

# A megújuló energiaforrások és az atomenergia szerepe a klímacélok elérésében

Füri Péter

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont  
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

Ahogy zajlik a dekarbonizáció, a villamosenergia-igény jelentősen nőni fog a 2030-2050-es időtávban. Aszódi és munkatársai modellezése megmutatta, hogy bár a nap- és szélenergia beépített teljesítménye többszörösére fog nőni 2040-re az Európai Unióban, megfelelő léptékű energiatárolás hiányában - amennyiben bezárjuk az atomerőműveket - nőni fog a szén-dioxid-kibocsátás. Sok esetben jelentős mennyiségű földgáz is szükséges lenne ekkor az igények ellátásához. A magyarországi helyzetet vizsgálva kijelenthető továbbá, hogy a 2030-2050-es időtávban fontos a Paksi Atomerőmű bővítése. A megújuló energiaforrásokat hasznosító termelők beépítése és energiatárolók létesítése mellett, amennyiben lehetséges, szükséges lenne a meglévő blokkok üzemidejének meghosszabbítása is ahhoz, hogy alacsonyan tartsuk a villamosenergia-termelés szén-dioxid-kibocsátását.

## Bevezetés

Az elmúlt százötven évben világszerte jelentős népességnövekedést tapasztaltunk. Míg 1900-ban csak 1,63 milliárd ember élt a Földön, 1950-re 2,5 milliárdra, 2000-re pedig 6,15 milliárdra nőtt a népesség [1]. Jelenleg, 2024 első felében, már több mint nyolcmilliárd ember számára kell biztosítani élelmet és energiát. Az Egyesült Nemzetek Szervezete (ENSZ) előrejelzése szerint a népesség még évtizedekig növekedni fog [2]. Az életszínvonal remélhetőleg szintén javulni fog, ami valószínűleg mind az energia-, mind az anyagigény jelentős növekedéséhez vezet majd a 2030 és 2050 közötti időszakban. A szén-dioxid-kibocsátás csökkentése közben kell kielégíteni a növekvő keresletet. Ehhez jelentősen változtatnunk kell az energiatermelésen, hiszen globálisan a primerenergia-fogyasztást vizsgálva még ma is a kőolaj a legfontosabb forrás. A villamos energiát vizsgálva pedig a szén és a földgáz a legnagyobb mértékben igénybe vett energiahordozók [3].

A világon elfogyasztott villamos energia mennyisége jelentősen nőtt az utolsó másfél évtizedben. Míg 2010-ben globálisan „csak” 21 263 TWh áramot termeltek, ez a szám 2023-ra 29 479 TWh-ra nőtt [4]. Gondolat kísérletképpen feltételezzük, hogy ez a mennyiség egyenesen fogyott el, és egyetlen óriási erőmű fedezte az igényeket. Ez az év 8760 órájára elosztva 2010-re 2,427 TW-os, 2023-ra pedig már 3,365 TW-os folyamatos termelést jelentett volna. Egy ilyen erőműben az új paksi blokkokból, melyek egyenként 1,2 GW-os teljesítményűek lesznek, 2010-ben még „csak” 2023 db kellett volna, de 2022-ben már 2804 reaktorra lett volna szükség. Tizenhárom év alatt tehát 781 ilyen új blokkot kellett volna megépíteni ebben az óriási erőműben.

Világviszonylatban tehát jelentősen nő az a kereslet, amit ki kell szolgálni. Ez 2010 és 2022 között körülbelül évi 3% növekedést jelentett. A 2023-2026-os időszakra a Nemzetközi Energiaügynökség előrejelzése szerint még ennél is nagyobb, évi 3,4%-os növekedés várható [5].

Az üvegházgázok kibocsátásának csökkentéséhez és az olajigény mérsékléséhez egyre több benzin- és dízelüzemű gépjárművet cserélnek elektromosra. Ezeknek az autóknak a száma több országban gyorsan nő, amit jól mutat, hogy 2023-ban világszerte 13,8 millió új elektromos autó állt forgalomba [6]. Ez csökkenti a közlekedés okozta légszennyezést, ám jelentős villamosenergia-igényt is generál. Hogy megértsük, mennyi áram kell a villanyautózáshoz, érdemes áttekinteni egy egyszerű számítást. Egy átlagos fogyasztású elektromos autó az Electric Vehicle Database szerint 188 Wh áramot fogyaszt 1 km úthosszon [7]. Autónként 15000 km-es éves megtett távolsággal számolva egy ilyen autó használata 2820 kWh villamos energiát igényelne. Ez több, mint egy hazai fogyasztási hely (család) átlagos éves áramfogyasztása (2520 kWh). És ez csak a töltéshez szükséges energia; a gyártáshoz szintén jelentős mennyiségű villamos energia szükséges.

Jelen cikk a továbbiakban a publikusan is rendelkezésre álló adatokat használva megvizsgálja, hogy a Párizsi Megállapodásban [8] és az Európai Zöld Megállapodásban [11] kitűzött kibocsátáscsökkentési vállalások tükrében milyen változások valószínűek a világ villamosenergia-termelésében. A hazai Nemzeti Energia- és Klímaterv 2023-ban felülvizsgált változatát (NEKT) [9] felhasználva egyszerű forgatókönyveket feltételezve megbecsülöm továbbá, hogy milyen villamosenergia-igény és milyen „erőműmix” várható Magyarországon a 2030-2050-es időtávban. E vizsgálat - számos bizonytalansággal terhelve - csupán a legegyszerűbb becslésnek tekinthető. Céлом csak annak megvilágítása volt, hogy milyen fontos szerepet játszhat az atomenergia a klímaváltozás elleni törekvésekben.

## A Párizsi egyezmény és a Zöld megállapodás

A klímaváltozás miatti extrém időjárási események (aszályok, áradások, viharok stb.) sokak szerint az emberiséget fenyegető legnagyobb veszélyek közé

tartoznak. A szén, a kőolaj és a földgáz égetése nemcsak klímahatással jár, hanem jelentős légszennyezést is okoz, amely nagymértékben hozzájárul például a tüdőrák, a krónikus obstruktív tüdőbetegség (COPD) és a szív- és érrendszeri megbetegedések okozta halálozás növekedéséhez is. A World Health Organization (WHO) szerint évente körülbelül 7 millió ember veszti életét szennyezett levegő belégzése miatt [10]. A low-carbon (alacsony szén-dioxid-kibocsátású) forrásokra történő energiaátmenet tehát nemcsak az éghajlatra, hanem az emberi egészségre is jó hatással lesz.

A Párizsi Megállapodás az egyik legismertebb nemzetközi egyezmény, melynek célja a klímaváltozás káros hatásainak mérséklése. Ennek érdekében a felmelegedést 1,5 °C alatt kell tartani az iparosodás előtti időkhöz képest. Ahhoz, hogy ezt elérjük, a globális üvegházgáz-kibocsátásnak 2025 előtt tetőznie kellene, és 2030-ra 43%-kal kellene csökkenteni az emissziót az 1990-es szinthez képest [8]. Ehhez a közlekedés és az ipar kibocsátásának csökkentése mellett jelentősen növelni kell a megújuló és a nukleáris energia részesedését is a villamosenergia-termelésben.

Az Európai Unió (EU) az egyik "élharcosa" a klímabarát energiahordozókra való áttérésnek. Ennek keretében az EU Zöld Megállapodása (Green Deal) [11] és annak „Fit for 55” csomagja 2030-ra nettó 55%-os üvegházgáz-kibocsátás-csökkentést, és 2050-re klímasemlegességet, vagyis nettó nulla kibocsátást tűzött ki célul. Ennek eléréséhez több európai ország villamoserőmű-flottájába számottevő low-carbon termelőt építettek be az utolsó 10 évben.

Ezzel ellentétben, például Kínában még ma is jelentős a szénfelhasználás. Sok fejlődő országban, mint Indiában, a növekvő népesség által generált villamosenergia-igényt ma még szintén nagyrészt szénművekkel látják el [13]. Nem meglepő tehát, hogy több szervezet, köztük a Nemzetközi Megújuló Energia Ügynökség (International Renewable Energy Agency, IRENA) is azt hangsúlyozza, hogy nem elég gyors az energiaátmenet az 1,5 °C tartáshoz [12]. Ehhez 2030-ra világviszonylatban háromszorosára kellene növelni a megújuló energiaforrásokat hasznosító erőművek beépített kapacitását [12]. Az időjárásfüggő megújuló ilyen nagyfokú integrációja azonban jelentős kihívások elé állítaná a villamosenergia-rendszerek üzemeltetőit.

Mint azt már említettem, az elmúlt évtizedben több európai országban jelentős teljesítményű nap- és szélenergia-erőművet kapcsoltak rá a hálózatra, de a villamos energia tárolása – a szükséges sok GWh-s léptékben – még csak kevés helyen megoldott [13]. Ennek hatására napos időben sokszor negatív az áram ára, míg reggel és este, amikor a naperőművek csak kis hatásokkal termelnek, de az áramigény nagy, gyakran igen sokat (200 euró/MWh feletti összeget [13]) kell fizetni a villamos energiáért. Jelentős továbbá a fosszilis energiaforrások aránya is ezekben az időszakokban a termelésben. Nagy szükség lenne tehát az időjárástól/napszaktól függetlenül termelni képes low-carbon termelők építésére.

A nukleáris energia teljes mértékben megfelel ezeknek a követelményeknek, hiszen még a teljes életciklust vizsgálva is alacsony szén-dioxid-kibocsátású, mely a megújulókkal ellentétben kevés üzemanyagból, kis helyen képes nagy mennyiségű energiát olcsón előállítani a nap 24 órájában, függetlenül az időjárástól. Az atomenergia ma még „csak” körülbelül 10%-át adja a világ villamosenergia-

termelésének, de 30%-át a low-carbon termelésnek [14]. 2022 decemberében 32 országban 438 reaktor volt üzemben, 393,8 GW teljesítménnyel [15]. Ez nem kevés, ám a 2050-es nettó nulla kibocsátás eléréséhez további atomerőművi blokkok építésére lesz szükség [28]. Az atomenergia nemcsak a villamos energia „zöldítésében” segíthet, hanem alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogéntermeléssel akár a nehezen villamosítható tevékenységek (pl. közúti teherszállítás, egyes ipari folyamatok) dekarbonizációjában is kulcsszerepet játszhat [16].

Az Európai Unióban az atomenergia még ma is fontos szerepet játszik, hiszen 2022-ben ez az erőműtípus biztosította a megtermelt villamos energia 22%-át [17]. Ennek ellenére, az atomenergia jövőjéről megoszlanak a vélemények. Németország leállította a még működő reaktorait, míg más országok, mint Magyarország, amennyiben lehetséges, meglévő atomerőművi blokkjainak további használatával és/vagy új reaktorok építésével szeretnék elérni a 2050-es klímasemlegességet. Ma már széles körben elfogadott az a nézőpont is, hogy atomenergia nélkül nem lehetséges a klímacélok elérése.

## Atomenergia vagy megújulók?

Arról, hogy a jövőben milyen low-carbon forrásokat részesítsünk előnyben, megoszlanak a vélemények. A nap- és szélenergia kétségkívül kulcsszerepet fog játszani a 2030-2050 közötti időszak villamosenergia-termelésében. A vízenergia, ahol jók az adottságok hozzá (pl. Ausztria, Norvégia, Svájc), szintén jelentős mértékben hozzájárulhat az igények ellátásához. A vízerőművek ráadásul nagy segítséget nyújthatnak a termelés-fogyasztás egyensúlyának fenntartásában is. Magyarországon sajnos nincs számottevő vízerőművi kapacitás, hazánkban tehát ezt az erőműtípust sem használhatjuk fel a low-carbon termeléshez vagy a termelés-fogyasztás egyensúlyának fenntartásához.

Aszódi Attila és munkatársai két tanulmányban [18, 19] vizsgálták, hogy hogyan tervezik az Európai Unió országai kielégíteni a villamosenergia-igényt az elkövetkező három évtizedben, és hogy ez hogyan hat majd az ellátásbiztonságra és a szén-dioxid-kibocsátásra. Egy 2021-es tanulmányban [18] ez a kutatócsoport 19 európai ország energiatermeléssel kapcsolatos terveit vizsgálta. Ebben az akkor hatályos nemzeti stratégiákat felhasználva meghatározták a villamosenergia-igény várható értékét a 2030-2040-es időszakra. Megvizsgálták továbbá, hogy mennyire lesz képes az adott ország tervezett erőműflottája kiszolgálni az igényeket. Amennyiben minden vizsgált országban a tervek szerint alakul az erőműösszetétel, a 2019-es bázisévhez viszonyítva 2040-re több mint hatszorosára nő a naperőművek, 3,2-szeresére a szélenergia-erőművek, 1,25-szeresére a vízerőművek és 1,38-szorosára a biomassza-tüzelésű erőművek beépített teljesítménye. A földgáztüzelésű erőművek teljesítménye csak 2%-kal nő, a széntüzelésű erőművek beépített teljesítménye pedig kicsit több mint negyedére csökken 2040-re. A 2040-ben még működő atomerőművek teljesítménye pedig körülbelül 74%-ára csökken a 2019-es értéknek. Jól látszik tehát, hogy éppen azok az erőművek fognak leállni, amelyek bármikor termelhetnének. Magyarországon a saját erőművek által ki nem szolgált igényt tekintve a szimulációk szerint 2030-ban még nem jelentős a hiány, hiszen ekkor még 4,4 GW atomerőművi termelést feltételezett a modellezés. 2040-re, amennyiben a

régi paksi blokkok leállnak, e publikációban szereplő modellezés alapján már jelentős hiánnyal kell majd számolni hazánkban. Amennyiben minden biztonsági követelménynek meg lehet felelni és technológiai szempontból is lehetséges, rendkívül fontos lenne tehát, hogy a jelenleg is működő paksi 1-4-es blokkok 2037 után is tovább működhessenek.

Egy későbbi, 2023-as publikációban [19] Aszódi és társai a nemzeti tervek feldolgozva megvizsgálták, mi történne, ha az egyes európai országok kivezetnék a nukleáris energiát a 2030-2040-es energiamixből. Az egyik vizsgált forgatókönyvben az atomerőműveket háromszoros teljesítményű naperőművekkel és kétszeres teljesítményű szélenergiával pótolták (No nuc+RES). Egy másik forgatókönyvben emellett a leállított atomerőművek teljesítményének megfelelő gázerőművet is hozzáadtak a No nuc+RES forgatókönyvben szereplő erőműflottához. A szimulációk során megvizsgálták a szén-dioxid-kibocsátást és a gázigényt is. Eredményeik alapján kijelenthető, hogy a legkisebb üvegházgáz-kibocsátással az a forgatókönyv jellemezhető, amelyben nem vezetnek ki az atomerőműveket. Ennek a tanulmánynak egy másik fontos üzenete, hogy a nagy arányban nap- és szélenergiát alkalmazó energiatermelés esetén akár szezonális energiátárolás is szükséges lehet, melyhez jelenleg nem áll rendelkezésre megfelelő technológia.

## A magyarországi villamosenergia-igény és annak ellátása 2030-ban és 2050-ben

2023-ban a hazai villamosenergia-fogyasztás 43,73 TWh volt [20]. Ez egész évre kiátlagolva körülbelül 5 GW-os fogyasztást jelent. Ahogy zajlik a dekarbonizáció, a villamos energia valószínűleg egyre nagyobb szerepet játszik majd a jövőben a hazai energiaigény ellátásában.

A Nemzeti Energia- és Klímaterv (NEKT) 2023. évben felülvizsgált változata [9] 2030-ra a WEM (With Existing Measures) és a WAM (With Additional Measures) forgatókönyvek szerint egyaránt 168 PJ villamosenergia-igénnyel számol. 2050-re pedig a WEM esetén 265 PJ-ra, a WAM esetén pedig 293 PJ-ra nő ez a szám. Ez, állandó fogyasztást feltételezve, 2030-ra 5,3 GW, 2050-re a WEM esetén 8,4 GW, a WAM esetén pedig 9,28 GW zsinórtermelést igényelne. Az erőteljes villamosítás miatt azonban még ennél nagyobb villamosenergia-igény is előfordulhat [9] (55-60 TWh 2030-ra és 103 TWh 2050-re). Ez már 2030-ra is lényegesen több, 6,8 GW-os, 2050-re pedig már 11,8 GW-os átlagos fogyasztást ad.

A villamosenergia-igény természetesen nem állandó. Nem azonos mennyiségű áram fogy télen és nyáron, sőt, még egy napon belül is jelentősen változik a rendszerterhelés. Valahogy ki kell elégíteni a megnövekedett áramigényt például hideg időjárás vagy kánikula esetén is. 2024 januárjában a MAVIR új rekord rendszerterhelést, 7,441 GW-ot mért [21]. Nyáron, a klímaberendezések miatt szintén előfordul 7 GW körüli rendszerterhelés.

Magyarországon az atomenergia évtizedek óta a legjelentősebb villamosenergia-forrás. Ez a tervek szerint a 2030-2050-es időtávban sem fog megváltozni, hiszen az atomenergia jelentős súllyal szerepel a 2030-ra és a 2050-re tervezett energiamixben is.

A Nemzeti Energia és Klímaterv 2023-ban felülvizsgált változatában a With Existing Measures (WEM) forgatókönyv szerint 2030-ra 4,4 GW atomerőmű, 9,8 GW naperőmű, 0,4 GW szélenergiát, 0,5 GW biomassza tüzelésű és 3,2 GW földgázos erőmű fog rendelkezésre állni. A With Additional Measures (WAM) forgatókönyv ettől annyiban különbözik, hogy ebben több, 12 GW naperőmű és 1,1 GW szélenergiát van, ám a biomassza csak 0,1 GW-os részesedéssel szerepel.

A két új, egyenként 1,2 GW-os paksi atomerőművi blokk még nem biztos, hogy üzembe állhat már 2030-ban. A 30-as évek második felében azonban már nagyon valószínű a 6 paksi blokk együttes működése. A régi blokkok tervezett üzemideje a végéhez ér ebben az időszakban. A fosszilis alapú termelés minimalizálásához, amennyiben lehetséges, szükséges lenne a 4,4 GW atomerőművi termelés 2037 utáni fenntartása is. Az új blokkok építése mellett érdemes tehát megvizsgálni a meglévő blokkok üzemidejének meghosszabbításához szükséges teendőket is.

A tárolt energia területén szintén jelentős növekedés várható, hiszen 2026-ra 500-600 MW teljesítményű ilyen berendezés építése várható. 2030-ra ez az érték 1 GW-ra nőhet [9]. Fontos tehát annak kitapasztalása, hogy hogyan járulhatnak hozzá ezek az energiátároló berendezések a rendszer működésének optimalizációjához. Ennek vizsgálatára a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpontban nemrég helyeztek el egy újdonságnak számító 1 MW-os nátrium-kén akkumulátort [22], üzemeltetési tapasztalatok gyűjtése céljából. Azt, hogy Magyarországon hol lehetne szivattyús energiátárolót (SZET) létesíteni, már vizsgálják. Egy ilyen létesítmény - méretétől függően - akár 300-700 MW-ot is biztosíthatna több órán keresztül [29].

2030-ra a 168 PJ-ból számított körülbelül 5,4 GW-os átlagos terhelést nappal már a hat paksi blokk és a naperőművek is fedeznék. Nappal még körülbelül 7 GW-nyi villamos energia előállítás is lehetséges a 4,4 GW-nyi atomerőművi és a 10-12 GW-nyi naperőműből érkező termeléssel. Éjjel pedig, amennyiben low-carbon forrásokból (szél, biomassza) nem lehet megtermelni az átlagos fogyasztásból hiányzó 1-2 GW-ot, a földgáztüzelésű erőművek beindíthatók. Ameddig az energiátárolók „le nem merülnek”, igénybe vehető továbbá az akkumulátorokban vagy a SZET-ben eltárolt energia is. Amennyiben minden termelő egység üzemel, 4,4 GW-nyi nukleáris és a 3,2 GW-nyi földgáztüzelésű erőmű és az eltárolt energia még a 7 GW feletti csúcsigényt, vagy pedig a 60 TWh-ból számított 6,8 GW-os átlagos fogyasztást is fedezné. Magyarország 2030-ra 50%-os bruttó üvegházgáz-kibocsátás-csökkentést vállalt [9]. Mivel a gáz elégetése fajlagosan jóval kisebb szén-dioxid kibocsátással jár, mint a széné, a szén kivezetésével ugyanakkora kibocsátás mellett akár még több villamos energiát is termelhetünk földgázból ebben az időpontban.

A 10 vagy 12 GW-nyi naperőmű miatt jó időben akár jelentős túltermelés is előfordulhat. Már e cikk írásakor, csupán körülbelül 3,5 GW-nyi naperőmű és 2,4 GW háztartási méretű kiserőmű (HMKE) [30] mellett is többször előfordult, hogy délben a Paksi Atomerőmű termelését kellett csökkenteni a rendszer egyensúlyának fenntartásához. Fontos tehát, hogy az új, épülő erőművek részt vehessenek a szabályozásban. A tervek szerint

hamarosan megépülő kombinált ciklusú gázerőművek teljesítménye viszonylag gyorsan módosítható, ezek termelése visszafogható tehát a PV (photo-voltaic) csúcspontkor. Az energiátárolók szintén tölthetők ilyenkor. Az egyik szomszédos országban, vagy ha találnak megfelelő hazai helyszínt, akkor itthon is akár GWh-s kapacitású szivattyús tározók is épülhetnek. Ezek szintén alkalmasak lennének a „felesleg” tárolására. „Power to gas” technológiával hidrogén is előállítható lenne ilyenkor. Az ehhez szükséges technológia alkalmazása – ilyen nagy léptékben – sajnos ma még nem bevett gyakorlat. Azt, hogy az új VVER 1200-as atomerőművi blokkok termelését hogyan lehetne összehangolni a mindenkori igénnyel, vizsgálják, de még kevés tapasztalat áll rendelkezésre a VVER blokk manőverezhetőségéről [26]. A naperőműveket elméletileg szintén le lehetne kapcsolni akkor, amikor nincs szükség az általuk termelt energiára. Akár az atomreaktorok leterhelésekor, ekkor is egy low-carbon forrás termelését fogjuk vissza sajnos.

Mivel a hazai villamosenergia-hálózat ma már össze van kötve minden szomszédos országgal, nehezen képzelhető el, hogy ne legyen elég áram, mikor például egy atomerőművi blokk karbantartás miatt áll vagy valamelyik másik erőművi blokk nem indítható valamilyen üzemzavar miatt. Fontos azonban kiemelni, hogy amennyiben a két új paksi blokk átadása jelentősen késik vagy pedig a régi blokkok a tervezett üzemidejük végén leállnak, akkor sok esetben jelentős mennyiségű áramot kellene termelni földgázból. 2 vagy 2,4 GW atomerőművi termelés mellett mikor nagy a rendszerterhelés és a megújulók épp rossz határfokkal termelnek, jelentős mennyiségű áramot kellene importálnunk is. Az új atomerőművi blokkok építése és amennyiben lehetséges, a régi blokkok üzemben tartása igen fontos lenne tehát a 2030-2050-es időtávban.

2050-re a WEM forgatókönyv a 4,4 GW nukleáris mellett mindössze 3 GW gázerőművel, 1,5 GW biomasszával, 8 GW nappal és 0,7 GW széllel számol. A WAM forgatókönyv ettől annyiban különbözik, hogy itt kicsit több biomassza (1,9 GW), sokkal több nap (20,4 GW) és szél (3 GW), de kevesebb, csak 2,5 GW gázerőmű van. Ez a két erőműflotta éjszaka, szélcsendben éppenhogy fedezné már az átlagos (8-9 GW) igényt is. A 103 TWh-ból számolt 11,75 GW-os fogyasztás esetén akkor, mikor nem süt a nap és nem fúj a szél, jelentős mennyiségű importra vagy pedig eltárolt energiára lenne szükség.

Az esetlegesen 9 GW-nál nagyobb csúcsigény ellátásakor ugyanezekkel a problémákkal kell majd szembenéznünk, ha például szivattyús tározókkal nem tudjuk majd lefedni az egyéb hazai erőművek által ki nem elégített keresletet. Ekkorra azonban már valószínűleg sokkal komolyabb szerepet fog vállalni a fogyasztói oldal válasz (Demand Side Response, DSR) is a fogyasztás-termelés összehangolásában. Jelentősen nőni fog továbbá a részben önellátó energiaközösségek és háztartások aránya is. A jövőben, okosmérők alkalmazásával és a díjfizetés megváltoztatásával valószínűleg a fogyasztók is ösztönözhetők lesznek továbbá arra, hogy fogyasztásukat összehangolják a termeléssel.

A földgáz, bár égetése üvegházhatású gáz kibocsátásával jár, mégis sokkal „zöldebb” a szénnél, hiszen felhasználása lényegesen kisebb szén-dioxid-kibocsátással jár (körülbelül 500-600 g/kWh vs. 800-1200 g/kWh) [27]. Emellett a

korszerű, kombinált ciklusú gázerőművek hatásfoka is jó (50-60%) [23]. Az elavult lignittüzelésű blokkok és a régi gázerőművek lecserélésével tehát akár több áram is termelhető ugyanakkora vagy akár kisebb széndioxid-kibocsátás mellett.

A fenti példa jól mutatja, hogy amikor a kedvezőtlen időjárás miatt nem számíthatunk a nap- és szélerőművekre, valószínűleg még 2050-ben is nagy szükség lesz a gázerőművekre. Mivel több hazai gázerőmű tervezett üzemideje hamarosan véget ér, továbbá a szabályozásban is egyre nagyobb szükség van erre az erőműtípusra, három új gázerőmű blokk fog megépülni hazánkban a közeljövőben [24]. Hosszú távon azonban ahhoz, hogy tartani tudjuk a nettó nulla széndioxid-kibocsátást, a gázerőművekre Carbon Capture and Storage (CCS) rendszert kellene kötni, vagy pedig például erdősítéssel meg kell kötni a kibocsátott széndioxidot. Egy másik lehetőség, hogy hosszú távon új atomerőművi blokkokkal (például kis moduláris reaktorokkal) pótoljuk a gázerőműveket [25].

## Összefoglalás

A Párizsi Egyezmény céljának teljesítéséhez az emberiségnek rövid időn belül jelentősen csökkentenie kell a szén-dioxid kibocsátását. Mivel a villamos energia előállítható low-carbon forrásokból, és számos tevékenység villamosítható, a megújuló energiaforrások felhasználásával vagy atomerőművekkel termelt „zöld villamos energia” biztosan kulcsszerepet fog játszani a 2030 és 2050 közötti igények ellátásában.

Globálisan jelentős mértékben nő a villamosenergia-fogyasztás. A növekedés mértékét jól mutatja, hogy ha az új paksi reaktorokhoz hasonló 1200 MW-os teljesítményű egységekkel fedeztük volna az új igényt, 2010 és 2023 között 781 blokkot kellett volna építeni. A Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) szerint a 2023-2026-os időtávban szintén jelentős, évi 3,4%-os növekedés várható. A hazai villamosenergia-igény várhatóan szintén jelentősen emelkedik majd a 2030-2050-es időszakban. 2030-ra a Nemzeti Energia és Klímaterv 2023-ban felülvizsgált változata szerint körülbelül 5,3 GW, vagy erőteljesebb villamosítás esetén akár 6,8 GW átlagos fogyasztás is előfordulhat. 2050-re a különböző forgatókönyvek szerint 8-9 GW-ra, vagy akár 11,8 GW-ra is nőhet az év 8760 órájára kiátlagolt villamosenergia-igény.

Azt, hogy Magyarországon miért van szükség az atomenergiára, jól mutatják a Nemzeti Energia és Klímatervben szereplő adatok. Több GWh-s tárolás hiányában, atomenergia nélkül, éjjel, szélcsendes időben már 2030-ban is jelentős mennyiségű villamos energiát kellene termelni földgázból, és számottevő importra is szorulna az ország ezekben az időszakokban. Csak a régi paksi blokkok üzemét feltételezve (2 GW) vagy 2037 után csak a két új blokk működésére számítva (2,4 GW), kedvezőtlen időjárás esetén szintén jelentős lenne az elfogyasztott földgáz mennyisége és a villamosenergia-import is. Fontos tehát, hogy a Paksi Atomerőmű két új blokkja amint lehetséges, üzembe álljon. A 30-as évek második fele után pedig, amennyiben lehetséges, biztosítani kell a meglévő blokkok további működését is.

E következtetésekkel összhangban van Aszódi és társai kutatása is, melyben modellezéssel megvizsgálták, hogy 19 európai országban mely esetekben nem lesz kielégíthető a

2030-as és a 2040-es villamosenergia-igény az akkorra tervezett erőműflottával. Ebben Magyarországot vizsgálva jól látszik, hogy 2040-re, ha a két új paksi blokk nem épül meg, vagy ha a régi blokkok a tervezett üzemidejük lejártakor leállnak, jelentős, a hazai erőművekkel ki nem szolgálható igény lesz már.

Azt, hogy az atomenergia és a megújulók nem vetélytársak, jól mutatja, hogy 2030-ban a vizsgált forgatókönyvtől függően a tervek szerint a 4,4 GW-nyi atomerőmű mellett 9,8 vagy 12 GW-nyi naperőmű, illetve 0,4 vagy 1,1 GW-nyi szélerőmű is lesz Magyarországon. 2050-ben pedig a With Additional Measures (WAM) forgatókönyvben már 20,4 GW nap- és 3 GW szélerőmű szerepel. Az időjárásfüggő megújulók ilyen nagymértékű használata azonban szükségessé teszi a termelés és fogyasztás a mainál jobb összehangolását is, mely akár a fogyasztók aktív szerepvállalását (DSR) is igényelheti. 2026-ra 500-600 MW teljesítményű energiatároló építése várható, melyet 2030-ra 1 GW-ra terveznek növelni. 2030 után a földgáz alapú villamosenergia-termelés és így a karbonkibocsátás csökkentéséhez szükséges lehet még ezen felüli GWh-s léptékű villamos energiát tárolni képes szivattyús erőművek építésére is. Azt, hogy ilyen hol lehetne építeni, már vizsgálják.

Hosszú távon, a 2050-es 8-9 GW-os villamosenergia-igény ellátásához, az egyéb low-carbon energiaforrások nagymértékű felfuttatása mellett szükség lehet további nukleáris termelők létesítésére is, mely lehet a mai reaktorokhoz hasonló nagy erőmű vagy amennyiben gazdaságossá válik a technológia, akár több kis moduláris reaktor is.

## A jelen cikk készítését nehezítő főbb bizonytalanságok

A jelen cikk és a benne a jövőről szereplő állítások érvényessége természetesen sok bizonytalansággal terhelt és csak a legegyszerűbb magyarázatnak tekinthető. Világviszonylatban igen nehéz meghatározni, hogy milyen gyorsan fog megtörténni az átállás a fosszilis energiaforrásokról a low-carbon forrásokra és hogy pontosan az egyes low-carbon technológiák milyen súllyal fognak szerepelni a 2030-as vagy a 2050-es villamosenergia-termelésben. Az Európai Unió esetén a nemzeti tervek/stratégiák miatt már kicsit könnyebb becsléseket tenni, ám még itt is van néhány nehezen előrejelezhető változó (pl. az elérhető földgáz mennyisége és ára, az új atomreaktorok felépítésének üteme és a meglévő reaktorok üzemben tartása, a napelemek/szélturbinák ára és elérhetősége, a jövőben létesülő energiatárolók kapacitása...). A magyarországi helyzetet vizsgálva az egyik fő bizonytalanság a 2030-2050-es időszak villamosenergia-igénye, illetve az, hogy a két új atomerőművi blokk mikor kezd meg az üzemét és a ma is működő négy blokk üzemideje meghosszabbítható lesz-e. Azt, hogy mikor és mekkora szivattyús energiatároló fog létesülni, szintén számos körülmény befolyásolja. Az, hogy hidrogén termelésével mekkora részét fogjuk tudni hasznosítani/tárolni a megújuló termelte villamos energiának szintén jelentősen befolyásolja, hogy mennyire lesz gazdaságos a technológia a 2030-2050-es időskálán.

## Irodalomjegyzék

- [1] Our World In Data, Population. Gapminder - Population v7 (2022); Gapminder - Systema Globalis (2022); HYDE (2017); United Nations - World Population Prospects (2022)
- [2] United Nations: Population: <https://population.un.org/wpp/Graphs/DemographicProfiles/Line/900>
- [3] Our World in Data, Global primary energy: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2023), Smil (2017) Our World in Data, Electricity production by source: EMBER (2024)
- [4] Our World in Data, Electricity-demand: EMBER (2024)
- [5] International Energy Agency: Electricity-2024: <https://www.iea.org/reports/electricity-2024/executive-summary>
- [6] Our World in Data: Electric car sales: International Energy Agency. Global EV Outlook 2024.
- [7] Electric Vehicle Database, Energy consumption of full electric vehicles. <https://ev-database.org/cheatsheet/energy-consumption-electric-car>
- [8] United Nations, The Paris Agreement: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [9] National Energy and Climate Plan. Revised version 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)
- [10] Max Roser (2021) - "Data review: how many people die from air pollution?" Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/data-review-air-pollution-deaths>
- [11] European Commission, The European Green Deal: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)
- [12] International Renewable Energy Agency (IRENA), Annual report of the director-general 2022-2023: [https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Annual-report/IRENA\\_DG\\_Annual\\_Report\\_for\\_2022.pdf?rev=8ddecdf4596c440081d6961cfbb05b5c](https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Annual-report/IRENA_DG_Annual_Report_for_2022.pdf?rev=8ddecdf4596c440081d6961cfbb05b5c)
- [13] Electricity Map: <https://app.electricitymaps.com/map>

- [14] International Atomic Energy Agency, Climate Change and Nuclear Power 2020.  
[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1911\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1911_web.pdf)
- [15] International Atomic Energy Agency, Nuclear Power Reactors in the World:  
[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-43\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-43_web.pdf)
- [16] International Atomic Energy Agency, Hydrogen Production Using Nuclear Energy:  
[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1577\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1577_web.pdf)
- [17] European Commission: In focus: EU nuclear energy policy - why it matters to us all:  
[https://energy.ec.europa.eu/news/focus-eu-nuclear-energy-policy-why-it-matters-us-all-2024-03-13\\_en](https://energy.ec.europa.eu/news/focus-eu-nuclear-energy-policy-why-it-matters-us-all-2024-03-13_en)
- [18] A. Aszodi, B. Biro, L. Adorjan, A. Cs. Dobos, G. Illes, N. K. Toth, D. Zagy, Z. T. Zsiboras: Comparative analysis of national energy strategies of 19 European countries in light of the green deal's objectives. Energy Conversion and Management: X 12 (2021)
- [19] A. Aszodi, B. Biro, L. Adorjan, A. Cs. Dobos, G. Illes, N. K. Toth, D. Zagy, Z. Tas Zsiboras: The effect of the future of nuclear energy on the decarbonization pathways and continuous supply of electricity in the European Union. Nuclear Engineering and Design 415 (2023)
- [20] Magyar Energetikai és Közmű Hivatal, Villamosenergia mérleg 2023: <https://mekh.hu/eves-adatok>
- [21] MAVIR, Új magyarországi villamosenergia-rendszer terhelési csúcs, 2024. jan. 22.  
[https://www.facebook.com/mavir.azenergiairanyitoja/posts/886966343436181?ref=embed\\_post](https://www.facebook.com/mavir.azenergiairanyitoja/posts/886966343436181?ref=embed_post)
- [22] National Geographic, Tudomány: Magyarország első Na-S akkumulátora:  
<https://ng.24.hu/tudomany/2024/03/03/magyarorszag-első-na-s-akkumulatora/>
- [23] Electrical Engineering Portal- Combined Cycle Power plant:  
<https://electrical-engineering-portal.com/an-overview-of-combined-cycle-power-plant>
- [24] Magyar Építők: Három új gázerőmű épül Magyarországon, ismertté váltak a helyszínek:  
<https://magyarepitok.hu/energetika/2023/03/harom-uj-gazeromu-epul-magyarorszagon-ismertte-valtak-a-helyszinek>
- [25] International Atomic Energy Agency, What are Small Modular reactors?  
<https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>
- [26] B. Szondy, B. Bodnar, A. Grossetete, T. Gain, A. Aszodi: Review of solutions developed for improving maneuvering flexibility in German, French and Russian PWRs targeting to explore future possibilities for the new VVER-1200 nuclear power plant units in Hungary. Nuclear Engineering and Design Volume 419, 1 April 2024, 112965
- [27] ENTSO-E 2022, EU ETS, IPCC 2014
- [28] International Atomic Energy Agency: Nuclear energy makes history as final cop28 agreement calls for faster deployment. <https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-energy-makes-history-as-final-cop28-agreement-calls-for-faster-deployment>
- [29] Telex: Szivattyús tározós erőművet építhet a kormány vagy itthon, vagy Szerbiában  
<https://telex.hu/gazdasag/2023/07/28/ermu-lantos-csaba-szerbia-vizenergia-aram>
- [30] MAVIR, Energia MIX, VER Erőművi Beépített Teljesítőképesség és PV statisztikai adatok  
<https://www.mavir.hu/web/mavir/energia-mix-eromuvi-beepített-teljesitokepesseg-adatok>