Az atomenergia visszavezetésének lehetséges szerepe a németországi villamosenergia-termelés karbonkibocsátásának csökkentésében

Füri Péter[1], Kalocsai Márk[2]

[1] HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Energia és Környezetbiztonsági Intézet, Környezetfizikai Laboratórium

1121 Budapest, Konkoly-Thege M. út 29-33.

[2] Eötvös Loránd Tudományegyetem

1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C.

Egy 2025. évi téli és egy nyári hónapra megvizsgáltuk, hogy hogyan hatott volna Németország villamosenergia-importjára és a termelt villamos energia karbonintenzitására, ha a leállított szén, olaj és gázerőműveket a megújuló erőművek termelésének fokozásával vagy a nukleáris energiatermelés újraindításával pótolták volna. A vizsgált két hónapban a nap és szélerőművek beépített teljesítményének 216 és 181 GW-ra növelésével is sok esetben nagyobb villamosenergia-importot és karbonintenzitást kaptunk, mint 25 GW atomerőmű üzemeltetésével. 45 GW nukleáris zsinórtermelés és mellette a létező nap, szél, biomassza és vízerőmű flotta a legkedvezőtlenebb héten is heti viszonylatban exportőrré tette volna a valóságban ekkor importáló országot.

Bevezetés

A 2011-es fukushimai baleset előtt Németország mintegy 20 GW beépített nukleáris kapacitással rendelkezett [1]. A balesetet követően az ország felgyorsította az atomenergia kivezetését, így az üzemelő teljesítmény 2012-re mintegy 12 GW-ra csökkent [1]. Az utolsó három atomerőmű 2023-as leállításával lezárult a német nukleáris energiatermelés közel hatvanéves korszaka [1]. Az atomenergia kiesésének pótlásában a megújuló energiaforrások és a villamosenergia-import egyaránt fontos szerepet játszanak.

2025-ben a német erőművek összesen 415,2 TWh villamos energiát termeltek, amelynek 62,2%-a megújuló, míg 37,8%-a fosszilis energiaforrásokból származott. Ugyanebben az évben az ország 63,15 TWh villamos energiát importált és 44,29 TWh-t exportált [2]. A belföldi termelés átlagos karbonintenzitása 368 gCO_2/kWh volt, amelyet a villamosenergia-import kedvező összetétele 339 gCO_2/kWh-ra mérsékelt [3]. Az import jelentős része alacsony karbonintenzitású termelési szerkezetű országokból, elsősorban Franciaországból (32 gCO_2/kWh), Norvégiából (30 gCO_2/kWh) és Svájcból (50 gCO_2/kWh) érkezett. Az import egy másik része pedig Csehországból (448 gCO_2/kWh), Lengyelországból (655 gCO_2/kWh) és Hollandiából (259 gCO_2/kWh) származott, amely országokban a villamos energia előállításában továbbra is jelentős szerepet játszanak a fosszilis tüzelésű erőművek. Mivel azonban az import meghatározó hányada az alacsony karbonintenzitású francia villamosenergia-rendszerből érkezett, a villamosenergia-import összességében csökkentette a német villamosenergia-felhasználás átlagos szén-dioxid-kibocsátását.

A kieső termelést – ahogy az 1. ábrán [4] látható – jelentős részben nap- és szélerőművek villamosenergia termelésével pótolták. Fontos azonban megfigyelni, hogy az elmúlt húsz évben a földgáztüzelésű erőművek termelése is számottevő maradt. A fosszilis energiahordozók továbbra is jelentős szerepét mutatja, hogy 2025 volt az első év, amikor a nap és szélerőművek együttes termelése meghaladta a fosszilis üzemanyagot használó erőművekét.

A szénerőművek – köztük a legnagyobb karbonintenzitású lignittüzelésű blokkok – villamosenergia termelése ugyan csökkenő tendenciát mutat, de 2025-ben a németországi villamosenergia-termelés mintegy 20%-át még mindig ilyen, nagy CO_2 kibocsátású erőművek adták (1. ábra). Németország a tervek szerint 2038-ban fogja kivezetni a szenet a villamosenergia-termelésből. Fontos feladat tehát annak vizsgálata, hogy milyen kis CO_2 kibocsátású energiaforrásokkal pótolható az így kieső villamos energia.

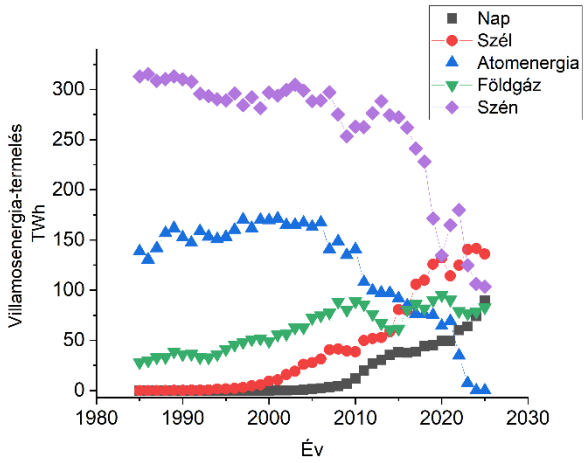
Gyakran felmerül az atom vagy a megújuló energiát összehasonlító kérdés a villamosenergia-termelés karbonkibocsátásának csökkentése kapcsán. Erre nem lehet általánosan érvényes választ adni, hiszen sok változó (pl. klíma, domborzat, villamosenergia ára, hálózat stabilitása stb.) hat arra, hogy a villamosenergia-igény mekkora mértékben fedhető le, illetve mekkora részét gazdaságos lefedni víz-, szél- vagy naperőművekkel, és hogy szükség van-e atomerőművekre az adott ország energiamixében. Mivel a megújuló energiaforrást hasznosító erőművek építése általában sokkal olcsóbb, továbbá a társadalom is jobban elfogadja egy új naperőmű, mint egy atomreaktor építését, várhatóan több országban egyre nagyobb részben ilyen erőművekkel fogják kiváltani a jövőben bezárásra kerülő erőműveket. Fontos azonban annak vizsgálata is, hogy milyen plusz korrekciós intézkedéseket (energiatárolás, gázerőművek építése, hálózatfejlesztés) kell eszközölni egy jelentős részben időjárásfüggő termelőket alkalmazó villamoserőmű-flotta esetén.

Kontakt: furi.peter@ek.hun-ren.hu
kalocsaimark@student.elte.hu

Beérkezett: 2026. augusztus 25.
Közlésre elfogadva: 2026. október 10.

© Magyar Nukleáris Társaság, 2026

A jelentős fosszilis részarány miatt a német villamosenergia-termelés teljes életciklusra számított karbonintenzitása 2025-ben 330 g/kWh volt az EMBER adatai szerint [4]. Ez jóval meghaladja az EU-27 átlagos 210 g/kWh os értékét [3]. Ugyanebben az évben Németországban átlagosan több mint kétszer annyi CO_2 került a légkörbe egy kWh villamos energia előállításakor, mint Magyarországon, ahol a karbonintenzitás mindössze 163 g/kWh volt [3].



***1. ábra**: A németországi erőművek villamosenergia-termelésének primer energiaforrás szerinti megoszlása 1985 és 2025 között*

Németország 2025-ben mintegy 104 GW beépített naperőmű- és 76 GW szélerőmű- kapacitással rendelkezett [5]. Ennek köszönhetően a megújuló energiaforrások termelése kedvező meteorológiai körülmények között nemcsak a hazai villamosenergia-igények jelentős részét képes fedezni, hanem számottevő exportot is lehetővé tesz. Ugyanakkor alacsony szél- és napenergia-termelés esetén a villamosenergia-rendszer működésében ismét meghatározó szerepet kapnak a szén- és földgáztüzelésű erőművek, és az ország több órán keresztül 5-10 GW-nál is nagyobb villamosenergia-importra szorulhat [3].

Az Európai Unió Zöld Megállapodásának (Green Deal) alapvető célja, hogy 2050-re az EU szén-dioxid kibocsátása nettó nulla legyen, vagyis az Unió klímasemlegessé váljon. Ennek eléréséhez – amennyiben a közeljövőben nem válik széles körben alkalmazott gyakorlattá a CO_2 leválasztása az erőművek füstgázából (CCS: Carbon Capture and Storage), – elengedhetetlen a szén- és olajtüzelésű erőművek villamosenergia termelésének minimálisra csökkentése. Ezzel párhuzamosan a kis karbonintenzitású (low carbon) termelés, elsősorban a nap- és szélerőművek, illetve az atomerőművek által előállított villamos energia mennyiségének növelése szükséges (nagy teljesítményű vízerőművek építésére Európában már lényegében nincs lehetőség).

Az atomerőművek a klímahatás szempontjából kedvező, mindössze 13 g/kWh [6] karbonintenzitású villamos energiát állítanak elő kiszámítható módon, napszaktól és szélsebességtől függetlenül.

A földgáztüzelésű erőművek üvegházgáz kibocsátása jóval kisebb, mint a szénerőműveké. Földgáztüzelés esetén a National Laboratory of the Rockies (NLR) adatai szerint minden technológiát figyelembe véve átlagosan 486 g/kWh CO_2 kerül a levegőbe mely CCS alkalmazásával 111 g/kWh-ra csökkenthető. A modern kombinált ciklusú gázerőművek (CCGT-k) által előállított villamosenergia karbonintenzitása kisebb a vizsgálatunkban alkalmazott 486 g/kWh-nál. A szénerőművek kibocsátása az elégetett szén minőségétől és az alkalmazott technológiától függően 838-1060 g/kWh) [6]. A megújuló energiaforrásokból előállított zöld hidrogén földgázhoz történő bekeverésével tovább csökkenthető a gázturbinák CO_2 kibocsátása. A földgáztüzelésű erőművek rugalmassága ma még sok országban nélkülözhetetlen a termelés és fogyasztás egyensúlyának fenntartásához, ezért várhatóan a közeljövőben is jelentős szerepet játszanak ezek az erőművek.

Bár az Energiewendé-ben a villamosenergia-termelés gerincét a jövőben a szél- és naperőművek adják majd, a gázerőművek továbbra is fontos szerepet játszanak a tervek szerint, hiszen ezek segítenek majd kielégíteni a fogyasztók igényeit sötétszélcsend (dunkelflaute) esetén. A fogyasztási csúcsok során szintén jelentős szerepet szánnak a gázerőműveknek. A CDA-2022-631 EU Taxonomy Complementary Delegated Act [7] megengedi a fosszilis gáztüzelés használatát 270 g/kWh direkt kibocsátásig, amennyiben ez a szénalapú termelést csökkenti. Ehhez az igen kicsi CO_2-kibocsátás eléréséhez nagyon kis gázfogyasztású, jó hatásfokú gázerőművek szükségesek. A jelenlegi geopolitikai helyzet eredményeként jelentősen megnőtt a földgáz ára így költséges lenne, ha túl nagy részben gázerőművekkel váltanák ki a bezárt szénerőműveket. Nagyszámú ilyen gázerőművek építését a közeljövőben gátolhatja továbbá az is, hogy a gázturbina gyártók által gyártani és leszállítani képes egységek száma is korlátos.

E tanulmány a 2025-ös téli és nyári németországi villamosenergia termelési és rendszerterhelési adatok alapján, négy forgatókönyvre végzett számításokkal azt vizsgálja, hogyan változott volna Németország villamosenergia-importja és az előállított villamos energia karbonintenzitása, ha a szén- és olajtüzelésű erőműveket leállították volna, miközben a megújuló energiaforrások – elsősorban a nap- és szélerőművek – termelését növelték volna. Az atomerőművek szerepének bemutatására két további forgatókönyvben 25 GW beépített nukleáris kapacitást is modelleztünk. Az import villamos energia szempontjából legkedvezőtlenebb időszakra, a január második hetére pedig azt is megvizsgáltuk, milyen hatása lett volna még nagyobb, 35 vagy 45 GW nukleáris kapacitás üzembe helyezésének. Vizsgálatainkhoz Németországot a rendkívül nagy beépített nap és szélerőmű kapacitás miatt választottuk a ma még jelentős fosszilis termelésű országok közül. Bár ma még kérdéses, hogy működni fognak-e újra atomerőművek Németországban, de egy lehetséges jövőképként érdemes megvizsgálni ennek hatását is a villamosenergia-termelés dekarbonizációja során.

Módszerek

A számításainkat múltbéli, 2025-ös adatsorokra végeztük a saját fejlesztésű EnergyScal nevű, Python nyelven írt szoftverrel. A németországi erőművek által előállított villamos energia órás felbontású mennyiségét és a rendszerterhelést az Entsoe Transparency Platformról [8] töltöttük le. Ebben rendelkezésre állt az időjárásfüggő megújuló erőművek által előállított villamosenergia mennyisége és az ország villamosenergia fogyasztása is. Az egyes erőműtípusok termelésének fel- és leskálázásával lehetséges olyan forgatókönyvek vizsgálata, amikor például a klímavédelmi törekvésekkel összhangban bezárják a széntüzelésű erőműveket, de

© Magyar Nukleáris Társaság, 2026

helyettük új nap- és szélerőműveket vagy atomerőműveket építenek.

A vizsgált forgatókönyv csomagok az alábbiak voltak:

A: fokozott megújuló – ebben az esetben a nap- és szélerőművek termelését másfélszeresére (A1) vagy pedig két és félszeresére (A2) növeltük.

A második forgatókönyv csomag, B: nukleáris + megújuló. Ez a meglévő erőművek mellett már új atomerőművek üzembe helyezését is feltételezi. Ezen belül – az egyszerűség kedvéért – mindkét forgatókönyv 25 GW nukleáris zsinórtermelést feltételez a nap 24 órájában. A B1-es forgatókönyvben a nap és szélerőművek beépített teljesítményét nem változtattuk azért, hogy megvizsgáljuk, mi történne, ha csak atomerőműveket építenénk. B3 esetén a 25 GW atomerőmű mellett másfélszeresére növeltük a nap- és szélerőművek termelését is (1. táblázat).

Forgatókönyv	Naperőmű beépített teljesítmény GW	Szélerőmű beépített teljesítmény GW	Atomerőmű beépített teljesítmény GW
A1	129,6 (1,5x)	108,6 (1,5x)	-
A2	216 (2,5x)	181 (2,5x)	-
B1	86,40 (1x)	72,4 (1x)	25
B3	129,6 (1,5x)	108,6 (1,5x)	25
Valós (2025)	86,4	72,4	-

1. táblázat: *A nap-, szél- és atomerőművek beépített teljesítménye az alkalmazott forgatókönyvekben*

A lignitet és az egyéb szénfajtákat használó erőművek, valamint az olajtüzelésű erőművek termelése nulla az A1, A2, B1 és B3 forgatókönyvben is. Erre a feltételezésre azért volt szükség, mert a lehető legkisebb fosszilis energiahordozófelhasználást és ezzel összefüggésben CO_2-kibocsátást szerettünk volna elérni. A biomassza alapú és a vízerőművek által előállított villamos energiát nem változtattuk, tehát ezeknél az erőműveknél a valós 2025-ös termelési adatokat használtuk. A földgáztüzelésű erőművek az A1, A2, B1 és B3 forgatókönyvben csak akkor állítanak elő villamos energiát, ha a hazai termelés más forrásokból nem tudná ellátni az igényeket. A lehető legkisebb CO_2 kibocsátás eléréséhez ezeket a 486 g/kWh [6] karbonintenzitású villamos energiát termelő erőműveket csak az import kiváltására használtuk.

Ahhoz, hogy megvizsgáljuk, hogy a 2025-ös valós villamosenergia-termelő erőműflottához képest a módosított A1 - B3 forgatókönyvekben alkalmazott „low-carbon" erőművek hogyan befolyásolták volna az importpótló földgázos termelés mennyiségét és ezzel összefüggésben a karbonintenzitást, számításainkat elvégeztük a valós erőmű flottára is. Ekkor az erőművek által előállított villamos energia mennyiségét nem változtattuk. Az A1-B3-as forgatókönyvekhez hasonlóan az import villamos energiát itt is földgáztüzelésű erőművekkel pótoltuk a karbonintenzitás számításakor.

Az import villamos energia mennyiségét minden órára a következő képlettel meghatároztuk meg:

$$Import(h) = Rendszerterhelés(h) - Hazai\ termelés(h) \quad (1)$$

A villamos energia karbonintenzitását az alábbiak szerint számítottuk.

Első lépésként ki kell számítani az adott erőmű termelésének arányát ($Teljtermresz_n$) a teljes termelésből az adott erőműtípus által előállított villamos energia ($Term_n$) és az összes erőmű által előállított teljes termelés hányadosaként:

$$Teljtermresz_n = \frac{Term_n}{\sum_1^N Term_n} \quad (2)$$

Következő lépésként a CO_2 kibocsátási faktorokat ($karbintfact_n$) az adott erőműtípus termelésének arányával súlyozzuk, így megkapjuk a villamos energia karbonintenzitását.

$$Karbonintenzitás_{forgatókönyv} = \sum_1^N Teljtermresz_n * karbintfakt_n \quad (3)$$

A különböző erőművek által megtermelt 1 kWh villamos energiára vonatkozó teljes életciklusra vonatkozó CO_2 kibocsátási faktorokat ($karbintfakt_n$) a National Laboratory of the Rockies [6] kiadványából vettük.

Az import-export és a karbonintenzitás számításakor órás felbontású adatokkal dolgoztunk. Az adott hét karbonintenzitását az egyes órák karbonintenzitásának az adott hét termeléséből való részesedésével történő súlyozással számoltuk.

Eredményeinket a terjedelmi korlátok miatt csak egy téli és egy nyári hónap négy-négy hetére végeztük el. A vizsgált első hónap 2025 januárja volt. A vizsgált négy hét: január 6-12., 13-19., 20-26. és jan. 27-febr. 2. voltak.

A vizsgált nyári hónap 2025 júliusa volt. Ebben a hónapban vizsgált hetek június 30-július 6., július 7-13., 14-20., és 21-27. voltak.

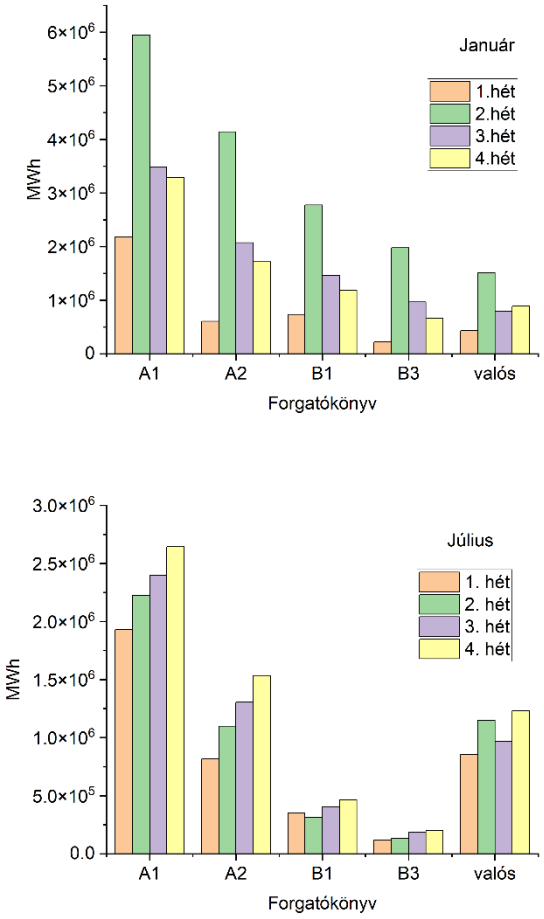
Eredmények

1. A villamosenergia-import kiváltásához szükséges, földgázerőművel előállított villamos energia mennyisége a vizsgált négy módosított és a valós erőműflottát alkalmazó forgatókönyvben

A 2. ábrán látható, hogy a különböző forgatókönyvekben használt erőmű flottákkal mennyi - földgázerőművel megtermelt - importpótlásra lett volna szükség 2025 januárjának vagy júliusának négy hetében.

A 2. ábrát vizsgálva a januárra és júliusra kapott eredményeket nézve is kijelenthető, hogy amennyiben leállítják a szén, olaj és földgázerőművek termelését, de csak másfélszeresére növekszik a nap- és szélerőművek termelése (A1), jelentős mennyiségű importot kellene kiváltani valamilyen időjárástól független energiaforrással, mint például a vizsgálatunkban alkalmazott kombinált ciklusú gázerőművekkel. Az energiatárolás bizonyos napokon segíthetne az import csökkentésében, de egy napon belül sokszor több mint 100 GWhtal volt nagyobb a fogyasztás a termelésnél. Ilyen nagy mennyiségű villamos energia tárolására ma még egy európai ország sem képes.

© Magyar Nukleáris Társaság, 2026



2. ábra: *Az importot helyettesítő földgáztüzelésű erőművekkel előállított villamos energia mennyisége a négy vizsgált januári héten (fölső ábra) és júliusra (alsó ábra) az A1, A2, B1 és B3 forgatókönyvekre és a valós esetre*

Január első hetében 10,46*10⁶ MWh, a második hetében 10,11*10⁶ MWh, a harmadik héten 10,1*10⁶ MWh, míg a negyedik héten 9,9*10⁶ MWh volt a heti összfogyasztás. A kizárólag a megújulók felskálázásával számoló forgatókönyvek esetén (A1 és A2) a vizsgált négy héten ~20-60%-t importból vagy pedig esetünkben az azt pótló földgáztüzelésű termeléssel kellett volna fedezni a fogyasztást. Az atomerőműveket alkalmazó B1 és B3 esetén ez az arány 30%-nál kisebb volt. Júliusban kicsit kevesebb, 8,7*10⁶, 8,4*10⁶, 8,2*10⁶ és 8,3*10⁶ MWh volt a heti villamosenergia-fogyasztás. Még az A1 és az A2 esetén is „csupán" körülbelül 20-30%-át kellett fedezni a fogyasztásnak importból vagy pedig földgáztüzelésből. B1 és B3 esetén a fogyasztásnak mindössze 10%-nál kevesebbet volt szükséges nyáron ilyen forrásból fedezni.

Például január első hetére, amennyiben a fosszilis erőművek leállításra kerülnek, A1 esetén körülbelül 5-ször, A2 esetén 1,4-szer, B1 esetén 1,7-szer több import villamos energiát kellett volna pótolni a valós 143 GWh értékhez képest. Ezzel szemben a B3 esetén, mikor egyaránt növeltük a nap- és szélerőművek termelését, és még 25 GW atomerőművet is bekapcsoltunk, ezen a héten csak körülbelül feleannyi földgázos termelésre lett volna szükség az import pótlására, mint a valós esetben.

A többi januári héten hasonló tendenciákat látunk. A legtöbb földgáz akkor kell, ha a fosszilis erőműveket kizárólag a nap- és szélerőművek „felskálázásával" pótoljuk, de „csak" ~130 GW nap- és 109 GW szélerőművet építünk be (másfélszeres forgatókönyv (A1)).

Az A2-es forgatókönyvnél, mikor már 216 GW-ra növeljük a naperőművek és 181 GW-ra a szélerőművek beépített teljesítményét, már kevesebb importot kellett volna pótolni a gázerőművekkel, de ilyen sok nap- és szélerőmű építése jelentős költséggel járna [9]. Ráadásul a nap- és szélerőművek gyártásának az egységnyi megtermelt energiára eső nyersanyagigénye sokkal nagyobb, mint az atomerőműveké [10], ezért a véges készletek (hatékony gyártási kapacitások) miatt nem növelhető tehát korlátlanul a nap- és szélerőművek beépített teljesítménye sem.

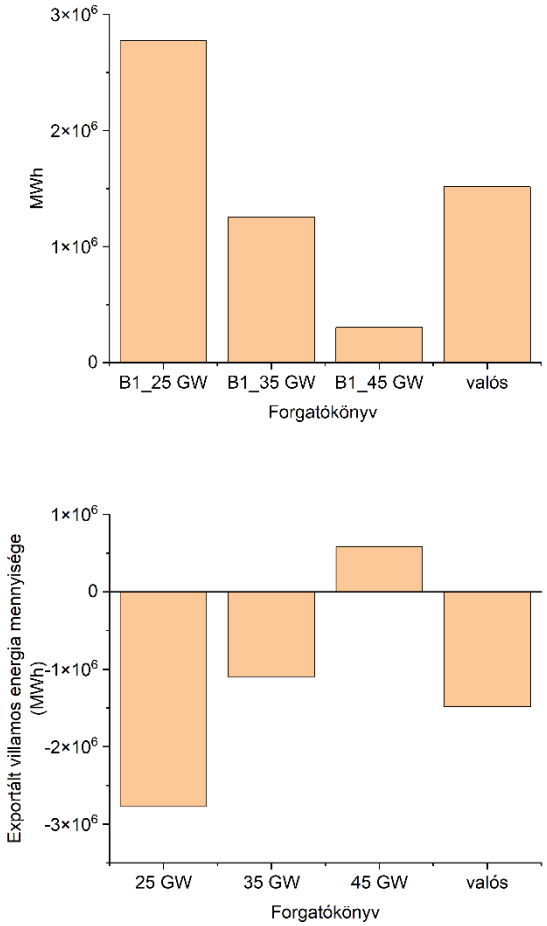
Bár atomerőműveket építeni drágább, mint nap- vagy szélerőműveket létesíteni, ráadásul kezelni kell a keletkező radioaktív hulladékot is, de az atomerőműveknél a sokkal nagyobb kapacitásfaktor miatt a legtöbb esetben kisebb beépített teljesítmény is jelentős importigény- és karbonkibocsátás-csökkenést okoz. Jól mutatják ezt a B1 forgatókönyvre kapott eredmények, mikor csak 25 GW atomerőművel pótoljuk a bezárt szén, olaj és gázerőműveket. A B1 forgatókönyvre még januárban is a hónap négy hetéből háromra kisebb földgázigényt kapunk, mint a közel 130 GW új naperőmű és 109 GW szélerőmű kiépítését igénylő A2-re. Júniusban (2. ábra jobb oldali panel) még jobban látszik, hogy Németországban már 25 GW beépített teljesítményű atomerőmű segítségével is jelentősen lehet csökkenteni a villamosenergia-importigényt.

A legkisebb importált villamosenergia-mennyiséget – melyet a számításainkban földgáztüzelésű erőművekkel pótoltunk – a B3 forgatókönyv adta, amikor növeltük a nap- és szélerőművek által előállított villamos energia mennyiségét, de emellett 25 GW villamos teljesítményt szolgáltattak az atomerőművek is. Ez jól mutatja, hogy a környező országokból behozott villamos energia mennyiségének csökkentéséhez mind megújuló energiaforrást hasznosító erőművekre, mind atomerőművek működtetésére szükség van Németországban.

Január második hetére kaptuk a legnagyobb importigényt, amikor leállítottuk a fosszilis üzemanyagot használó erőműveket. Megvizsgáltuk milyen hatása van a B1-es forgatókönyvre (amikor csak az atomerőműveket adjuk hozzá a termeléshez), ha nem 25 GW, hanem 35 vagy 45 GW teljesítményű nukleáris termelőt vonunk be a vizsgálatba. A 3. ábrán bemutatjuk erre a hétre e három esetre kapott földgázüzemű termelést és ezzel összefüggésben Németország által importált-exportált villamos energia mennyiségét is.

Mint az a 3. ábra fölső paneljén látható, az import kiváltásához szükséges földgáztüzeléssel előállított villamos energia mennyisége jelentősen kisebb, ha több, 45 GW atomerőművet alkalmazunk. Amennyiben az import-export arányt úgy vizsgáljuk, hogy az óránkénti exportot pozitív, míg az importot negatív értéknek vesszük, az óránkénti értékek összege 25 és 35 GW atomerőmű esetén még negatív, ami jelentős importot mutat. 45 GW atomerőmű esetén már pozitív értéket kapunk, ami jelzi, hogy heti viszonylatban exportőrré vált az ország.

© Magyar Nukleáris Társaság, 2026



***3. ábra**: Az import kiváltásához szükséges földgázerőmű termelés január 2. hetére 25 GW, 35 GW vagy 45 GW atomerőművel, illetve a valós erőmű flottára (fölső panel) és az ország villamosenergia-exportja (alsó panel)*

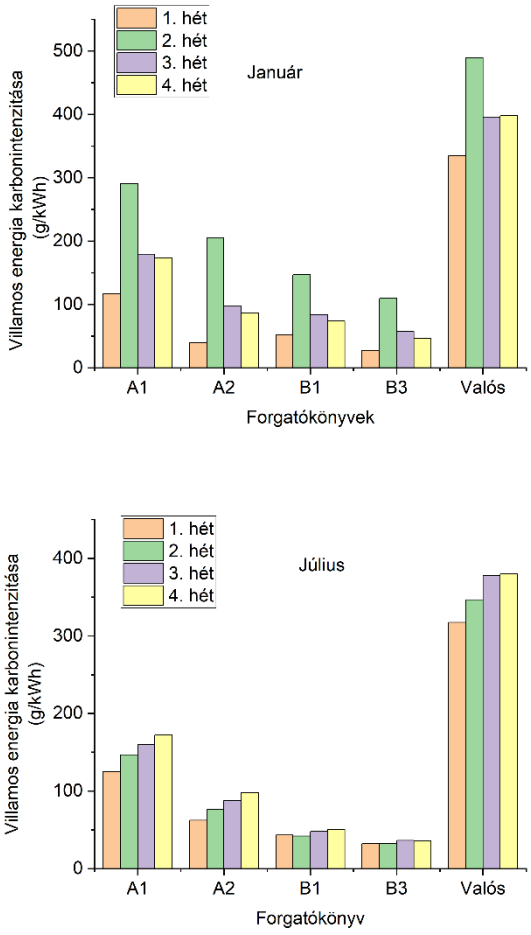
2. A villamos energia karbonintenzitása a vizsgált négy módosított és a valós erőműflottát alkalmazó forgatókönyvekben

Következő lépésként megvizsgáltuk, hogy hogyan hatott volna 2025-ben az előállított villamos energia karbonintenzitására, ha a fosszilis erőművek nap- és szélerőművekkel és/vagy atomerőművekkel helyettesítették volna.

Mint azt a 4. ábra ötödik (valós) oszlopcsoportja mutatja, 2025-ben még igen sok – 300 grammnál több – CO_2 került a légkörbe Németországban egy kWh villamos energia előállításakor, igaz éves átlagban csökkenő tendenciát láthatunk. Mivel még az importpótló földgázüzemű termelés nélkül is sok esetben 400 g/kWh-nál nagyobb volt a karbonintenzitás, az ilyen erőművekkel történő pótlás nem befolyásolta jelentősen az egységnyi termelésre vonatkozó kibocsátást.

A low-carbon A1-B3 forgatókönyvekre ez már nem igaz. Ezeknél a forgatókönyveknél, ha nem vesszük figyelembe az import kiváltásához szükséges gázerőművek CO_2 kibocsátását, igen kicsi a karbonintenzitás, hiszen ekkor nagy részben naperőművekkel (43 g/kWh), szélerőművekkel (13 g/kWh), biomassza felhasználásával (52 g/kWh), vízenergiával (13 g/kWh) és a B1 és B3 esetén atomerőművekkel (13 g/kWh) állítottuk elő a villamos energiát [6]. Amennyiben már az importpótló földgáztüzelésű erőművek kibocsátását is számba vesszük, a kizárólag megújuló energiát alkalmazó forgatókönyvekben (A1 és A2) a jelentős importpótlás miatt mindkét hónapban sok esetben 100 g/kWh feletti kibocsátást kapunk. Az atomerőműveket is tartalmazó B1 és B3 esetén januárban a kevesebb földgáztüzelés miatt kisebb, a legtöbb esetben 100 g/kWh alatti CO_2 kibocsátást kapunk.

Júliusban még jobban látszik a stabil low-carbon atomerőművi termelés hatása, hiszen a B3 forgatókönyvre erre a hónapra mind a négy hétre igen alacsony, 50 g/kWh alatti értékeket kapunk.



***4. ábra:** A Németországban termelt villamos energia karbonintenzitása 2025 januárjában és júliusában*

Hogy csökkenjen a ma még döntően benzint és gázolajat használó közlekedés CO_2-kibocsátása, nagyszámú elektromos járműre lesz szükség. A szénnel, olajjal vagy fosszilis gázzal történő fűtés üvegházgáz-kibocsátását szintén jelentősen csökkenteni kell a háztartásokban. Ez az épületek szigetelése mellett lehetséges a régi kazánok hőszivattyúkra cserélésével és a fűtési rendszerek átalakításával. Ahhoz, hogy az elektromos meghajtású járművek vagy a hőszivatytyúk használata jelentős CO_2-kibocsátás csökkentést érjen el, nagy mennyiségű, kis karbonintenzitású villamos energia előállítása szükséges a jövőben. Bár Németországban a megújuló energiaforrások (nap, szél, víz, biomassza) használatának növelésével jelentősen csökkenthető lenne a villamosenergia-termelés CO_2-kibocsátása, számításaink szerint igazán kis CO_2 kibocsátású elektromos autózás vagy például

© Magyar Nukleáris Társaság, 2026

széleskörű villanyfűtés megvalósításához a megújuló energiaforrások használata mellett a nukleáris energiatermelés visszaállítása szintén szükséges lenne.

Összefoglalás

A saját fejlesztésű EnergyScal nevű numerikus modellel és szoftverrel végzett számítások alapján kijelenthető, hogy a két vizsgált 2025-ös hónapban Németországban a szén-, olaj- és gázerőművek működésének leállítása esetén még a nap- és szélerőművek által előállított villamos energia két és félszeresére növelése esetén is sok esetben – főleg a téli hetekben – jelentősen nőtt volna a villamosenergia-import. Amennyiben modellünkben 25 GW atomerőművet is működtettünk, akkor az importigény a legtöbb esetben kisebb volt, mintha ennél sokkal nagyobb (akár 216 GW nap és 181 GW szél) beépített teljesítményű, megújulókra épülő erőmű parkot építettünk volna ki. A legkedvezőbb eredményeket a vizsgált négy forgatókönyv közül akkor kaptuk, ha 25 GW atomerőmű létesítése mellett a nap- és szélerőművek által előállított villamos energia mennyiségét is másfélszeresére növeltük.

Január legkedvezőtlenebb második hetét vizsgálva, a meglévő nap- és szélerőművekhez járuló 25 GW nukleáris termelés mellett heti összesítésben még jelentős import volt szükséges, de 45 GW esetén már exportálni tudott az ország. Ezek az eredmények jól mutatják a megbízható nukleáris energiatermelés lehetséges pozitív szerepét az igények ellátásában, amennyiben Németországban a terveknek megfelelően legkésőbb 2038-ban leáll az utolsó szénerőmű is.

Számításaink megmutatták azt is, hogy Németországban az előállított villamos energia karbonintenzitása azzal is jelentősen csökkenthető, ha a fosszilis erőműveket leállítjuk, és helyettük új nap- és szélerőműveket építünk, de ezek mellé a sötétszélcsend (dunkelflaute) esetek kezelésére vagy pedig a csúcsigények kiszolgálására az ellátást más forrásokból, például kombinált ciklusú földgáztüzelésű erőművekkel (CCGT) biztosítjuk. Számításaink szerint, ha a CCGT flottát kizárólag importpótlásra használják, akkor a nap- és a szélerőművek még jelentősen megnövelt beépített teljesítmény mellett is jelentős földgázigényt fognak generálni. Ilyen nagy mennyiségű földgáz megvásárlása jelentős költséggel jár.

Ezek az eredmények jól mutatják, hogy atomerőművek hiányában egy döntően nap- és szélerőművekre támaszkodó energiatermelési rendszerben az importpótló fosszilis tüzelés csökkentéséhez igen nagy léptékű energiatárolásra, továbbá a fogyasztók alkalmazkodására is szükség van ahhoz, hogy a termelés és a fogyasztás egyensúlya tartósan fennmaradjon.

A teljes életciklusra vonatkozó karbonkibocsátás, ha nem számolunk az import pótlásához szükséges fosszilis-alapú termelés CO_2 kibocsátásával, nagyon alacsony mind a négy vizsgált forgatókönyvre. Ha azonban ezt is figyelembe vesszük, akkor a kizárólag a nap- és szélerőművek termelésének felskálázását modellező forgatókönyvek esetén sok esetben 100 g/kWh-nál nagyobb CO_2 egyenértékű üvegházhatású gáz kibocsátást kapunk.

A legkevesebb üvegházhatású gáz mind januárban, mind júliusban akkor került a levegőbe, ha a megújuló energiaforrást hasznosító erőművek mellett működtek atomerőművek is a rendszerben. Nem csak a villamosenergia-import csökkentésében, hanem a villamosenergia-termelés közben kibocsátott üvegházhatású gázok mennyiségének csökkentésében is fontos szerepet játszhatnának tehát az atomerőművek Németország dekarbonizációja során.

A számításainkban használt modellek korlátai

A fenti egyszerű forgatókönyveket használó számítások célja a low-carbon termelők (nap- és szélerőművek, atomerőművek) lehetséges szerepének bemutatása volt a villamosenergia-termelés dekarbonizációja során Németországban. Az egyik fő korlát az, hogy a szél- és naperőművek beépített teljesítményének adott mértékű növelése nem biztos, hogy ugyanakkora mértékű villamosenergiatermelés-növekedést okoz. További egyszerűsítés volt, hogy az általunk modellezett atomerőművek non-stop a beépített teljesítményüknek megfelelő villamos teljesítményt szolgáltattak. Bár az atomerőművek rendelkezésre állása kiemelkedően jó (az Európai Unióban meghaladja a 80%-ot), még ezeknél is le kell állítani időnként a reaktorokat például karbantartáskor. A karbonintenzitás számításakor a National Laboratory of the Rockies (NLR, USA) által publikált, az adott erőműtípusra vonatkozó medián g/kWh kibocsátását használtuk. Amennyiben egy régi, elavult erőműről van szó, akkor a CO_2 kibocsátás lehet nagyobb, de ha egy korszerű erőművet használunk, az üvegházhatású gázok kibocsátása lehet kisebb is. Számításaink során az egyszerűség kedvéért földgáztüzelésű erőművekkel pótoltuk a behozatalt. A valóságban, ha az import villamos energia karbonintenzitása kisebb, mint a földgázos erőművekre jellemző 486 g/kWh, akkor a karbonintenzitás is kisebb.

© Magyar Nukleáris Társaság, 2026

Irodalomjegyzék

[1] World Nuclear Association: Country profiles: Nuclear power in Germany (https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany)

[2] Energy charts info- Germany https://energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=en&c=DE&interval=year&year=2025&legendItems=0wh

[3] Electricity maps- https://app.electricitymaps.com/map/zone/DE/yearly

[4] [Ember: Yearly Electricity Data (2026) – with major processing by Our World in Data https://ember-energy.org/data/yearly-electricity-data/

[5] European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). Data / Power statistics (https://www.entsoe.eu/data/power-stats/)

[6] National Laboratory of the Rockies: Life Cycle Emissions Factors for Electricity Generation Technologies (https://data.nlr.gov/submissions/171)

[7] Eur-lex, Euriope https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=intcom:C%282022%29631

[8] European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). Transparency platform. https://www.entsoe.eu/data/transparency-platform/

[9] Edward P. O'Donell: A Comparison of the Levelized Cost of Energy (LCOE) of Various Generation Sources (https://whitestrandllc.com/wp-content/uploads/2025/12/LCOE_StudyDecember2025.pdf)

[10] [S. Wang, Z. Hausfather, S. Davis, J. Lloyd, E. B. Olson, L. Liebermann, G. D. Núñez-Mujica, J. McBride: Future demand for electricity generation materials under different climate mitigation scenarios. Volume 7, Issue 2, 15 February 2023, 309-332.

© Magyar Nukleáris Társaság, 2026