

Lesz-e globális áttörés a kis moduláris reaktorok telepítésében a nagy számítási központok folyamatosan növekvő villamos energia felhasználása miatt?

Végh János

Nyugdíjas fizikus (EC JRC Petten, MTA EK Budapest)

A mesterséges intelligencia (MI) alkalmazások használata rohamosan terjed, és emiatt megnőtt az igény nagy számítógépes szerverparkok működtetésére. A modern MI programok futtatásához azonban sok villamos energia kell, ezért fokozatosan új nagyfogyasztók jelentek meg a villamosenergia-piacon.

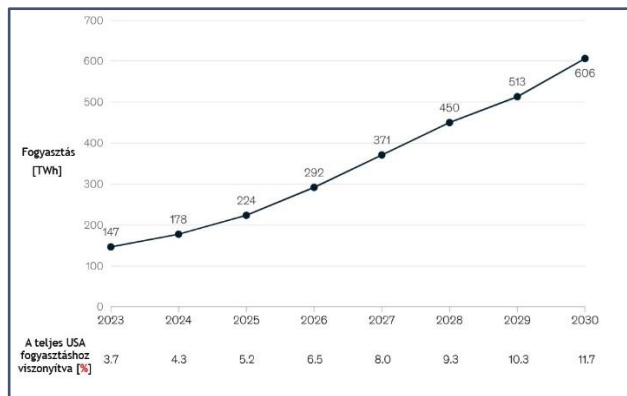
Az atomenergia-ipar hamar felismerte, hogy a fenti új nagyfogyasztók megjelenése milyen lehetőségeket jelenthet az iparág számára és képviselői hangsúlyozzák, hogy ezt az új igényt kis moduláris reaktorok (angolul Small Modular Reactor, SMR) telepítésével célszerű kielégíteni. A cikk bemutatja a nagy adatközpontok energiafogyasztásának növekedési dinamikáját és ismerteti azokat az SMR típusokat, melyek telepítését a szállítók 2035 előtti időpontra ígérik. A mai piaci tendenciák és a népszerű SMR típusok leírása után a cikk kitér a világban folyó legfontosabb SMR fejlesztésekre és telepítési tervekre is.

Végül mérőadó nemzetközi szakmai elemzések alapján azt tárgyalom, hogy a fentiek miatt várható-e a következő évtizedben áttörés bizonyos SMR típusok telepítésében.

Bevezetés

A nagy adatközpontok folyamatosan növekvő villamosenergia-fogyasztása

A Microsoft, az Amazon, a Google, az Apple és a Meta rendelkeznek a világ legnagyobb adatközpontjaival. A Nemzetközi Energiaügynökség (International Energy Agency - IEA) által összeállított jelentés [1] szerint 2022-ben a világ nagy adatközpontjai, a mesterséges intelligencia alkalmazások, valamint az ún. „kriptoaluta-bányászat” által együttesen felhasznált energia értéke kb. 460 TWh volt (a Microsoft és a Google fogyasztása 18, illetve 22 TWh volt). Bár ez a szám elsőre nagyinak tűnhet, valójában a 2022-es teljes globális villamosenergia-fogyasztás (24400 TWh) mindössze 2%-át tette ki. A világ nagy adatközpontjainak fogyasztása az elmúlt években folyamatosan nőtt, és úgy tűnik, hogy ez a tendencia a jövőben is stabilan folytatódik. Az 1. ábra az Egyesült Államok nagyvállalati adatközpontjaira mutatja a villamosenergia-fogyasztás előrejelzését [2] alapján. Látható, hogy a fogyasztás becsült növekedése meghaladja az évi 20%-ot, és értéke már 2030 előtt elérheti az USA teljes fogyasztásának 10%-át.



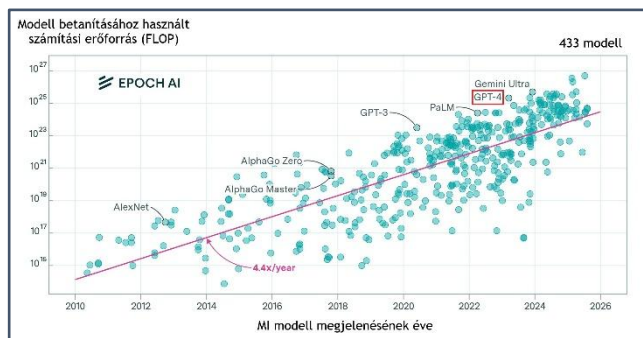
1. ábra: Az USA adatközpontok előre jelzett fogyasztása [2] alapján

Az áramszolgáltató vállalatok természetesen igyekeznek kielégíteni az új nagyfogyasztók igényeit, de a valóságban lehetőségeik meglehetősen korlátozottak, főleg, ha egy olyan piacon működnek, ahol szigorúak a CO₂-kibocsátási limitek. A gyakorlatban ezek a korlátozások új kapacitások kiépítését csak alacsony CO₂-kibocsátású villamosenergia-termelő technológiák, mint például a vízenergia, az egyéb megújuló energiaforrások (pl. szél-, nap- és geotermikus energia) és az atomenergia alkalmazásával teszik lehetővé. Mivel a legtöbb fejlett országban új vízenergia-kapacitás nem elérhető, ezért lényegében csak az egyéb megújulók és az atomenergia maradnak. Az időszakosan rendelkezésre álló megújuló energiaforrások azonban nem mindig tudják kielégíteni a szigorú hálózati stabilitási és rendelkezésre állási követelményeket, ezért az atomenergia felhasználása egy kézenfekvő opció. Egy nagy, III. generációs atomerőmű engedélyezése és felépítése viszont nagyon idő- és tőkeigényes folyamat, ezért az atomreaktor-gyártók azt javasolják, hogy a nagy adatközpontok energiaellátását kis moduláris reaktorok telepítésével oldják meg. Bőséges energiafogyasztásuk mellett a nagy adatközpontok nagy mennyiségű hűtővizet is használnak, de ez a probléma megfelelő telephely kiválasztással kezelhető.

Az OpenAI által fejlesztett ChatGPT chatbot jelenleg a leggyakrabban használt interaktív mesterséges intelligencia eszköz (GPT = Generative Pre-trained Transformer = új szöveget generáló, előtanított MI nyelvi modell). A Business Energy UK becslése [3] szerint a ChatGPT által globálisan felhasznált villamos energia teljes mennyisége 2024-ben körülbelül 15 TWh volt. Ez közel van egy 2000 MW_e nettó villamosenergia-teljesítményű atomerőmű teljes éves termeléséhez, ilyen pl. a négy VVER-440 blokkal rendelkező Paksi Atomerőmű.

2010 és 2024 között jelentősen megnőtt a legújabb MI modellek betanításához felhasznált erőforrások mennyisége. A növekedési ütem évente körülbelül 4.4-szeres volt és 2023-ra a MI betanításhoz felhasznált teljes

számítási erőforrás elérte a 21x1025 flop (lebegőpontos művelet másodpercenként) értéket (lásd a 2. ábrát).



2. ábra: MI modellek betanításához felhasznált erőforrások növekedése [4] alapján

Az SMR, mint ideális megoldás a nagy adatközpontok villamosenergia-ellátására

Egy nagy, modern adatközpont teljesítményigénye ma 100 és 200 MW_e között van, így egy megfelelő méretű SMR alkalmas lehet egy adatközpont ellátására. További előny, hogy egy SMR autonóm módon, vagyis hálózaton kívül (off-grid) is képes működni. A nagy adatközpontok elterjedése és a mesterséges intelligencia alkalmazások gyorsan növekvő használata így elvileg új lehetőségeket teremt SMR telepítésre és hasznosításra. Számos ország felismerte ezt és néhány projekt előkészítése már Európában is elindult, részletesen lásd pl. az [5] honlapon: Norvégia (Norsk Kjekraft); Hollandia (Thorizon); Egyesült Királyság (Rolls Royce, Holtec, Westinghouse); Finnország (Steady Energy); Svédország (Kärnfull Next).



3. ábra: Egy nagy adatközpontot ellátó SMR erőmű és egy hidrogént termelő „zöld” elektrolízisgyár koncepciója (Forrás: Norsk Kjekraft)

A tervezett SMR típusok az evolúciós könnyűvízes reaktoroktól (light-water reactor – LWR) a sóolvadékos reaktorokon (molten-salt reactor – MSR) át az innovatív megoldásokig (pl. a finn LDR-50) terjednek, az alkalmazási területek között pedig távfűtés, hidrogéntermelés, valamint a nagy adatközpontok és a távoli területeken működő ipari nagyfogyasztók (pl. bányák) villamosenergia-ellátása szerepel.

A mai SMR típusok színes palettája

Kis moduláris reaktorok az érdeklődés középpontjában

Az elmúlt évtizedben az atomipar érdeklődése az SMR piac által kínált potenciális lehetőségek kiaknázása felé fordult, ennek hatására a piac valóban mozgásba lendült. Két ország határozottan a többiek előtt jár az SMR versenyben, nevezetesen Oroszország és Kína (lásd [6]). Oroszországban már üzemel egy úszó SMR típus (az Akagyemik Lomonoszov), és jelenleg ennek a létesítménynek a reaktorát fejlesztik tovább a RITM-200/400 reaktortípusok kialakításához (ezeket a jövőben úszó és szárazföldi SMR blokkokban tervezik használni). A Szibéria távoli sarkvidéki részein üzemelő Akagyemik Lomonoszov úszó nyomottvízes erőműben két KLT-40S típusú reaktor biztosít villamosenergia-ellátást és hőtermelést, 35 MW_e/modul termelési kapacitással. Kínában már szintén évek óta működik egy magas hőmérsékletű, gázhűtéses, moduláris kavicságyas (pebble bed) demonstrációs reaktor, a HTR-PM, melynek kapacitása 110 MW_e/modul.

Más országokban (különösen az USA-ban és az Egyesült Királyságban) is léteznek már kiforrott SMR tervek. Némelyikük már hatósági engedéllyel is rendelkezik, vagy közel van a hatósági jóváhagyáshoz, de SMR erőművek építése még nem igazán kezdődött el. Az Európai Unió tagállamai – Franciaország vezetésével és az Európai Bizottság jelentős támogatásával – szintén aktívan fejlesztenek bizonyos SMR típusokat, de a megvalósítási projektek többnyire még a telephely kiválasztás, a hatósági engedélyezés, a megvalósíthatósági tanulmány készítése, a részletes tervezés, vagy a tőkebevonás fázisában vannak. A különféle SMR típusok hatósági engedélyezése az USA-ban és az EU-ban viszont elég lassan halad (lásd pl. [7]):

- Az amerikai nukleáris hatóság, az US NRC eddig csak a Nuscale által tervezett VOYGR típusra adott ki megfelelőségi tanúsítványt (a VOYGR egy 77 MW_e/modul kapacitású nyomottvízes reaktor [8]). Az US NRC jelenleg számos SMR típus előzetes felülvizsgálatát végzi, de új tanúsítványokat egyelőre még nem adott ki.
- Az Egyesült Királyságban szintén több SMR típus részletes értékelése kezdődött meg az általános típusértékelési (Generic Design Assessment – GDA) eljárás keretében (lásd pl. [9]).

A jelenleg legnépszerűbb SMR típusok



4. ábra: A különféle SMR típusok „palettája” (a NAÜ-kategorizálás szerint csoportosítva)

Jelenleg globálisan több tucat nagyon eltérő SMR terv létezik, nagyon eltérő fejlesztési és megvalósítási fázisban. Az SMR típusokat a [10] NEA áttekintés, a [11] NAÜ ismertetés, valamint a [12] és [13] EU anyagok alapján rendszereztem és az alábbiakban ezt ismertetem röviden. A NAÜ a különböző SMR típusokat az alábbi fő kategóriákba sorolja (lásd 4. ábra és a [11] riport):

1. Szárazföldi, vízhűtéses típusok

Ezek a tervek túlnyomórészt a jelenleg üzemelő (nagy) erőművi reaktorokban alkalmazott, bevált nyomottvízes (Pressurized Water Reactor – PWR) vagy forralóvízes (Boiling Water Reactor – BWR) technológiákon alapulnak.

- Üzemelő reaktorok: **nincs**
- Építés alatt álló reaktorok:
 - **ACP-100** (Kína/CNNC, 100 MW_e integrált PWR, tervezett indulás 2026),
 - **CAREM** (Argentína, 25 MW_e integrált PWR, tervezett indulás 2028).
- Rövid távú (2035 előtti) telepítési tervekkel rendelkező reaktorok:
 - **RITM-200N** (Oroszország, 55 MW_e integrált PWR, részletes tervezés),
 - **VOYGR** (USA/Nuscale, 77 MW_e/modul integrált PWR, NRC jóváhagyta),
 - **AP300** (Westinghouse, az US NRC által engedélyezett és üzemelő AP1000 passzív PWR egykörös, 300 MW_e változata, az NRC jelenleg vizsgálja),
 - **BWRX-300** (USA/GE Hitachi, passzív 300 MW_e BWR természetes cirkulációs hűtéssel, megfelelőségét jelenleg az Egyesült Királyságban GDA felülvizsgálat keretében elemzik; a kanadai Darlington telephelyen építési engedéllyel rendelkezik és az első blokk várható indulása 2029-re tehető; európai érdeklődés is van),
 - **LDR-50** (Franciaország/Calogena + Finnország/Steady Energy, alacsony hőmérsékletű „távűtő” reaktor, eredetileg a finn VTT tervezte. Az 50 MW_{th} PWR hűtését párolgás biztosítja, a keletkezett hő távfűtésre, ipari gőz termelésére és tengervíz sótalánításra tervezik felhasználni),
 - **PWR-20** (USA/Last Energy + EU/Project Quantum Consortium, 20 MW_e teljesítményű PWR, négykörös, moduláris, kényszerített keringtetésű),
 - **SMR 470** (Egyesült Királyság/Rolls-Royce, 470 MW_e integrált PWR, háromkörös, passzív biztonsági funkciókkal, az Egyesült Királyságban GDA felülvizsgálat alatt),
 - **NUWARD** (Franciaország/EdF, 340 MW_e integrált PWR, tervezési fázis),
 - **SMR 300** (Holtec/USA, kétkörös 300 MW_e PWR, részletes tervezési fázis),
 - **SMART** (KAERI + KHNP/Korea és Szaúd-Arábia, 100 MW_e integrált PWR, tervét a koreai nukleáris hatóság már jóváhagyta).

2. Tengeri (úszó), vízhűtéses típusok

Ezek hajóra vagy uszályra szerelt áramtermelő egységek, melyek főleg LWR technológiát alkalmaznak. Olyan távoli helyeken is telepíthetők, amelyek nem csatlakoznak az

országos villamosenergia-hálózathoz (ún. off-grid helyszínek). Oroszország sarkvidéki jégtörő hajók meghajtására is használja őket.

- Üzemelő reaktorok:
 - **KLT-40S** (Oroszország, háromhurkos nyomottvízes reaktor, két blokk összesen 70 MW_e teljesítménnyel, jelenleg a szibériai Pevekben állomásozik).
- Építés alatt álló reaktor: **nincs**
- Rövid távú (2035 előtti) telepítési tervekkel rendelkező reaktorok:
 - **ACPR-50S** (Kína/CGNPC, kompakt, passzív biztonsági funkciókkal ellátott, 50 MW_e nyomottvízes reaktor, részletes tervezési fázisban),
 - **ACPR-100S** (Kína/CNNC, 100 MW_e integrált PWR, alaptervezési fázisban).

3. Folyékony fémekkel hűtött, gyorsneutronos típusok

Ezek a típusok gyorsneutronos reaktor (FR) technológiát alkalmaznak folyékony fém hűtőközeggel: nátriummal, ólommal, vagy ólom-bizmut eutektikummal. Céljuk az úgynevezett zárt nukleáris üzemanyagciklus megvalósítása, amely az uránkészletek sokkal jobb kihasználását biztosítja, mint a jelenlegi LWR típusok.

- Üzemelő reaktor: **nincs**

Megjegyzés: Az orosz BN-800 típus egy nátriumhűtéses gyorsneutronos szaporító reaktor (fast breeder reactor, FBR), melynek villamos teljesítménye 789 MW és a szibériai Belojarszk telephelyen üzemel 2015 óta. Teljesítménye miatt nem tekintik az SMR kategóriába tartozónak, mint ahogyan elődjét sem, az 1980 óta működő 560 MW_e teljesítményű BN-600 reaktort. A reaktor továbbfejlesztett, 1200 MW villamos teljesítményű új verziója sem illik az SMR kategóriába.

- Építés alatt álló reaktorok:
 - **BREST-OD-300** (Oroszország, 300 MW_e ólomhűtéses gyorsreaktor (lead-cooled fast reactor – LFR), a szibériai Szeverszkben épül, üzembe helyezése 2026-ban várható),
 - **Terra SFR** (Terrapower + GE Hitachi, 345 MW_e teljesítményű, nátriumhűtéses gyorsreaktor (sodium-cooled fast reactor – SFR), jelenleg Kemmererben (USA) épül, üzembe helyezése 2030 körül várható).
- Rövid távú (2035 előtti) telepítési tervekkel rendelkező reaktorok:
 - Számos gyorsreaktor van fejlesztés alatt világszerte, köztük a **Newcleo LFR** (30 MW_e francia demonstrátor reaktor), az **Oklo SFR** (USA, nátriumhűtéses gyorsreaktor, 50 MW_e) és az **ALFRED/EU-SMR-LFR** (EU SMR Ipari Szövetség, ólomhűtéses gyorsreaktor, 300 MW_{th}, a konzorciumot az olasz Ansaldo vezeti). Ezek a projektek jelenleg az alap- vagy részletes tervezés, illetve a telephely-kiválasztás fázisában vannak.

4. Sóolvadék hűtésű típusok

Ezen típusok közös tulajdonsága, hogy hűtőközegük folyékony állapotú sóolvadék. A nukleáris üzemanyagot vagy feloldják a keringtetett hűtőközegben, vagy szilárd

formában használják. A típus kedvező tulajdonságai között lehet említeni az alacsony nyomású egyfázisú hűtőközeget, a rugalmas üzemanyagciklust és a nagy hatásfokot.

- Üzemelő reaktor: **nincs**
- Építés alatt álló reaktorok:
 - **Hermes KP-FHR** (Kairos Power/USA, 20 MW_e demonstrációs reaktor, az Oak Ridge (USA) telephelyen épül, üzembe helyezését 2027-ben tervezik)

A HERMES egy TRISO üzemanyagot használó „kavicságyas” (pebble bed) reaktor és az olvadt fluorid csak hűtési célokat szolgál, oldott nukleáris üzemanyag nem található benne. A TRISO (Tristructural Isotropic) egy gömb alakú, rendkívül ellenálló, réteges szerkezetű üzemanyagfajta.

- Rövid távú (2035 előtti) telepítési tervekkel rendelkező reaktorok:
 - **Thorizon One** (Thorizon/NL, cserélhető kazettás üzemanyag-konceptió az anyagkorrozio kiküszöbölésére, 100 MW_e vagy 250 MW_{th} kapacitással),
 - **Seaborg CMSR** (Seaborg/DK, kompakt úszó MSR, 100 MW_e kapacitás),
 - **IMSR400** (Terrestrial Energy/USA, a 400 MW_e integrált MSR a részletes tervezési fázisban van, Kanada befejezte az engedélyezés előtti vizsgálatát).

5. Gázhűtéses típusok

Jelenleg több magas hőmérsékletű, gázhűtéses SMR fejlesztése folyik, ezek a tervek szerint magas hőmérsékletű technológiai hőt és villamos energiát fognak termelni.

- Üzemelő reaktorok:
 - **HTR-PM** (Kína/INET + CNNC, kavicságyas reaktor, 110 MW_e/modul)
 - **HTTR** (Japán/JAEA, magas hőmérsékletű műszaki tesztreaktor, 30 MW_{th}, 2021-ben újraindították a hidrogéntermelés demonstrációjára)
 - **HTR-10** (Kína/INET/Thsinghua Egyetem, 10 MW_e kavicságyas reaktor)
- Építés alatt álló reaktor: **nincs**
- Rövid távú (2035 előtti) telepítési tervekkel rendelkező reaktorok:
 - **XE-100** (X-Energy/USA, 80 MW_e moduláris HTGR (magas hőmérsékletű gázhűtéses reaktor), TRISO üzemanyaggal működik, első blokk Texasban)
 - További gázhűtéses konstrukciókat is fejlesztenek (pl. ALLEGRO GFR), de ezek többnyire még az műszaki tervezési vagy megalapozási fázisban vannak.

6. Mikro-reaktorok

Ezen reaktorok mérete kicsi és termikus teljesítményük maximum 30 MW. Sokféle hűtőközeget használnak, pl. könnyűvizet, héliumot, sóolvadékot és folyékony fémeket. Kanadában és az Egyesült Államokban jelenleg több terv hatósági felülvizsgálat alatt áll, számos más terv viszont még csak a koncepcionális és műszaki tervezési fázisban van.

- Üzemelő reaktor: **nincs**
- Építés alatt álló reaktor: **nincs**
- Rövid távú telepítési tervekkel rendelkező reaktorok:
 - **eVinci** (Westinghouse/USA, 5 MW_e, a gyárilag összeszerelt kialakítás TRISO üzemanyagot használ, a hőt pedig egy csőrendszerrel vezetik el),
 - **Marvel** (DOE+INL/USA, nátrium-kálium hűtésű, 85 kW_{th} teljesítményű mikro-reaktor, amelyet az INL (Idaho National Laboratory) Transient Reactor Test Facility nevű létesítményében fognak tesztelni).

Napjaink legígéretesebb SMR típusai

Az 1. táblázat napjaink legígéretesebb SMR típusait mutatja be. A kiválasztás az adott konstrukció fejlesztési állapota, a kategorizálás pedig a hűtőközeg anyaga alapján történt:

Hűtőközeg →	KÖNNYŰVÍZ	FOLYÉKONY FÉM	OLVADT SÓ	GÁZ
Hely / állapot ↓				
Szárazföldi / működő	Nincs	Nincs	Nincs	HTR-PM / Kína HHR / Japán HTR-10 / Kína
Szárazföldi / építés alatt	ACP100 / Kína CAREM / Argentína	Brest-OD-300 LFR / RU Terra SFR / USA	HERMES FHR / USA	Xe-100 / USA
Szárazföldi / fejlesztés alatt	AP300 / Westinghouse BWRX-300 / USA+EU LDR-50 / F + FI NUWARD / F PWR-20 / USA+EU RITM-200N / RU SMR300 / USA SMR-470 / UK SMART / Dél-Korea VOYGR / USA	Alfred/EU-SMR-LFR / EU Newcleo LFR / EU Oklo SFR / USA	IMSR400 / USA Thorizon / Hollandia	ALLEGRO GFR / CZ-HU-SK-PL-F
Úszó / működő	KLT-40S / RU	Nincs	Nincs	Nincs
Úszó / építés alatt	Nincs	Nincs	Nincs	Nincs
Úszó / fejlesztés alatt	ACPR-50S / Kína ACPR-100S / Kína	Nincs	Seaborg CMSR / Dánia	Nincs

1. táblázat: A 2035 előtti telepítésre legígéretesebb SMR típusok listája

Megjegyzés: A félkövrrel szedett és piros vonallal keretezett tételek az EU SMR Ipari Szövetség által 2024-ben támogatásra kiválasztott SMR típusok első csoportjához tartoznak.

A vízhűtéses konstrukciók (kék szín) dominanciája egyértelműen látható az 1. táblázatban. Ezek többnyire fejlett passzív biztonsági jellemzőkkel rendelkező integrált nyomottvízes reaktorok, és kialakításuk nagymértékben támaszkodik a jelenlegi nagyméretű nyomottvízes reaktorok gyártási, engedélyezési és üzemeltetési tapasztalataira. Ezen reaktorok további előnye, hogy a piacon ma is elérhető, több ezer reaktoréves tapasztalattal rendelkező, elismert gyártók által előállított LWR üzemanyagot használnak. Ezen konstrukciónál a kiegészítő üzemanyag és a keletkező radioaktív hulladékok kezelése szintén már kipróbált és bevált gyakorlat szerint történik, ezért nem kell új üzemanyag-gyártási és radioaktív hulladék-kezelési technológiákat kidolgozni, engedélyeztetni és megvalósítani. Jelenleg ilyen integrált nyomottvízes reaktorok épülnek Kínában és Argentínában, mindkettő üzembe helyezésének dátuma közeli. Nagyon valószínű, hogy Európában az első szárazföldi SMR is egy vízhűtéses típus lesz, mert néhány reaktortípus már a

telepítéshez közeli fázisban van (ilyen pl. a BWRX-300 és az SMR 470). Az első úszó vízhűtéses reaktor, az orosz KLT-40S már évek óta üzemel, de egyelőre további, uszályra szerelt könnyűvízes reaktor építését egyik európai ország sem tervezi.

A következő népszerű kategória a folyékony fémrel hűtött gyorsreaktorok csoportja (szürke szín), melynek célja a zárt nukleáris üzemanyagciklus megvalósítása. Jelenleg nem üzemel szárazföldi SMR ebben a kategóriában, de Szeverszkben (Oroszország) a BREST-OD-300-as ólomhűtéses gyorsreaktor építése közeledik a 2026-os befejezéséhez. Az Egyesült Államokban a Terra SFR építése 2024-ben kezdődött és tervezett indítása 2030 körül várható. Ami az egy évtizeden belüli üzembe helyezésre tervezett többi SMR típust illeti, több ígéretes LFR és SFR projekt is van (pl. Newcleo, Oklo és Alfred), de még egyik sem áll közel az építéshez. Jelenleg egy úszó LFR vagy SFR fejlesztése és megvalósítása nincs napirenden.

Az sóolvadék hűtésű reaktortechnológia iránti évtizedes érdeklenség után ma számos amerikai és európai vállalat intenzíven foglalkozik korszerűsített és optimalizált MSR típusok fejlesztésével, amint azt az 1. táblázatban a sárga színű oszlop mutatja. Ma még nem üzemel szárazföldi MSR, de a Kairos Power már dolgozik egy olvadt fluoridsóval hűtött, magas hőmérsékletű demonstrációs reaktor építésén Oak Ridge-ben (USA), az USA Energiaügyi Minisztériumának (DOE) támogatásával. A sóolvadék itt kizárólag hűtésre szolgál, maga a reaktor egy TRISO üzemanyagot használó „kavicságyas” (pebble bed) konstrukció. Az egy évtizeden belül telepíthető szárazföldi MSR típusokra több ígéretes projekt is van, például a Thorizon One (Thorizon/Hollandia) és az IMSR400 (Terrestrial Energy/USA), de még egyik sem áll közel az építés megkezdéséhez. Érdekes tervezési koncepciót használ a Seaborg (Dánia) cég, amely egy kompakt MSR-t kíván hajóra helyezni és egy több hajóból álló, moduláris úszó „uszály együttest” kíván létrehozni.

Az 1. táblázat utolsó, narancssárga oszlopa a gázhűtéses SMR típusokat mutatja. Úgy tűnik, hogy a globális érdeklődés a gázhűtéses konstrukciók iránt csökkent, mivel miután három szárazföldi demonstrációs egységet építettek Kínában és Japánban, ma ebben a kategóriában nincs folyamatban másik építés. Ami a jövőt illeti, néhány gázhűtéses projekt azért említendő, ilyen például az X-Energy (USA) XE-100 reaktora vagy a CZ-HU-PL-SK-F konzorcium Allegro 75 MW_{th} gázhűtésű gyorsreaktor (GFR) demonstrációs egysége (lásd [14]).

Európai Ipari Szövetség a Kis Moduláris Reaktorokért

Az Európai Bizottság (EB) 2023-ban adta ki a „Nyilatkozat az EU SMR 2030-ról” kezdeményezést [15], amely támogatja az áram-, hő- és hidrogéntermelésre használt SMR berendezések biztonságának javítását célzó összehangolt közösségi kutatást és innovációt. Ezt követte az „Európai Ipari Szövetség a Kis Moduláris Reaktorokért” létrehozása, amelynek célja egyes SMR típusok fejlesztésének, demonstrációjának és telepítésének felgyorsítása az EU-ban a 2030-as évek elejére (lásd [16]). A 2. táblázat az Ipari

Szövetség által kiválasztott SMR típusok azon első csoportját mutatja, amelyek üzembe helyezését 2030-ra tervezik. A 2. táblázat és az 1. táblázat összevetése azt mutatja, hogy jelenleg az EU-ban az úszó (tengeri) és a gázhűtéses SMR típusok nem állnak a kutatás-fejlesztés középpontjában.

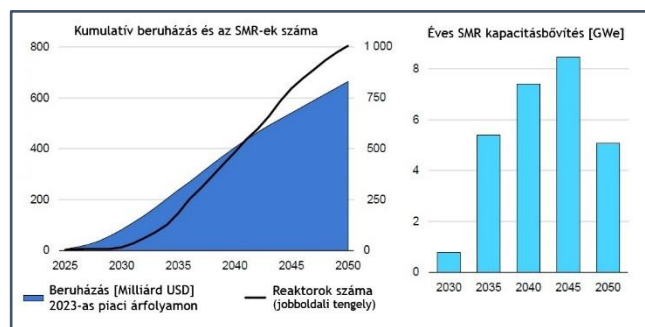
Hűtőközeg →	KÖNNYŰVÍZ	POLYÉKONY FÉM	OLVADT SÓ	GÁZ
Hely / állapot ↓				
Szárazföldi / működő	Nincs	Nincs	Nincs	Nincs
Szárazföldi / építés alatt	Nincs	Nincs	Nincs	Nincs
Szárazföldi / fejlesztés alatt	European BWRX-300 Orlen Synthos Green E. (PL) LDR-50 Cityheat Calogena, Steady E. (F, FI) NUWARD EdF (F) PWR-20 Last Energy (USA, EU) Rolls-Royce SMR-470 Rolls-Royce SMR Ltd. (UK) NuScale VOYGR RoPower Nuclear (RO)	Alfred/EU-SMR-LFR SOFCEN, Ansaldo (B, I, RO) European LFR-AS-200 Newcleo (I, F, CH)	Thorizon One Thorizon (NL)	Nincs
Úszó / működő	Nincs	Nincs	Nincs	Nincs
Úszó / építés alatt	Nincs	Nincs	Nincs	Nincs
Úszó / fejlesztés alatt	Nincs	Nincs	Nincs	Nincs

2. táblázat: Az EU SMR Ipari Szövetség által az első fázisban kiválasztott kilenc típus (2030-ra tervezett üzembe helyezéssel) (Forrás: [17])

A kiválasztott kilenc SMR típus közül hat a vízhűtéses reaktorok családjába tartozik, emellett két LFR és egy MSR is szerepel a palettán. Ez a típusmegoszlás nagyjából követi a globális trendet, bár a vízhűtéses típus dominanciája Európában talán még hangsúlyosabb. Ez magyarázható a könnyűvízes reaktorok európai hagyományaival és talán a vélt egyszerűbb engedélyeztetés reményével is. A 2. táblázatban látható típusok többségét áramtermelésre kívánják használni, de az LDR-50 kifejezetten távfűtésre szolgál, emellett egyes típusok képesek ipari folyamatokhoz szükséges hő előállítására is (pl. Thorizon One). Érdekes, hogy a kiválasztott kilenc SMR között nincs se nátriumhűtéses gyorsreaktor, se gázhűtésű reaktor.

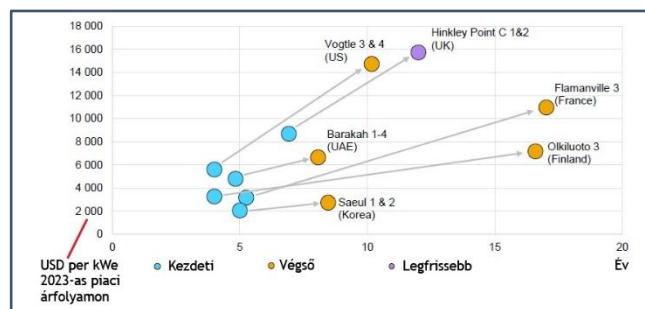
A Nemzetközi Energiaügynökség előrejelzése az SMR telepítésekre

A Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) előrejelzéseit az energetikai szakma mérvadónak tekinti, és évenként megjelenő World Energy Outlook IEA kiadvány széleskörűen elfogadott referencia. Az alábbiakban a 2025 elején kiadott átfogó IEA elemzés (lásd [18]) alapján röviden összefoglaljuk, hogy az IEA szerint mi várható a következő 25 évben az SMR piacon.



5. ábra: Globális SMR kumulatív beruházások és kapacitásbővítések a „Bejelentett Ígéret” forgatókönyv szerint, 2025-2050 (Forrás: [18])

Az IEA becslése szerint 25 év alatt összesen kb. 650 milliárd USD beruházás fog történni (2023-as piaci árfolyamon számolva) az SMR szektorban, és ez összesen kb. ezer SMR blokkot fog létesíteni. A beruházások felfutása 2030 után várható, és 25 év alatt a teljes megépített villamos kapacitás értéke kb. 120 GWe lesz. Ez kb. 120 MWe átlagos blokkméretet jelent, és az IEA a blokkok átlagos fajlagos építési költségét kb. 5400 USD/kWe értékre becsüli.



6. ábra: Néhány nagy atomerőmű építési projekt kezdeti és aktuális tökéletesítés-becslése és kivitelezési ideje (Forrás: [18])

Megjegyzendő, hogy az 5400 USD/kWe érték valamivel kisebb, mint az Egyesült Arab Emírátsokban a Barakah telephelyen Dél-Korea által felépített négy APR-1400 blokkra jellemző fajlagos költség, ami viszont egy kiugróan jó érték a mai nagyblokk építésekre (lásd 6. ábra). Az 5400 USD/kWe érték az IEA szerint azonban inkább túlbecslésnek tekinthető, mivel a nagy gyártók (pl. GE Hitachi, Westinghouse) kb. ennek a felét tekintik célértéknek a sorozatban telepített SMR blokkokra.

Az 5. ábra szerint az SMR építések nagyobb számban csak 2030 után fognak beindulni, habár a verseny fokozódik és a bejelentett SMR projektek száma és beruházási értéke dinamikusan növekszik. A [19] piaci jelentés szerint 2025 első negyedévében a bejelentett SMR projektek kapacitása 42%-kal (14 GWe értékkel) nőtt és az összesített tervezett SMR kapacitás már elérte a 47 GWe értéket (a 47 GWe beruházás kb. felét az USA-ban tervezik). Más szóval az IEA előrejelzésben a következő 25 év során létesítésre jósolt kb. 120 GWe nagyságú SMR kapacitás csaknem 40%-át már hivatalosan is bejelentett projektek „fedik le”.

Ha visszatekintünk a II. generációs atomerőművek építésének történetére, akkor az 1965 és 1990 közötti 25 évben kb. 300 GWe kapacitás épült meg világszerte, tehát az IEA 120 GWe nagyságú megépített SMR blokkos becslése a

következő 25 évre nem irreális. Az 50-60 évvel ezelőtt lejátszódott piaci folyamatok elemzése azonban felhívja a figyelmet egy fontos tényezőre, nevezetesen arra, hogy akkor a piacon egy fokozatos „tisztulási” folyamat játszódott le az épített blokkok típusának tekintetében. A 70-es évek közepétől kezdve alapvetően három blokk típust építettek: PWR, BWR és a nehézvízes PHWR (pressurized heavy-water reactor, pl. CANDU). A ma üzemelő blokkok típusösszetétele a NAÜ adatai alapján az alábbi: 74% PWR, 11% PHWR, 10% BWR és 5% egyéb (lásd [20]). A ma megkezdett építkezéseknél viszont már 85% a PWR típus aránya, ami csaknem abszolút technológiai dominanciát jelent.

Várható, hogy az elkövetkező évtizedben az SMR piacon is egy hasonló „típusztisztulási” folyamat fog végbe menni, egyrészt az engedélyezési erőforrások korlátossága, másrészt a szabványosításra való törekvés miatt. A folyamat végén valószínűleg most is 3-4 domináns SMR típus fogja uralni a piacot, ezek közül legalább kettő valószínűleg LWR típus lesz. A fenti folyamat lejátszódásának a feltétele viszont nyilvánvalóan az, hogy néhány SMR típust sikeresen (és elfogadható költségeken) megépítsenek és a prototípus blokkokat biztonságosan és gazdaságosan üzemeltessék.

Ami az 5. ábrán látható beruházási felfutás bekövetkezésének realitását illeti, az USA-ban, Ázsiában és Oroszországban az SMR telepítések dinamikája a következő évtizedben valószínűleg nagyjából követni fogja az ábra görbéjének menetét. A fejlődő országok SMR építési esélyeit valószínűleg nagyban növelni fogja az a tény, hogy 60 év tiltás után a Világbank ezentúl hajlandó lesz atomerőmű építési projekteket is finanszírozni (lásd [21]).

Azt viszont, hogy az Európai Unióban mi fog 2035-ig az SMR piacon történni, nem könnyű megjósolni. Az biztató fejlemény, hogy jelenleg az EU-ban is nagy az SMR láz, és olyan országokban is SMR beruházásokról beszélnek felelős befektetők, ahol eddig az atomerőművek építése fel se merülhetett, mint pl. Dánia, Norvégia, Olaszország és Észtország. Emellett az EU-ban a magas CO₂-kibocsátással járó energiatermelési eljárások kiváltására való törekvés is valószínűleg ösztönző hatással lesz az SMR telepítésekre, feltéve, hogy a következő évtizedben a „zöld átmenet” az eddigi lendülettel fog folytatódni.

Ami a hazai helyzetet illeti, 2025-ben az SMR fejlesztésekkel kapcsolatban két fontos esemény történt. 2025 júliusában a magyar Hunatom Zrt. együttműködési szándéknyilatkozatot írt alá a lengyel Synthos Green Energy vállalattal egy amerikai SMR típus magyarországi bevezetésének előkészítéséről és távolilag legfeljebb 10 blokk létesítéséről [22]. A szóban forgó típus a GE Vernova BWRX-300 forralóvízes reaktora, melynek közép-európai felhasználási joga a fenti lengyel cég birtokában van. A Hunatom Zrt. 2025 szeptemberében hasonló szándéknyilatkozatot írt alá a brit Rolls-Royce cég SMR 470 nyomottvízes típusára.

Összefoglalás

Cikkem röviden elemezte a nagy adatközpontok, a mesterséges intelligencia és a „kriptovaluta-bányászat” egyre növekvő használatából eredő villamosenergia-fogyasztást. Bemutattam, hogy ez a megnövekedett villamosenergia-igény hogyan segítheti az atomenergia fokozott alkalmazását, tekintettel arra, hogy az említett nagyfogyasztók folyamatos és megbízható áramellátást

igényelnek. Elemeztem a jelenlegi K+F élvonalában lévő SMR típusok jellemzőit. Az egy évtizeden belüli tervezett telepítési dátummal rendelkező SMR típusok között jellemző a vízhűtéses, szárazföldi telepítésű reaktorok dominanciája. Mérvadó nemzetközi elemzések alapján áttekintettem a várható SMR telepítéseket a következő 25 évben és rámutattam néhány olyan alapvető feltételre, amelyek teljesülése elengedhetetlen az atomipar által annyira remélt „SMR áttörés” bekövetkezéséhez.

Irodalomjegyzék

- [1] Electricity 2024, Analysis and forecast to 2026, International Energy Agency (IEA), <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>
- [2] Global energy perspective, McKinsey&Co, 2023, <https://www.mckinsey.com/industries/energy-and-materials/ourinsights/global-energy-perspective>
- [3] <https://www.businessenergyuk.com/knowledge-hub/chatgpt-energy-consumption-visualized/>
- [4] <https://epoch.ai/data/ai-models>
- [5] <https://www.world-nuclear-news.org/>
- [6] <https://www.worldnuclearreport.org/>
- [7] Cognet G, Bartak J, Bruna G: SMR Safety – Advantages and Challenges, Proc. of NENE 2021, International Conference Nuclear Energy for New Europe, Bled, Slovenia, 6-9 September 2021
- [8] <https://www.nrc.gov/>
- [9] <https://gda.rolls-royce-smr.com/>
- [10] The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Third Edition, NEA No. 7737, OECD NEA 2025
- [11] Small Modular Reactors – Advances in SMR Developments, Int. Conf. on Small Modular Reactors and their Applications, 21-25 October 2024, IAEA, Vienna, Austria
- [12] Nuclear Illustrative Programme presented under Article 40 of the Euratom Treaty (PINC 2025), European Commission, Brussels, 13.6.2025 COM (2025) 315 final
- [13] Commission Staff Working Document Accompanying PINC 2025, European Commission, Brussels, 13.6.2025 SWD (2025) 160 final
- [14] <https://allegroreactor.cz/>
- [15] Declaration on EU SMR 2030: The role of Research, Innovation, Education and Training in the safety of Small Modular Reactors (SMRs) in the European Union, EC, Brussels, April 2023
- [16] European Industrial Alliance on SMRs, General Presentation, January 2025
- [17] <https://www.world-nuclear-news.org/articles/first-smr-projects-selected-by-european-industrial-alliance>
- [18] The Path to a New Era for Nuclear Energy, International Energy Agency (IEA), January 2025
- [19] SMR nuclear market update: Q1 2025, Wood Mackenzie, May 2025
- [20] Nuclear Power Reactors of the World, 2024 edition, IAEA-RDS-2/44, IAEA, Vienna, 2024
- [21] The World Bank goes nuclear, Center for Global Development, 1 July 2025, <https://www.cgdev.org/blog/world-bank-goes-nuclear>
- [22] <https://www.hunatom.hu>