha nincs ennyi tárolójuk, akkor a meglévő tárolói kapacitásokat kell 95%-ig feltölteniük. Emellett a kormányoknak rendszeresen kell ellátásbiztonsági számításokat végezniük, amelyben tesztelik, hogy egy-egy kulcs infrastruktúra-elem kiesése esetén is ellátható-e a fogyasztók a csúcsigényekkel rendelkező napokon. Ezek a tárolási előírások és kötelezettségek nagyban hozzájárultak ahhoz, hogy Európa földgázellátás-biztonsági esemény nélkül vészelve át azt, hogy korábbi legnagyobb földgáz-ellátója, Oroszország két év alatt az európai igények közel 25 százalékát kitevő vezetékes gázmennyiséget

vonjon ki az európai gázpiacról (2021 és 2023 között 120 milliárd köbméter).

A fosszilis energiához hasonló hosszú távú tárolási lehetősége a villamos energiának egyelőre nincs, jelenleg csak a rövid távú (egy-két hetes) tárolását tekinthetjük üzletileg érett technológiának. A rövid távú villamosenergia-tárolás hagyományos mechanikus technológiája a szivattyús tározós erőmű, ami alapvetően a csúc- és völgyidőszakok közötti igényeket simítja ki, és maximum csak néhány napra, esetleg egy hónapra tárolja kinetikus energia formájában a villamos energiát. A lendkeres vagy sűrített levegővel működő mechanikus villamosenergia-tárolási technológia is jól ismert, de az ily módon tárolható energiamennyiség a villamosenergia-rendszer szintjén elenyésző. Noha a villamos energiát lehet elektromos (kondenzátorok, szuperkondenzátorok) vagy hő formában is tárolni (például ha napenergiával olajat fűtünk fel), az elmúlt évek igazi áttörést az elektrokémiai villamosenergia-tárolás, vagyis az akkumulátoros technológia terén hoztak. A többféle, ma is alkalmazott akkumulátor kémia (redox flow, nátrium-kén, lítium-ionos technológiák) közül jelenleg a legnépszerűbb és legszélesebb körben alkalmazott megoldások a lítium-ion akkumulátorok. A lítium-ion akkumulátorok nagy energiasűrűséggel, nagy kisütési teljesítménnyel és hosszú élettartammal rendelkező, villamosenergia-tárolásra alkalmas berendezések. A lítiumot leginkább pozitív elektród anyagként használják az akkumulátorban, mivel könnyű a súlya, nagy az energiasűrűsége, alacsony önkisülési sebességgel, nagy hőmérsékleti tartománnyal és kiváló ciklusidővel (élettartammal) rendelkezik.

Miközben a korszerű akkumulátorok többféle szerepet is be tudnak tölteni a villamosenergia-rendszerben, a néhány másodperces frekvenciaingadozások ellensúlyozásától kezdve a napon belüli, és a napok közötti kereslet/kínalati ingadozások kisimításáig, az elmúlt évek fejlesztéseinek és az akkugyártás skáláhozadékaának köszönhetően az általuk tárolható villamosenergia egységköltsége jelentősen mérséklődött (*Imre-Kummer 2021; Kun 2023*). A Bloomberg adatai alapján egy lítium-ion akupakk egységköltsége 2013 és 2023 között 780 USD/kWh-ról 139 USD/kWh-ra csökkent (*Bloomberg NEF 2023*).

Összességében azt mondhatjuk, hogy az akkumulátoros tárolók széles körű alkalmazása a zöld átmenettel együtt járó ellátásbiztonsági kihívás széles körére képes választ adni. A problémát inkább az jelenti, hogy a tárolói technológia még kevésbé elterjedt, a folyamatosan növekvő igényekhez képest egyelőre csak szűkös kapacitások állnak rendelkezésre. Ugyanakkor a gyártási technológiák egyre hatékonyabbá válnak, a tömegessé váló termeléssel az akkumulátorok ára csökken, így várható, hogy felgyorsulnak a tároló beruházások. Több európai országban, köztük Magyarországon is tároló támogatási programot hirdettek a kormányok, hogy minél szélesebb körben lehetővé tegyék az akkumulátoros tárolók alkalmazását.

A zöld energetikai átállás fő problémáját az jelenti, hogy ennél hosszabb horizontra jelenleg még nem áll rendelkezésre az üzleti alkalmazásra érett technológia. A jövőben a hosszabb távú villamosenergia-tárolásban fontos szerepet tölthet be a zöld hidrogén, melyet elektrolizáló berendezésben megújuló villamos energia felhasználásával állítanak elő.

A zöld hidrogén fogyasztókhöz történő eljuttatása azonban többszörös kihívást jelent: egyrészt jelenleg nagyon ritkán keletkezik olyan mennyiségű zöldáram-felesleg, amire ne lenne áram formájában is fogyasztói igény, évente csak néhány órában fordulnak elő negatív villamosenergia-árak, így ha valóban csak a felesleget szeretnénk eltárolni, olyan alacsony kihasználtsággal üzemelnének az elektrolizálók, amely mellett nem biztosítható a megtérülés. Egyelőre csak olyan helyeken lehet érdemes üzleti alapon elektrolizálót telepíteni, ahol a hálózat szűkössége miatt nincs lehetőség az olcsón megtermelt villamos energia fogyasztókhöz való eljuttatására.

Ebben az esetben is kihívást jelent a zöld hidrogén tárolása és eljuttatása a fogyasztókhöz. A hidrogént ma tartályokban tárolják és szállítják, ami limitálja a szállítható mennyiséget. Nagyobb volumen esetén a csővezetékes szállítás jöhet szóba, ami még nem áll rendelkezésre, és a hidrogén a metánnál sokkal kisebb molekulamérete miatt a meglévő földgázrendszer is csak nagyon korlátozottan használható hidrogéntárolás és -szállítás céljára. Az egységes EU-megállapodás szerint a meglévő földgáz szállítórendszerbe két százaléknyi hidrogént lehet betáplálni, és a meglévő vezetékek teljes átalakítása hidrogénvezetékékké is jelentős költségekkel jár (bár lényegesen olcsóbb, mint új vezeték építése). Az EU koordinálja a European Hydrogen Backbone projekt keretében az európai hidrogén csővezetékes szállítórendszer kialakítását, amihez a magyar földgázszállító FGSZ rendszere is csatlakozni fog (*EHB 2024*). Mindenesetre az elkövetkező néhány évben a zöld hidrogén felhasználása elsősorban olyan területeken várható, ahol nagyon közel van egymáshoz a termelő és a fogyasztó, és a két létesítmény egymással egy termékvezetékkel összeköthető.

Amennyiben a szállítás megoldható, a tárolást is biztosítani kell. Arra van már tapasztalat, hogy hidrogén az úgynevezett sókavernás gáztárolókban tárolható, de az európai tárolók jelentős része, köztük a magyar tárolók sem ebbe a kategóriába tartoznak. Jelenleg folynak a kutatások, hogy kimerült gázmezők alkalmasak-e a hidrogén tárolására. A Magyar Földgáztároló Zrt. részt vesz többek között az Akvamarin, illetve az EUH2Stars projekteknél.

A zöld hidrogénnel kapcsolatos infrastruktúra-problémák nem jelentkeznek akkor, ha a zöld hidrogénből metanizációval zöld metánmolekulát állítunk elő. Ez a jelenlegi infrastruktúrával szállítható, tárolható. A magas költségek és az alacsony hatékonyság miatt azonban csak nagyon hosszú távon várható a metanizáció elterjedése. Rövid távon azoknak a felhasználóknak a kereslete élvez prioritást, akik ipari folyamatokban, folyamatosan hasz-

nálják a hidrogént.<sup>2</sup> Így a villamos energia zöld hidrogén vagy szintetikus metán formájában való tárolása villamos energia visszanyerése céljából csak nagyon hosszú távon várható.

### 3.2. Hálózatüzemeltetési kihívások

A villamosenergia-hálózat stabil működéséhez szigorú műszaki előírások szerint kell üzemelnie, ezt a villamos energia sajátos tulajdonságai követelik meg: az egyik sarkalatos jellemző a feszültség szint, illetve a frekvencia szint, amelyeknek minden pillanatban egy biztonságos határértéken belül kell maradnia (Horváth 2017). Ahhoz, hogy fenn tudjuk tartani a feszültség-, illetve a frekvenciaszintet, ahhoz minden pillanatban egyensúlyban kell lennie a hálózaton a termelés és a fogyasztás mértékének (Kácsor–Paizs–Kerekes 2022). A zöld átmenet időszakában ennek biztosításához egyre több rugalmas, azaz gyors teljesítményváltoztatásra képes egységre (kapacitásra) van szükség a rendszerben.

A rugalmas kapacitások iránti igény több forrásból táplálkozik, a zöld átmenet során egyszerre nő a nagykereskedelmi piacon, a nagyfeszültségű átviteli hálózaton és az elosztóhálózaton jelentkező, gyors fel- és leterhelési igény.

A nagykereskedelmi piac rugalmas kapacitások iránti igényének növekedése abból fakad, hogy megváltozik az itt megjelenő villamosenergia-kereslet mintázata. A hagyományos felépítésű villamosenergia-rendszerekben a fogyasztás napon belüli lefutása kiszámíthatóan alakult. Éjszaka, a völgyidőszakban alacsony volt a kereslet, nappal pedig magas, kisebb fogyasztási csúccsal a napnyugtát követő órákban. A két időszak közötti átmenet pedig fokozatosan, kiszámítható módon történt. Ez a terhelési görbe kiszámítható volt, a termelési egységek könnyen le tudták azt követni: mivel nem jelentkeztek nagy volumenű, hirtelen változások a fogyasztás mértékében, így nem volt szükség gyors teljesítményváltoztatásra (ramping requirement). A naperóművek belépésével az árampiac keresleti és kínálati oldala is átalakul. A naperóművi termelés a napfelkeltevel kezdődik meg, a nap közepén van a termelési csúcs, majd napnyugtával teljesen megszűnik. Az öntermelés (háztartási méretű kiseróművek, ipari üzemek saját telephelyén lévő „óra mögötti” létesítményei) egyre nagyobb jelentősége miatt a hálózatról történő vételezés (ami megegyezik a kereskedők által értékesített villamosenergia-mennyiséggel) mintázatából a korábban jellemző hosszú csúcs és völgyidőszakok eltűnnek, és egy ún. kacsa görbe alakzat alakul ki, melyet egy reggeli, és egy rendkívül meredek emelkedést követő esti csúcskereslet jellemez, melyeket az éjszakai és déli órákat

jellemző alacsony terhelési időszakok váltanak. Ennek lekövetéséhez a korábbinál lényegesen több rugalmas kapacitásra, azaz gyors teljesítményváltoztatásra képes egységre van szükség a rendszerben (IRENA 2020).

Az átviteli rendszerirányító, amely Magyarországon a MAVIR, felelős a frekvencia stabilitásáért. A frekvencia megadott határok között tartása akkor biztosítható, ha a hálózatba betáplált és onnan vételezett villamos energia mennyisége minden időpillanatban egyensúlyban van. A termelés és a fogyasztás mértékének folyamatos egyensúlyban tartása kizárólag központi irányítás mellett lehetséges. A rendszeregyensúly biztosítása érdekében a hálózatra csatlakozó minden termelő és fogyasztó egységnek előzetesen menetrendet kell készítenie: minden nap minden negyedórájára meg kell adni a tervezett betáplálási vagy vételezési mennyiséget. A menetrendezés megkönnyítése érdekében a szereplők mérlegkörökbe szerveződnek, amelyek együttes menetrendjének ki-egyenlítettnek kell lennie. A menetrendek pontos betartása azonban nem mindig lehetséges, nem várt események, például egy termelőegység meghibásodása vagy időjárás körülmények változásának hatására eltérés alakulhat ki a vételezés és a betáplálás mennyisége között. Ekkor a rendszerirányító az ügynevezett szabályozási tartalékokat alkalmazza az egyensúly helyreállítására. A szabályozási tartalékok olyan kapacitások a hálózaton, amelyek nem szükségesek az aktuális valós fogyasztás fedezéséhez. Jellemzően ide tartoznak a rendelkezésre álló, szabályozható termelési egységek, illetve bizonyos rugalmas fogyasztói berendezések is (Kácsor–Paizs–Kerekes 2022).

A hagyományos villamosenergia-rendszerekben, amelyekben nincsenek jelen szignifikáns arányban az időjárásfüggő megújuló termelő kapacitások, magas a rendszer inerciája, és ezzel egy időben alacsony a frekvenciaszint-ingadozás mértéke. Egy ilyen rendszerben jellemző a szabályozási tartalék méretezését a rendszer jellemző terhelésének egy bizonyos százaléka vagy a hálózathoz csatlakozó legnagyobb termelőegység kapacitása szerint számították ki. Ehhez képest, ahogy növekszik az időjárásfüggő megújuló termelők aránya, úgy csökken a rendszer inerciája, és fokozatosan növekszik a frekvenciaingadozás mértéke is, mivel az időjárásfüggő nap- és széltermelő egységek termelése nem folytonos, korlátozottan szabályozható, és a hagyományos hőerőművekhez képest nehezebben jelezhető előre (IRENA 2020). Így a növekvő megújuló penetráció mellett jelentősen megnő a szabályozási kapacitások iránti igény. Ha erre nem reagál elég gyorsan a szabályozási kapacitások kínálata, szűkösség alakulhat ki a piacon.

Az időjárásfüggő termelőegységek az elosztói hálózaton is problémákat okozhatnak, mely elsősorban feszültségingadozás formájában jelentkeznek. Feszültségprobléma alapvetően a termelés és a fogyasztás fizikai távolsága miatt alakul ki, elsősorban az elosztói hálózaton fordul elő, így a DSO felelőssége ennek kezelése.

<sup>2</sup> A MOL például az üzemanyaggyártáshoz nagy mennyiségű hidrogént használ fel, amelyet jelenleg még földgáz felhasználásával állít elő, a hidrogént pedig tárolás nélkül, közvetlenül juttatja a termelésbe. Az első jelentős hazai zöld hidrogén előállító elektrolizáló beruházás a MOL szálhalombattai telephelyén valósul meg.

A hagyományos villamosenergia-rendszerek centralizáltak, sugarasan épülnek fel, a betáplálási ponttól a vonal vége felé folyamatosan esik a feszültség szintje: az átviteli hálózaton, amely a termelőegységeket és a csomópontokat, állomásokat (melyek a hálózat többi részével állnak összeköttetésben) köti össze, nagyfeszültségű vezetékeken történik az áram szállítása (750-400-220 kV), mert minél magasabb a feszültség, annál kisebb az áramerősség, tehát ekkor a legkisebb a szállítás közben felmerülő hálózati veszteségek mértéke.

Az elosztóhálózaton már alacsonyabb a feszültség szintje, mert ez a csomópontokat a fogyasztókkal köti össze. A szállításhoz képest itt előtérbe kerülnek a biztonsági szempontok, így a hálózatnak ezen a részén a kisebb feszültségszint a célravezető. A feszültségszint csökkentése a hálózaton lévő transzformátor állomásokon zajlik, először nagyról közepes, majd kis feszültségszintre. Minden esetben a feszültség szintjének egy biztonságos határértéken belül kell maradnia, ami az adott hálózatüzemeltető felelőssége.

Egy ilyen felépítésű rendszerben jelentős változást eredményez az elosztott, kis léptékű termelőegységek megjelenése, kapacitásuk gyors bővülése. Az úgynevezett háztartási méretű kiserőművek (HMKE)<sup>3</sup> a vonal végén megemelik a feszültség szintjét. A déli órákban, amikor a HMKE-k csúcstermelése jelentkezik, és nincs elegendő helyi fogyasztás, ami azt felvegye, a feszültség-emelkedés olyan magas is lehet, hogy az kizozdul a biztonságos értékek sávjából. Jelenleg erre a termelőegységek leszályozásának gyakorlatát alkalmazzák: ha a feszültség szintje elér egy bizonyos értéket, akkor a HMKE invertere lekapcsol (Bereczki 2018). Ennél sokkal hatékonyabb megoldást jelentene, ha lennének olyan lokális fogyasztók vagy tárolók, amelyek hasznosítani tudnák az ilyenkor megtermelhető áramot.

Az időjárásfüggő megújulók az úgynevezett hálózati szűkületi problémák gyakoriságát és intenzitását is növelik. Szűkületi probléma a termelés és a fogyasztás közötti fizikai távolság nyomán alakul ki, ha a két pont között nincs elég hálózati kapacitás, és a leadott menetredek alapján egyes hálózati elemeken túlterhelődés alakulna ki. Rövid távon jellemzően ennek a problémának a megoldására is a megújulók termelésének leszályozását alkalmazzák, amit más, a hálózat szempontjából kedvezőbb földrajzi pozícióban lévő, gyakran fosszilis erőművek elindítása ellensúlyoz annak érdekében, hogy a kereslet és kínálat összhangja fennmaradjon.

Jól szemlélteti ezt a problémát Németország esete, ahol a szárazföldi szél-turbinák legnagyobb része, a tengeri szél-erőművi kapacitásoknak pedig a 100%-a az ország északi részén található, míg a nagy léptékű ipari egységek fogyasztása délen jelentkezik. Emiatt gyakran volt tapasztalható szűkületi probléma a déli és északi te-

riületeket összekötő átviteli hálózaton. A rendszerirányító a probléma kezelésére a szél-erőművek leszályozása mellett jellemzően a déli területeken elhelyezkedő fosszilis erőművek felszályozását alkalmazta (IRENA 2020).

A kereslet kacska görbe mintázata, a frekvenciaszabályozás, a feszültségszabályozás és a szűkületkezelés mind olyan kihívások, amelyek növelik a megújuló energiafelhasználásra egyre nagyobb mértékben támaszkodó rendszerek igényét a rugalmas kapacitások iránt. Pozitív fejlemény, hogy az igények növekedésével párhuzamosan egyre több kapacitás is belép a piacra. Hagyományosan a fosszilis erőművek és a vízerőművek biztosították a rugalmassági szolgáltatásokat. A szabályozási kapacitások árának emelkedése és a digitalizáció eredményeként a fogyasztók és a kisebb termelőegységek összefogásával kialakított aggregátorok is megjelentek mint rugalmassági szolgáltatók. Sőt maguk a megújulók is egyre nagyobb mértékben használják ki azt a képességüket, hogy az inverterük távszályozásával változtatható a hálózatra kiadott villamosenergia volumene. E piaci szegmens új szereplői az akkumulátoros tárolók is, melyek a termelés és fogyasztás napon belüli átrendezésére, frekvenciaszabályozásra, a lokális túlterhelődés elkerülésére egyaránt alkalmasak. A fosszilis (elsősorban szenes-lignites) erőművek bezárása azonban jelentősen csökkenti a rugalmas kapacitások mennyiségét, így az európai piacokat az új szereplők piacra lépése ellenére is többségében a rugalmas kapacitások szűkössége jellemzi.

Erre reagálva az EU új villamosenergia-piaci szabályozási csomagja, amelyről 2023 decemberében politikai konszenzus született, minden tagország számára kötelezővé teszi egy rendszeres rugalmassági igényfelmérés készítését, és ha ez szűkösséget jelez, lehetőséget teremt a nem fosszilis rugalmas eszközök állami támogatására.

### 3.3. A fosszilis kapacitások fenntartásának kihívásai

Ahogy azt a fentiek is alátámasztják, a zöld átállás időszakában fenn kell tartani a fosszilis erőforrások elégséges kínálatát és a fosszilis technológiájú eszközök számottevő részét.

Ennek egyik oka az, hogy a fogyasztók eszközparkja, készülékei csak lassan cserélődnek le, az elektrifikáció évente néhány százaléknyi részt tud elhódítani a fosszilis energiafelhasználásból. Vannak olyan területek, ahol az elektrifikáció nem is jelent valós alternatívát, például az extra magas hőigényű ipari folyamatokban, teherszállításban szükség van a nagy energiasűrűségekre. Így a fosszilis energiahordozóknak elsősorban a zöld gázok jelentik majd az alternatíváját, amelyek piacra lépése fáziskészen van a megújuló áramtermeléshez képest. Ha a valós keresletcsökkenéshez képest túl gyorsan csökkenne a fosszilis energiahordozók kínálata, az rendkívüli áringadozásokat eredményezne, és jelentős veszteség érné azokat a fogyasztókat, amelyek függenek a fosszilis energiahordozóktól.

<sup>3</sup> A cikk írásakor Magyarországon már negyedmillió körüli HMKE berendezés kapcsolódik a közcélú villamosenergia-hálózathoz.

A másik alapvető ok, ami miatt szükség van a fosszilis kapacitásokra, az az, hogy a villamos energia tárolása jelenleg napon belül, és napok közötti időhorizonton életképes, a hosszabb távú, szezonális villamosenergia-tárolás még gyerekcipőben jár. Így kizárólag megújulóakra alapozva nem lehet biztosítani az ellátásbiztonságot, szükség van olyan tartalék eszközökre és erőforrásokra, amelyek akkor tudnak piacra lépni, amikor szűkös a megújuló kínálat, mint például a téli fűtési időszakban, amikor az elektrifikáció folyamatosan növeli a villamosenergia-keresletet, miközben a megújuló alapú termelés lényegesen alacsonyabb, mint nyáron.

Ezen eszközök üzemben tartása, különösen a kifutó eszközpark cseréje egyre nehezebbé válik a megújuló penetráció mélyülésével. Ugyanis egyre ritkábban van szükség ezekre az eszközökre, csökken a kapacitások kihasználtsága. Jelenleg a meglévő eszközöket még eltartja a rugalmas kapacitások iránti magas kereslet, de az új piaci szereplők folyamatos piacra lépése miatt nagyon nehéz előre jelezni, hogy ebből mekkora bevétel marad meg egy új eszköz működési horizontján, azaz az öt év múlva kezdődő két évtizedben. Emiatt fosszilis eszközökbe egyre kevésbé ruháznak be a befektetők, sőt egyre nehezebben tudnak megszületni a meglévő eszközök szükséges nagyfelújításáról hozott döntések.

A problémát tetézi, hogy a pénzügyi intézményrendszer is figyel a fenntarthatósági kockázatokra, és törekszik olyan portfólió kialakítására, amelyben egyre alacsonyabbak a fenntarthatósági kockázatok. Így számos pénzügyi befektetési alap dönt úgy, hogy nem fektet be fosszilis tevékenységbe, és banki forrásokhoz is egyre nehezebben és felár mellett lehet jutni fosszilis beruházások finanszírozásához.

A fosszilis erőforrások kitermeléséről a piac gondoskodik. Az látható, hogy kőolaj- és földgáz-kitermelésben a legdrágább mélytengeri gigaprojektek iránti érdeklődés elapadt. Ugyanakkor a folyamatos kínálatot biztosítja, hogy az olaj- és földgázkészletek jelentős része olyan országokban van, amelyek kevésbé diverzifikáltak, és fő bevételi forrást jelent számukra az energiahordozók exportja. A legtöbb ilyen forrás relatíve alacsony költség-szinten áll rendelkezésre. Emellett az elmúlt évtizedben egyre inkább elterjedt az ún. repesztéses (shale) technológia, ami magas költségű, viszont gyorsan termelésbe fogható. Így abban az esetben, ha az olaj ára elkezd emelkedni, felpörögnek a shale olaj- és földgázkitermelők, és bővül a kínálat.

Az infrastruktúra-beruházások esetében azonban szükség van kormányzati koordinációra, sőt intervencióra is. Jó példa erre a 2022–23-as év, amikor az orosz csővezetékes gáz jelentős részének elapadása hirtelen új infrastruktúra-beruházásokat tett szükségessé Európában. Az új LNG terminálok és földgáz csővezetékek esetében nem alkalmazták a szokásos piaci folyamatot, ami csak akkor engedi a vezeték megépítését, ha vannak olyan vevők, amelyek hosszú távon (10–15 évre) elköteleződnek az új infrastruktúra használat mellett, hanem

jelentős állami támogatásból épültek a projektek, a fennmaradó rész pedig társadalmasításra került (azaz a fogyasztók fizetik meg a tarifában).

A villamosenergia-szektorban is egyre jobban terjednek az eszközök fenntartására irányuló intervenciók. Egyre több országban vezetnek be olyan, a fogyasztók által finanszírozott díjjelemt, amivel nem az erőmű termelését, hanem a rendelkezésre állását honorálják. Leggyakrabban kapacitásmechanizmusnak hívják ezeket a támogatási konstrukciókat, melynek keretében a meglévő erőművek jellemzően 1 évre, az új erőművek 10–15 évre nyernek olyan fix bevételt, amely mellett alacsony kapacitáskihasználtság mellett is életképesek. A kapacitásdíjban részesülő erőműveknek folyamatosan rendelkezésre kell állniuk, hogy tartalék kapacitásként tudjanak működni akkor, ha nincs elegendő megújuló energiatermelés, és rugalmassági képességeiket fel kell ajánlaniuk a rendszerirányító számára, hogy a megújuló energiatermelés ingadozásainak kisimításához, a fogyasztás és a termelés egyensúlyba hozásához hozzájáruljanak. A kapacitásmechanizmusok jellemzően technológiasemlegesek, így az akkumulátoros tárolókba történő beruházásokat is segítik.

### 3.4. Kiberbiztonsági kihívások

Az energiaátmenet együtt jár a digitalizációval, ami azt jelenti, hogy a hagyományos technológiák egyre inkább kapcsolódnak modern digitális technológiákhoz, és különösen a hálózatüzemeltetésben egyre nagyobb szerepet kapnak a digitális megoldások. Ez számtalan előnnyel jár, lehetővé teszi a rendszer sokkal precízebb szabályozását, növeli a hálózat kapacitását, és lehetővé teszi, hogy a termelők és a fogyasztók sokkal szélesebb köre váljon aktív használóvá. A digitális megoldások azonban kiteszik a rendszert a kibertámadásoknak (*Bordoff–O’Sullivan 2023*), ami a rendszer működésébe történő beavatkozás esetén az energiaellátás biztonságát veszélyezteti, másfelől a fogyasztói adatokhoz való illegális hozzáférést tesz lehetővé.

Az energiaszektorban más területekhez képest különös kihívások jelentkeznek a kibertámadások elleni védekezésben. Ennek egyik forrása az, hogy nagyon sok automatizált rendszer működik, ahol praktikus az azonnali beavatkozásra van szükség például azért, hogy a villamosenergia-frekvencia a biztonságos működéshez szükséges szűk tartományon belül maradjon. Ilyen folyamatok esetében nincs idő a döntések hitelesítésére, a jogosultságok verifikálására. A másik sektorspecifikus kihívást az jelenti, hogy a hálózatok – bár nemzeti rendszerüzemeltetők működtetik – nemzetközi összeköttetésben működnek. Egy országban bekövetkező áramkimaradás országok egész sorában okozhat frekvencia-csökkenést, vagy akár áramkimaradást. Végül az is energiaszektor-specifikus kihívást jelent, hogy a rendszer egésze különböző korú egységekből áll. Egy hálózatba kapcsolódnak az analóg technológiával működtetett 50–60 éves szén- és nukleáris erőművek, a 20–30 éves



gázerőművek és a legmodernebb digitális technológiával felszerelt eszközök.

Az energiaszektorban jelentkező kibertámadásoknak való kitettség mérséklése érdekében az EU 2019-ben elfogadott egy szektorspecifikus ajánlást. Ezen túlmenően a szintén 2019-ben elfogadott Tiszta Energia Csomag (*European Commission 2019*) is külön foglalkozik az energiabiztonság kérdéseivel. A csomag részeként került elfogadásra a Villamosenergia ágazati kockázatokra való felkészülésről (risk preparedness EU 2019/941) szóló EU rendelet, amely megköveteli a tagállamoktól, hogy kockázatértékelési terveiknek legyen része a kiberbiztonsági felkészülés (*EUR-Lex 2019*). A csomag Energia Rendeletben<sup>4</sup> (EU 2019/943) foglalt másik előírása alapján készült el az ún. Kiberbiztonsági Network Code, amely egységes előírásokat és szabványt határoz meg a határokon átnyúló villamosenergia-áramlás kiberbiztonságára vonatkozóan (*ENTSO-E 2022b*). Tartalmazza a kiberkockázat értékelésére, a közös minimumkövetelményekre, a termékek és szolgáltatások kiberbiztonsági tanúsítására, a felügyeletre, a jelentéstételre és a válságkezelésre vonatkozó szabályokat. A szabályzat meghatározza a különböző érdekelt felek szerepét és felelősségét az egyes tevékenységek tekintetében.

### 3.5. A zöld energetikai átállás kritikus technológiáival és az azokhoz szükséges alapanyagokkal kapcsolatos ellátásbiztonsági kockázatok

Az 1. részben a zöld energetikai átállás ellátásbiztonsági előnyei között említettük, hogy a mindenütt rendelkezésre álló megújuló energiák kiaknázásához szükséges technológiák megvásárolhatók, könnyen telepíthetők, és ezáltal az importált, döntően fosszilis energiahordozóktól való függőség jelentősen mérsékelhető. Mindez helytálló állítás egy zökkenőmentesen működő globális gazdaság esetén.

Ugyanakkor a jelen évtizedünk elejét jellemző válságok (Covid19, orosz–ukrán háború, közel-keleti válság) és a globális nagyhatalmak kiéleződött rivalizálása rámutat a kritikus technológiák, s ezen belül a fosszilis korszak utáni, tiszta energetikai technológiák előállításához szükséges ellátási láncok sérülékenységre (*European Commission 2023b*). A szóban forgó technológiák főbb kategóriái az alábbiak:

- fotovoltaikus és naphőenergia-hasznosító technológiák,
- elektrolizátorok és üzemanyagcellák,
- szárazföldi szélenergia és tengeri megújuló energiaforrásokat hasznosító technológiák,
- fenntartható biogáz/biometán,
- akkumulátorok és energiátárolás,

- szén-dioxid-leválasztás és -tárolás,
- hőszivattyúk és geotermikusenergia-technológiák,
- energiahálózati technológiák.

A zöld energetikai átállással kapcsolatos ellátásbiztonsági kockázat, hogy a fenti eszközök és technológiák gyártásához nagy és gyorsan növekvő mennyiségű kritikus nyersanyagra (réz, lítium, nikkel, kobalt, ritka földfémek) van szükség (*IEA 2021*). Ugyanakkor jelentős globális különbségek mutatkoznak abban, hogy a meghatározó zöld energetikai technológiák előállítása és az azokhoz szükséges alapanyagok terén ki milyen adottságokkal és képességekkel rendelkezik. Kína pozíciója kiemelkedően erős (*Waldron 2008; IEA 2023*). Mindez felerősíti az egymással versengő fejlett gazdasági régiók azon törekvését, hogy az ellátási láncok minél nagyobb részét maguk kontrollálhassák.

2022-ben elindult egy olyan folyamat, amelyet zöld energetikai protekcionizmusnak nevezhetünk. Az Egyesült Államok az ún. inflációcsökkentési törvény elfogadásával (*Department of Energy, 2023*), ennek részeként 360 milliárd dollárnyi kormányzati támogatással igyekszik elérni, hogy a zöld technológiák alkalmazása és gyártása a lehető legnagyobb mértékben az USA területén valósuljon meg. Hasonló úton jár Kanada. Az EU részben erre válaszul 2023-ban kezdeményezte a nettó zéró kibocsátású ipar<sup>5</sup> megteremtését, valamint a legfontosabb zöld energetikai technológiák előállításához szükséges alapanyagokkal kapcsolatos európai importfüggés mérséklését (Critical Raw Materials Act) célzó közösségi szabályok megalkotását és az ezt szolgáló finanszírozási lehetőségek megteremtését (*European Commission 2023c*). Éles globális verseny zajlik tehát a meghatározó tiszta energetikai technológiák előállításához szükséges alapanyagokért, gyártási kapacitásokért és tudásért.

A korszerű, lítium-ion-alapú akkumulátoripari értékláncre is jellemzőek a fenti ellátásbiztonsági kockázatok. Az Európai Akkumulátor Szövetség friss becslése szerint az EU 2030-ban várhatóan az akkumulátorgyártás kritikus alapanyagai terén tudja majd legkevesebé ellátni magát: lítiumból, kobaltból és nikkeltől a várható igények néhány százalékát tudja csak saját kitermelésből biztosítani, míg mangánból és grafitból teljes egészében importra szorul majd. Egyéb akkumulátor alapanyagokból, finomított lítiumból és katódanyagokból a becsült 1000 GWh uniós akkumulátorigényhez szükséges mennyiség 5-20%-át, anódból 1-2%-át, akkumulátor cellából az igények 50-60%-át tudja majd az EU produkálni. A hálózati tárolók és elektromos járművek, valamint egyéb akkumulátoros alkalmazások terén az uniós gyártókapacitások megközelítik a várható igényeket. Az akkumulátorok környezetbarát, a körforgásos gazdaság elveinek megfelelő életciklusát biztosító, s egyben az akkumulátor alapanyag importfüggést csökkenteni képes újrahasznosító

<sup>4</sup> Energia Rendelet, Regulation - 2019/943 - EN - EUR-Lex (europa.eu).

<sup>5</sup> Az Európai Bizottság 2023. március 16-án kezdeményezte a Net Zero Industry Act (NZIA) megalkotását.

kapacitásból viszont a szükségesnek várhatóan csak a felével fog rendelkezni az évtized végére az Unió (*Sekkenes 2023*).

## Köszönetnyilvánítás

*A cikk a 2021-2.1.1.-EK-2021-00002 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2021-2.1.1.-EK pályázati program finanszírozásában valósult meg.*

## Irodalomjegyzék

- Babatunde, O. M., Munda, J. L., & Hamam, Y. (2020) Power system flexibility: a review. *Energy Reports*, Vol. 6. No. 2. pp. 101–106. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719309242> (Letöltés ideje: 2024. 03. 26.)
- Berezki B. (2018) Lítiumion-akkumulátoros energiáról rendszer alkalmazása ipari környezetben. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, TDK-dolgozat. <http://tdk.bme.hu/VIK/DownloadPaper/Litiumionakkumulatoros-energiatarolo1> (Letöltés ideje: 2024. 03. 25.)
- Bloomberg NEF (2023) Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh BloombergNEF November, 2023. <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/> (Letöltés ideje: 2024. 03. 25.)
- Bordoff, J. & O’Sullivan, M. (2023) Why we need to rethink energy security in the transition to net-zero. *World Economic Forum*, január 2023. <https://www.weforum.org/agenda/2023/01/davos23-rethink-energy-security-transition-net-zero/> (Letöltés ideje: 2024. 03. 26.)
- Department of Energy (2023) Inflation Reduction Act of 2022 Loan Programs Office, energy.gov Szeptember, 2023. <https://www.energy.gov/lpo/inflation-reduction-act-2022> (Letöltés ideje: 2024. 03. 25.)
- EA (2022) Oil Security Policy. <https://www.iea.org/reports/oil-security-policy> (Letöltés ideje: 2024.03.25.)
- EHB (2024) The European Hydrogen Backbone (EHB) initiative ehb.eu 2024. <https://ehb.eu/> (Letöltés ideje: 2024. 03. 23.)
- ENTSO-E (2022a) European Resource Adequacy Assessment. <https://www.entsoe.eu/outlooks/eraa/2022/> (Letöltés ideje: 2024. 03. 25.)
- ENTSO-E (2022b) Network Code for cybersecurity aspects of cross-border electricity flows. entsoe.eu, január, 2022. [https://eepublic-downloads.entsoe.eu/clean-documents/Network%20codes%20documents/NC%20CS/220114\\_NCCS\\_Legal\\_Text.pdf](https://eepublic-downloads.entsoe.eu/clean-documents/Network%20codes%20documents/NC%20CS/220114_NCCS_Legal_Text.pdf) (Letöltés ideje: 2024. 03. 26.)
- EUR-Lex (2019) Regulation (EU) 2019/941 of the European Parliament and the Council of 5 June 2019 on risk preparedness in the electricity sector and repealing Directive 2005/89/EC. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/941/oj> Letöltés ideje: 2024. 03. 26.
- European Commission (2019) Clean Energy for all Europeans package energy.ec.europa.eu. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en) (Letöltés ideje: 2024. 03. 26.)
- European Commission (2023a) Hungary – Draft Update NECP 2021-2030 commission.europa.eu szeptember, 2023. [https://commission.europa.eu/publications/hungary-draft-updated-necp-2021-2030\\_en](https://commission.europa.eu/publications/hungary-draft-updated-necp-2021-2030_en) (Letöltés ideje: 2024. 03. 26.)
- European Commission (2023b) Joint Statement by the EU and the US following the 10th EU-US Energy Council. ec.europa.eu, április, 2023. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/statement\\_23\\_2121](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/statement_23_2121) (Letöltés ideje: 2024. 03. 25.)
- European Commission (2023c) State aid: Commission adopts Temporary Crisis and Transition Framework to further support transition towards net-zero economy. ec.europa.eu, Március, 2023. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_1563](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1563) (Letöltés ideje: 2024. 03. 25.)
- Hernandez, D. D. & Gençer, E. (2021) Techno-economic analysis of balancing California’s power system on a seasonal basis: Hydrogen, vs Lithium-ion batteries. *Applied Energy*, Október 15, 2021. [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261921007261?casa\\_token=4e2Tk7ENQXwAAAAA:Y3qrRRD91EWV1N28RPMH6W3JAYHkLBCWbsJIZbvoTvVwXX-vh9ESGmD\\_ZbaHxxbYEh6LPn1s](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261921007261?casa_token=4e2Tk7ENQXwAAAAA:Y3qrRRD91EWV1N28RPMH6W3JAYHkLBCWbsJIZbvoTvVwXX-vh9ESGmD_ZbaHxxbYEh6LPn1s) (Letöltés ideje: 2024. 03. 25.)
- Horváth Á. (2017) A villamosenergia-termelés és elosztás fizikája. Egyetemi előadás, 2017. március. youtube.com. <https://www.youtube.com/watch?v=cH5WeDAekCU&t=181s> (Letöltés ideje: 2024. 03. 26.)
- IEA (2021) The Role of Critical Materials in Clean Energy Transition. *World Energy Outlook Special Report*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf> (Letöltés ideje: 2024. 03. 25.)
- IEA (2023) World Energy Investment Report. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/8834d3af-af60-4df0-9643-72e2684f7221/WorldEnergyInvestment2023.pdf> (Letöltés ideje: 2024. 03. 25.)
- IEA (2024) Topics – Energy Security. [iea.org https://www.iea.org/topics/energy-security](https://www.iea.org/topics/energy-security) (Letöltés ideje: 2024. 03. 25.)
- Imre A., & Kummer K. (2021) Szezonális és hosszú távú energiátárolási lehetőségek. *Energiagazdálkodás (LXII)*, különszám, pp. 24–30. [https://public.ck-cer.hu/~pressure/2hp2g/ENGA\\_2021\\_k%3%bc1%c3%b6nsz%c3%a1m.pdf](https://public.ck-cer.hu/~pressure/2hp2g/ENGA_2021_k%3%bc1%c3%b6nsz%c3%a1m.pdf) (Letöltés ideje: 2024. 03. 25.)
- IRENA (2020) Electricity Storage Valuation Framework: Assessing system value and ensuring project viability. IRENA International Renewable Energy Agency 2020. március. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA\\_storage\\_valuation\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_storage_valuation_2020.pdf) (Letöltés ideje: 2024. 03. 26.)
- Kácsor E., Paizs L., & Kerekes L. (2022) Economics of electricity market. Egyetemi előadás, Budapesti Corvinus Egyetem, 2022. szeptember 23., Budapest
- Kandrás Cs. (2023) Energiafüggőség és jegybanki mandátumok. *ZöldÁram cikksorozat 1.* Magyar Nemzeti Bank. <https://www.mnb.hu/letoltes/dr-kandrac-csaba-energiafuggoseg-es-jegybanki-mandatumok.pdf> (Letöltés ideje: 2024. 03. 26.)
- Kun R. (2023) Li-ion akkumulátorok működési elve és komponensei. A Li-ion akkumulátorok fejlesztési irányjai. Li-ion akkumulátorcellák, modulok és akkumulátor-pakkok gyártása. Oktatási jegyzet, Magyar Akkumulátor Szövetség, Budapest
- Sekkenes, Th. (2023) The Development of the European Battery Value Chain. *European Battery Alliance. A III. Hungarian Battery Day konferencián elhangzott előadás.* <https://hungarianbatteryday.hu/downloads/2023/Thore-Sekkenes-European-Battery-Alliance-Program-Director.pdf> (Letöltés ideje: 2024. 03. 27.)
- Vulic, N., Rüdüsili, M., & Orehouing, K. (2023) Evaluating energy flexibility requirements for high shares of variable renewable energy: A heuristic approach. *Energy*, 2023. május. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03060544223002797> (Letöltés ideje: 2024. 03. 26.)
- Waldron, A. (ed.) (2008) *China in Africa.* The Jamestown Foundation. Washington, D.C.

A cikk a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) feltételei szerint publikált Open Access közlemény, melynek szellemében a cikk bármilyen médiumban szabadon felhasználható, megosztható és újraközölhető, feltéve, hogy az eredeti szerző és a közlés helye, illetve a CC License linkje és az esetlegesen végrehajtott módosítások feltüntetésre kerülnek. (SID\_1)