

# Az atomerőművi blokkok rugalmas teljesítményváltoztatási képességeinek fejlesztése a manőverek valós idejű optimalizálásának segítségével

Szondy Borbála Nóra<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Természettudományi Kar, Nukleáris Technikai Intézet, Atomenergetikai Tanszék, Budapest, Magyarország

<sup>2</sup>Framatome Kft., Budapest, Magyarország

Levelező szerző, e-mail: szondy@reak.bme.hu, borbala.szondy@framatome.com

Beérkezett: 2025. augusztus 15.; elfogadva: 2025. november 5.

## Összefoglalás

A kutatás célja az atomerőművek terheléskövető üzemeltetésének vizsgálata és szoftveres támogatása. A rugalmas működés során felmerülő problémák, nemzetközi technológiák és a VVER reaktorok képességeinek összehasonlító elemzése alapján megkezdődött egy operátortámogató prediktív rendszer (OAPS) fejlesztése. A szoftver valós időben optimalizálja a terhelésváltoztatási manővereket, automatikusan figyelembe véve és betartva a biztonsági és üzemeltetési korlátokat. A párhuzamosan lefolytatott villamosenergia-rendszeri szimulációk igazolták, hogy a jövőben a hazai atomerőműveknek is napi szintű menetrendtartásra lehet szükségük. A fejlesztett rendszer hatékonyan segíti majd az operátorokat az új, dinamikus üzemmód biztonságos és hatékony kezelésében, növelve az atomerőművek rendszerintegrációs képességeit.

**Kulcsszavak:** atomerőművi terheléskövetés, üzemeltetési és biztonsági korlátok, optimális szabályozás, operátortámogató rendszer, rendszerintegráció

## Improving the flexible power variation capabilities of nuclear power plant units through real-time optimization of maneuvers

Borbála Nóra Szondy<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Nuclear Energy, Institute of Nuclear Techniques, Faculty of Natural Sciences, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary

<sup>2</sup>Framatome Kft., Budapest, Hungary

## Summary

The research comprised three principal phases. Initially, a comprehensive review focused on the flexible operation of nuclear power plants, including technological considerations, degradation processes from load cycling, and grid ancillary service requirements. This was supplemented by analyzing international operational experience and consulting with transmission system operators, NPP operators, and industry experts. This work identified challenges during load variations and corresponding mitigation solutions. A comparative analysis of Western PWR and VVER designs led to the selection of a non-intrusive, real-time predictive operator assistance system (OAPS) for development and adaptation to Hungarian nuclear units.

The OAPS development phase involves implementing new functionalities, engaging experts for specification and to provide validation datasets. After defining the key optimization targets, the implemented maneuvering strategies were tested on a validated French 1450 MW N4-type reactor model. The developing software will simulate VVER-specific secondary circuit pressure regulation and optimize power maneuvers in real-time according to selectable strategic objectives. Once implemented in the control room, the system will guide operators along optimal trajec-

ories while providing continuous monitoring and ensuring automated adherence to all safety and operational constraints.

Concurrently, system integration was studied via high-resolution simulations of future electricity systems, considering projected energy strategies for Hungary and interconnected countries. Analyses indicate that in an ideal, coupled market, sufficient export opportunities would allow Hungarian NPPs to operate in a predominantly baseload manner, with curtailment required only during periods of low demand and high solar irradiance. However, projecting recent trends in regional solar capacity expansion suggests these export opportunities may not be available. Under such a scenario, calculations indicate domestic NPPs would be required to engage in scheduled load following on a near-daily basis. A detailed quantitative analysis of these economic and operational dynamics is the subject of a forthcoming journal publication, as is a prospective analysis of required maneuver types and cycling numbers evaluated against European Utility Requirements (EUR) recommendations.

**Keywords:** nuclear load-following, operational and safety constraints, optimized control, operator assistance system, grid integration

## Bevezetés

A bevezetés során kiemelten foglalkozom az atomerőművek rugalmas terhelésváltoztatása szempontjából releváns ellátásbiztonsági és rendszerszabályozási, valamint az atomerőművek biztonságos üzemeltetéséhez kapcsolódó kérdésekkel. A bevezetés egyben egy olyan előzetes, átfogó tanulmány összefoglalása, amely nélkül a később bemutatott fejlesztések és vizsgálatok nem történhetek volna meg.

### *A villamosenergia-rendszer szabályozása*

Az elmúlt évtizedben a primerenergia-felhasználásban jelentős elmozdulás figyelhető meg a fosszilis energiahordozóktól a megújuló energiaforrások irányába. Az energiarendszerek átalakulását egyre nagyobb arányú, időjárásfüggő megújuló termelés, valamint a rugalmasan szabályozható egységek számának csökkenése jellemzi. A helyzetet tovább súlyosbította a földgáz árának emelkedése és az európai gázellátás bizonytalansága, amely 2021 végétől vált meghatározóvá.

Magyarország villamosenergia-termelésének jelenlegi helyzetét és közeljövőjét három fő pillér határozza meg: 1) a gyorsan bővülő napelemes kapacitásokból származó, jelentős volatilitást mutató termelés növekedése; 2) az atomerőművi kapacitás, amely a hazai termelés mintegy felét (a hazai fogyasztás körülbelül egyharmadát) fedezi; valamint 3) az importkapacitások, amelyek ugyan elengedhetetlenek, de ezekre támaszkodva nő a határon túli befolyásoknak való kitettség.

Amennyiben a rendszerben nem áll rendelkezésre elegendő, rugalmasan szabályozható erőműegység, nem biztosított a mindenkori termelési–fogyasztási egyensúly fenntartása. Ezáltal a megbízhatóság és az ellátásbiztonság hosszú távon megkérdőjelezhetővé válik. Ennek elkerülése érdekében az atomerőműveknek ki kell mozdulniuk a hagyományos alaperőművi működésből. Részvételük a rendszer szabályozásában egyre inkább nélkülözhetetlenné válik a magyar villamosenergia-hálózat számára.

Atomerőművek rugalmas működéséről akkor beszélünk, amikor az atomerőmű kiadott teljesítményét a hálózat vagy a környezet igényei szerint változtatjuk. Az atomerőmű rugalmas működése természetesen többféleképpen értelmezhető, azonban jelen folyóiratcikkben nem veszem figyelembe azokat a terhelésváltozásokat, amelyeket az erőmű belső eseményei idéznek elő, illetve a tervezett karbantartási vagy üzemanyag-átrakási időszakokat sem.

A rugalmas működés keretében a terhelésváltozások az alábbi alcsoportokba sorolhatók.

- Terheléskövetés: lassú, órás vagy negyedórás, előre menetrendezett teljesítményszint-változtatás.
- FCR (frekvenciartartó tartalék): szinte azonnali (0,5 másodpercen belüli) automatikus válasz a hálózati frekvencia eltéréseire.
- aFRR (automatikus frekvencia-visszaállító tartalék): másodperces–perces reakcióidővel, öt percen belül teljesen aktiválódó, a rendszer igényeihez igazodó, vezérlőjel alapján történő automatikus teljesítményszabályozás.
- mFRR (manuális frekvencia-visszaállító tartalék): 12,5–15 percen belül manuális teherátvétel a gyors válaszidejű aFRR-szolgáltatóktól.

A terheléskövető működésre való készenlét a villamosenergia-rendszer forrásoldali (termelői) összetételének változásával mára ellátásbiztonsági szempontból kulcsfontosságú kérdéssé vált. Az atomerőmű terhelésváltoztatási képessége rendkívül fontos, mivel egy erőműegység Magyarországon a pillanatnyi fogyasztás 10–20 százalékát is kiteszi.

További lényeges különbség a nap- és szélerőművekkel szemben, hogy az atomerőművek turbógenerátorforgógép egységei jelentős tehetetlenséget – inerciát – biztosítanak a villamosenergia-rendszer számára, lassítva ezzel a rendszerszintű zavarok, instabilitások okozta hatásokat, megnövelve a hálózati kiegyenlítésre rendelkezésre álló időt (*Milano et al. 2018*). Továbbá nemcsak a hatásos, de a meddő (induktív és kapacitív) teljesítmény szabályozására is alkalmasak. Ennek eredményeként az

atomerőművi és megújuló források együttes alkalmazása növeli a villamosenergia-rendszer megbízhatóságát.

A megfelelő mennyiségű és minőségű szabályozási tartalék tehát – kiegészülve a nagy tömegű forgógépek által biztosított inercia lassító hatásával – elengedhetetlen mind az országokénti, mind az összekapcsolt rendszer működésének biztonsága szempontjából.

Ennek alátámasztására fontos és tanulságos példa a közelmúltból a 2025. április 28-i spanyol–portugál áramszünet, amelyet a későbbi vizsgálatok alapján a rendszer feszültség-ingadozása váltott ki, miközben nem állt rendelkezésre elegendő szabályozási kapacitás – elsősorban a feszültség- és meddőteljesítmény-szabályozás terén – a rendszer stabilizálásához.

### *Az atomerőművek teljesítményének szabályozása*

A rugalmas teljesítményváltoztatás koncepcióját Magyarországon főként a menetrendtartásban és a frekvenciaszabályozásban aktívan részt vevő gázerőművek példájából ismerhetjük. Az atomerőművek hasonló, rugalmas működtetése valamivel bonyolultabb feladat, ugyanis figyelemmel kell lenni számos reaktorfizikai, hőtechnikai és biztonsági korlát egyidejű betartására.

A vizsgálatok tárgyát képező nyomottvizes atomerőmű-típusokban a terhelésváltoztatás megvalósulhat a turbina irányából, rendszerint az átáramló gőzmennyiség szelepszárással történő beállításával (a szekunder körben), vagy közvetlenül a reaktor felől (a primer körben). A reaktoroldali beavatkozás a következő beavatkozók összehangolásával valósul meg:

- a szabályozórudak, kötegek vagy akár ezekből alkotott, együtt mozgó kötegcsoportok mozgatásával;
- a zóna bórosvíz-tartalmának változtatásával, azaz bórosvíz-koncentrációjának vagy tiszta kondenzátum adagolásával;
- a reaktor belső (inherens) visszacsatolásainak kihasználásával.

A reaktor irányából indított beavatkozás hatása a turbínán és a generátor kapcsain lassabban jelentkezik, emiatt a tipikus terhelésváltoztatásoknál használt üzemmód a turbinaoldali beavatkozás, illetve a primer körű hűtővíz-átlaghőmérséklet (nyugati nyomottvizes erőművekben) vagy a szekunder körű gőznyomás (a Magyarországon használt orosz típusú VVER erőművekben) kiegyenlítése a reaktor teljesítményének megváltoztatásával.

### **Vizsgálati anyag és módszerek**

A kutatás három fő fázisból állt. Kezdetben készült egy átfogó szakirodalmi áttekintés, amely az atomerőművek rugalmas üzemeltetésére fókuszált, beleértve a technológiai megfontolásokat, a terhelésváltások okozta degradációs folyamatokat, valamint a hálózati rendszerszintű szolgáltatásokkal kapcsolatos követelményeket. Ezt kiegészítette a nemzetközi üzemeltetési tapasztalatok

elemzése, valamint a rendszerirányítókkal, atomerőművi üzemeltetőkkel és iparági szakértőkkel folytatott konzultáció. A munka során azonosításra kerültek a terhelésváltoztatások során felmerülő kihívások és az ezek kezelésére szolgáló megoldások. Részletesen összehasonlításra és elemzésre kerültek a nyugati nyomottvizes (PWR) és a VVER blokkokra jellemző sajátosságok és üzemeltetési stratégiák tükrében, majd kiválasztásra került a magyar atomerőművi blokkok manőverezésének javítására leginkább alkalmas megoldás.

A kiválasztott szoftveres rendszer fejlesztésének módszere több fázisból állt. A kezdeti feladat a VVER erőművi blokkok adatainak gyűjtése volt, majd a program VVER-440 (500 MW) és VVER-1200 (1200 MW névleges teljesítményű) blokkokra vonatkozó bemeneti paraméterkészletének megalkotása. Ezzel párhuzamosan a francia N4 (1450 MW-os) reaktortípus szabályozási célú modelljét kiegészítettem a szekunder kör részletesebb leírásával, hogy a program a rendszerint szekunder körű nyomásszabályozást alkalmazó VVER erőműveket is pontosan tudja modellezni. Az utóbbi két feladat során más, VVER atomerőműveket leíró szimulációs kódok elveit és működését tanulmányoztam. Ezután a nemlineáris prediktív optimalizáció (non-linear model predictive control, NMPC) alapján valós idejű szabályozási beavatkozásokat javasoló operátortámogató program (*Dupré et al. 2021*) magja következett. A programozás megkezdése előtt fel kellett térképezni a sok modulból álló komplex rendszert, és meghatározni a fejlesztések programkódban elfoglalt helyét. A rendszer komplexitása miatt a fejlesztéseket a lehető legkevesebb fájl vagy függvény létrehozásával, a meglévő belső funkciók lehetőség szerinti kiegészítésével és alakításával töreksem megoldani. A program fejlesztői futtatásához külső futtató fájl és beolvasó program létrehozását láttam célszerűnek. A fejlesztendő funkciók és optimalizálási célfüggvények, valamint a manőver során betartandó korlátok definiálása során további szakértői konzultációkat folytattam, illetve a modell és az egyszerű manőverezési programok tesztelésére is alkalmas validációs adatsorokat gyűjtöttem. A specifikált fejlesztési lehetőségek listáján számos nagyobb átalakítást feltételező feladat is szerepel, azonban a stratégiaileg legfontosabb és biztosan megvalósítható feladatok kerültek előre. Ezek a fejlesztések mind az N4 reaktormodell VVER-szerű szabályozási lehetőségekkel is ellátott verzióján történnek egyelőre, majd a korábbi adatgyűjtés alapján lesznek a VVER-típusokra adaptálva. A fejlesztés végén az új, VVER-440-re adaptált verzió és az implementált stratégiák Paksi Teljesléptékű Szimulátorral való demonstrációs tesztelését tervezzük.

A rendszerintegrációs vizsgálatokat egyfelől a mostani teljesítményváltoztatási események nyomán követése, másfelől a jövőbeli villamosenergia-rendszer dinamikus szimulációja mentén végeztem el. Az órák felbontású szimulációkhoz Biró és Aszódi PLEXOS (*Energy Exemplar 2025*) szoftverkörnyezetben összeállított egyik modelljét vettem alapul (*Biró–Aszódi 2024*). A publikációban sze-

replő, Magyarországra vonatkozó modellek közül egy karbonsemlegesség szempontjából igen kedvező, de kihívást jelentő forgatókönyvet választottam, amelynek megvalósulását azonban a nagymértékben fejlődő naperőművi kapacitások fényében a 2035-ös évre becsülöm. Ebben a forgatókönyvben (lásd *1. táblázat*) a legmagasabb mind az előre jelzett éves villamosenergia-fogyasztás, mind a beépített naperőművi kapacitás. Továbbá egyszerre van jelen a rendszerben az üzemidő-hosszabbításokon átesett négy 500 MW-os, valamint a két új építésű 1200 MW-os atomerőművi blokk. Az alapmodellben (*Biró–Aszódi 2024*) szerepelnek a szomszédos országok energiastratégiai (a hivatkozásokat lásd az *1. táblázat* utolsó sorában) szerint tervezett erőművi portfóliói és a kétirányú áramlást lehetővé tevő határkereszteső összeköttetések. A magyar ellátásbiztonsági kérdések vitatásához emellett szükségesnek láttam egy különálló, Magyarországot határkereszteső áramlások nélkül leíró modell alkalmazását is, amelyen önmagukban vizsgálhatók a hazai termelőkapacitások és ezek dinamikus együttműködése, valamint kiemelten az atomerőművi blokkok terheléskövető részvétele a rendszerkiegénylítésben. Az atomerőművek rugalmassági tulajdonságainak figyelembevételére a terhelésváltoztatási sebesség, a minimális

stabil teljesítményszint és a leállítás esetén az újraindításig minimálisan eltelt állásidő különböző beállításai mellett (lásd *2. táblázat*) számos lehetséges kombinációra készült modellvariáció.

A szimulációk órás felbontású fogyasztási és időjárásfüggő megújuló termelési bemeneti adatai egy-egy korábbi év ismert időjárási adatokból számított kapacitástényező- és fogyasztási görbéjének a beépített kapacitásokkal és az előre jelzett éves fogyasztással történő feliskálázásával kerültek meghatározásra. Az órás fogyasztási adatok az európai villamosenergia-rendszerirányítók szövetsége (ENTSO-E) és a magyar rendszerirányító (MAVIR) weboldaláról kerültek letöltésre. A legtöbb megújuló energiaforrásra vonatkozó, órás felbontású kapacitásfaktorokat – az adott évek meteorológiai mintázatainak függvényében – negyven évre (1980–2019) a Renewables.ninjas adatbázisból nyertük ki. (A szintézis, a torzításkorrekció és a meteorológiai adatokból történő szimuláció módszertanát lásd: *Pfenninger–Staffell 2016; Staffell–Pfenninger 2016*.) A folyóvízi és duzzasztós vízerőművek esetében az adatok szintén az ENTSO-E és a MAVIR weboldaláról származnak, az adatsorok minősége pedig a Biró és Aszódi által leírtak szerint került javításra (*Biró–Aszódi 2024; Szondy et al. 2025a*).

1. táblázat | A hálózatoldali szimulációk során felhasznált erőművi portfóliók

Technológia	2035-re prediktált beépített erőművi kapacitások						
	HU	AT	HR	RO	RS	SI	SK
Atom	4 400	0	348	1975	0	348	2880
Nap	12 000	7044	768	5054	1540	1650	1200
Szél	329	7211	1364	5255	3510	150	500
Folyóvízi	58	5543	549	3440	2729	1199	1304
Duzzasztós víz	0	2965	1856	4153	629	0	451
Szivattyús tározó	0	2971	281	746	642	180	916
Biomassza	796	696	148	137	0	90	200
Hulladék	100	103	0	0	0	0	0
Biogáz	0	0	0	0	0	34	200
Geotermikus	3	0	17	0	0	0	4
Akkumulátor	100	0	0	0	0	0	0
Földgáz	2 400	3301	1048	2958	0	1555	1153
Lignit	0	0	192	1980	400	689	0
Kőolaj	0	164	0	100	0	0	0
Villamosenergia-fogyasztás [TWh]	68	85	20	65,9	41,5	15	40
Energiastratégia forrása	Ministry of Innovation and Technology, 2020	Federal Ministry of Sustainability and Tourism, 2019	Ministry of Environment and Energy, 2019	Ministry of Economy, Energy and Business Environment, 2020	Ministry of Mining and Energy, 2022	Republic of Slovenia, 2020	Slovak Ministry of Economy, 2019

Ukrajnáról a jelenlegi körülmények között nem állt rendelkezésre megbízható adat, ezért nem vettük figyelembe Magyarország import- és exportlehetőségeinek számításához.

Forrás: *Biró–Aszódi 2024* alapján saját szerkesztés

2. táblázat | Az atomerőművi blokkok rugalmas terhelésváltoztatási képességeinek összefoglalása. A kiemelt számok a vizsgált variációk közül a referenciaeset értékeit jelölik.

		Atomerőművi blokkok (általános)	Paks I blokkok (Gen2, 500 MW)	Paks II blokkok (Gen3+, 1200 MW)
Minimális stabil teljesítményszint [%]		45	31.5, 75	40, 50, 60
Terhelésváltoztatási maximális sebesség [%/min]	Fel	2.6	1	0.5, 1, 2, 3
	Le	2.6	0.6	0.5, 1, 2, 3
Minimális állásidő [h]		18	77	4, 8, 12, 24

Forrás: saját szerkesztés

A rugalmassági kombinációk először öt év időjárási és fogyasztási adatsoraival, órás felbontásban kerültek lefuttatásra. Majd az eredmények alapján az évek számát negyvenre bővítettük, a szimuláció felbontását pedig a bemeneti adatsorok interpolációjával negyedórásra növeltük. A szimulációs eredményfájlok egy-egy erőműegység adott bemeneti adatsorhoz és beállításokhoz tartozó, órás vagy negyedórás felbontású teljesítmény-, kapacitásfaktor- vagy egyéb adatait tartalmazzák. Az adatfeldolgozás egy-egy adott kérdés megválaszolására írt specifikus Python-kód segítségével történt, amely magában foglalja a célszerűen megválogatott eredményfájlhalmaz beolvasását, átalakítását, különböző számítások elvégzését, majd az eredmények összegzését, összehasonlítását, vizualizációját. Az adatok kiértékelése jellemzően vizuális interpretáció és számszerű ellenőrzés alapján történt.

## Eredmények

A korábbi vizsgálati eredmények és a nemzetközi tapasztalatok alapján az atomerőművi rugalmas terheléskövetés által leginkább érintett berendezések és folyamatok kerültek összefoglalásra (Szondy et al. 2023). Nukleáris biztonsági szempontból érdemes kiemelni ezek közül néhányat. A radioaktív anyagok kijutását megakadályozó mérnöki gátak közül a reaktortartály falát és a fűtőelem-burkolatot érintő hatások, a reaktorfizikai hatások közül pedig a keletkezett xenon, illetve az axiális teljesítményeloszlás problémája került kiválasztásra.

### Termomechanikai hatások

Reaktortartály. A technikai korlátok közül elsőként röviden a reaktortartály termomechanikai terhelésének kérdését tárgyalom, mivel ez az egyik általánosan ismert korlátja a terhelésváltoztatások sebességének, mértékének és ciklusszámának. A reaktortartály fala az egyik fontos mérnöki gát, egyike azoknak a rendszereknek és rendszerelemeknek, amelyek integritása megakadályozza a radioaktív anyagok kijutását a légkörbe. Ezzel kapcsolatosan felmerülő, lehetséges probléma például a rendszeres hőmérsékleti és teljesítményfluktuációk ciklikus terheléséből fakadó termikus fáradás.

Fűtőelem. A korábbi tapasztalatok alapján az egyik leginkább kihívást jelentő hatás szintén egy fontos mérnöki gát, a burkolat integritását érinti. Az általánosan használt üzemanyag és a burkolat különböző hőtágulása, a kiégés során keletkező hasadási termékek miatt a pasztilla duzzadása, az ezáltal összenyomódó üzemanyag és a burkolat felületi érdességei miatt kialakuló pasztilla-burkolat kölcsönhatás (pellet-cladding interaction, PCI), valamint a burkolaton belül felgyülemelő gázok feszítő ereje mind növelik a stresszkorroziós repedések kialakulásának, a burkolatmeghibásodásnak és az integritásvesztésnek a kockázatát.

### Reaktorfizikai hatások

Xenon-koncentráció változása. Reaktorfizikai szempontból az egyik legfontosabb kihívást a teljesítménycsökkenés hatására megnövekedő xenon-135-koncentráció jelenti. A xenon-koncentráció a zónában körülbelül nyolc-tíz órával később tetőzik, majd kezd el újra lecsökkenni. A xenon egyúttal reaktorméreg is, azaz befogja a hasítani képes neutronokat, ezzel csökkentve a hasadások mennyiségét, a zóna reaktivitását. A xenon magas koncentrációja mellett a teljesítménynövelés lehetősége tehát korlátozott. A folyamat hasonlóan játszódik le teljesítménynövelés esetén, azonban a xenon-koncentráció ekkor csökken, majd nyolc-tíz óra múlva kezd újra növekedni.

Axiális egyenlőtlenlégek. További nehézséget jelent, hogy a szabályozórudas reaktorteljesítmény-változtatásnál axiális irányban eltolódik, torzul a teljesítményprofil. Ezáltal azonos reaktorteljesítmény mellett magasabb teljesítménycsúcs alakulhat ki, ami veszélyezteti az erre vonatkozó biztonsági korlátok betartását. Másrészt ezáltal a zóna alsó és felső részében időben is eltérően változik a teljesítmény, így a xenon-koncentráció változásának periódusa is eltérő lehet. Ez főként nagy méretű reaktorzónával rendelkező típusoknál jelenthet problémát, mivel axiális teljesítménylengés alakulhat ki.

### Megoldások az említett hatások kezelésére

A reaktortartályt érintő hatások kezelése. Az OECD törésvizsgálatai (NEA 2005) azt mutatják, hogy nem megfelelő megelőzés esetén a gyakori ciklikus terhelés csök-

kenti a berendezések élettartamát, emiatt konzervatíván kell meghatározni a teljesítményváltoztatási sebességeket, továbbá magas fokú műszerezés és monitorozás szükséges. A nemzetközi tapasztalatok szerint a ciklikus terhelésváltoztatások hatása a megfelelő manőverezési irányelveknek köszönhetően nem jelentett problémát, és nem volt megfigyelhető a rugalmas működésből fakadó degradációs hatás (Feunry–Gain 2021; Morilhat et al. 2019). Ennek kapcsán fontos megjegyezni, hogy egyes hírforrásokkal ellentétben a civaux-i N4 típusú francia erőművekben megfigyelt stresszkorróziós repedéseket normál üzem során nem használt, üzemzavari segédrendszerek vezetékein tapasztalták, nem pedig normál üzemben a terhelésváltoztatások által érintett szakaszokon.

A fűtőelemet érintő hatások kezelése. A bemutatott hatás a fűtőelem állapotának nyomon követésével (pl. kiegészítés, korábbi üzemállapotok és manőverek), fokozatos termikus kondicionálásával és ezek figyelembevételével számított aktuális korlátok betartásával kerülhető el. Ilyen korlát az automatikusan számított „csúszó PCI-korlát” (International Atomic Energy Agency 2018), amelyet a német KONVOI erőműtípusokban alkalmaztak, illetve hasonló megoldás a francia EDF flottájánál alkalmazott, úgynevezett „K-kredit” bevezetése (Morilhat et al. 2019), amely mintegy virtuális tartalékként a teljesítménycsökkentés hatására fogy, majd névleges terhelésen visszatermelődik.

Axiális hatások kiegyenlítése. Az axiális hatások csökkentésére megoldás lehet kisebb elnyelőképességű – úgynevezett „szürke” – rúdcsoportok használata, így a szabályozórúd-csoport mozgatása kevésbé perturbálja a zónát (Mourlevat 2007). Léteznek olyan konstrukciók, ahol egy a teljesítményszabályozásra használt rúdcsoporttal ellentétben, kisebb tartományban mozgó, nagyobb elnyelőképességű csoport végzi az axiális hatások kiegyenlítését (Grossetête 2014; Kuhn–Klaus 2016). Azonban hagyományos, sorosan mozgatott rúdcsoportok esetén is redukálható ez a hatás a manővereket megelőzően, előre meghatározott mennyiségű bóros víz adagolásával – ezáltal a teljesítménycsökkentés kisebb mértékű rúdmozgatással valósítható meg. Bóros vizes szabályozás alkalmazásával a xenon által okozott változásokat a zóna egészében egyenletesen lehet kompenzálni, habár a rendszer holtidejéből és az adagolás korlátos sebességéből adódóan ez az előbbiekhöz képest lassabb módszer.

### A kiválasztott szoftveres megoldás

OAPS operátortámogató rendszer. A bórosvíz-adagolás hatása a zónában késleltetve jelenik meg, ezért kell a szükséges mennyiségeket pontosan előre meghatározni. Utóbbi feladat adta az OAPS valós idejű, prediktív operátorokat támogató rendszer első funkcióját is: az axiális offset, azaz a zónatérfelek teljesítményeinek axiális egyenlőtlenségét jellemző tényező értékét kellett az adott teljesítményhez tartozó referenciaértéke körül tar-

tani a bórosvíz-koncentrátum és tiszta kondenzátum optimális adagolásával. A funkció tesztelésre került a francia állami energiaszolgáltató (EDF) operátorai által. Egyik legfőbb előnye az operátor terhelésének csökkentése a megnövekedett számú és bonyolultságú manőverek lebonyolítása során.

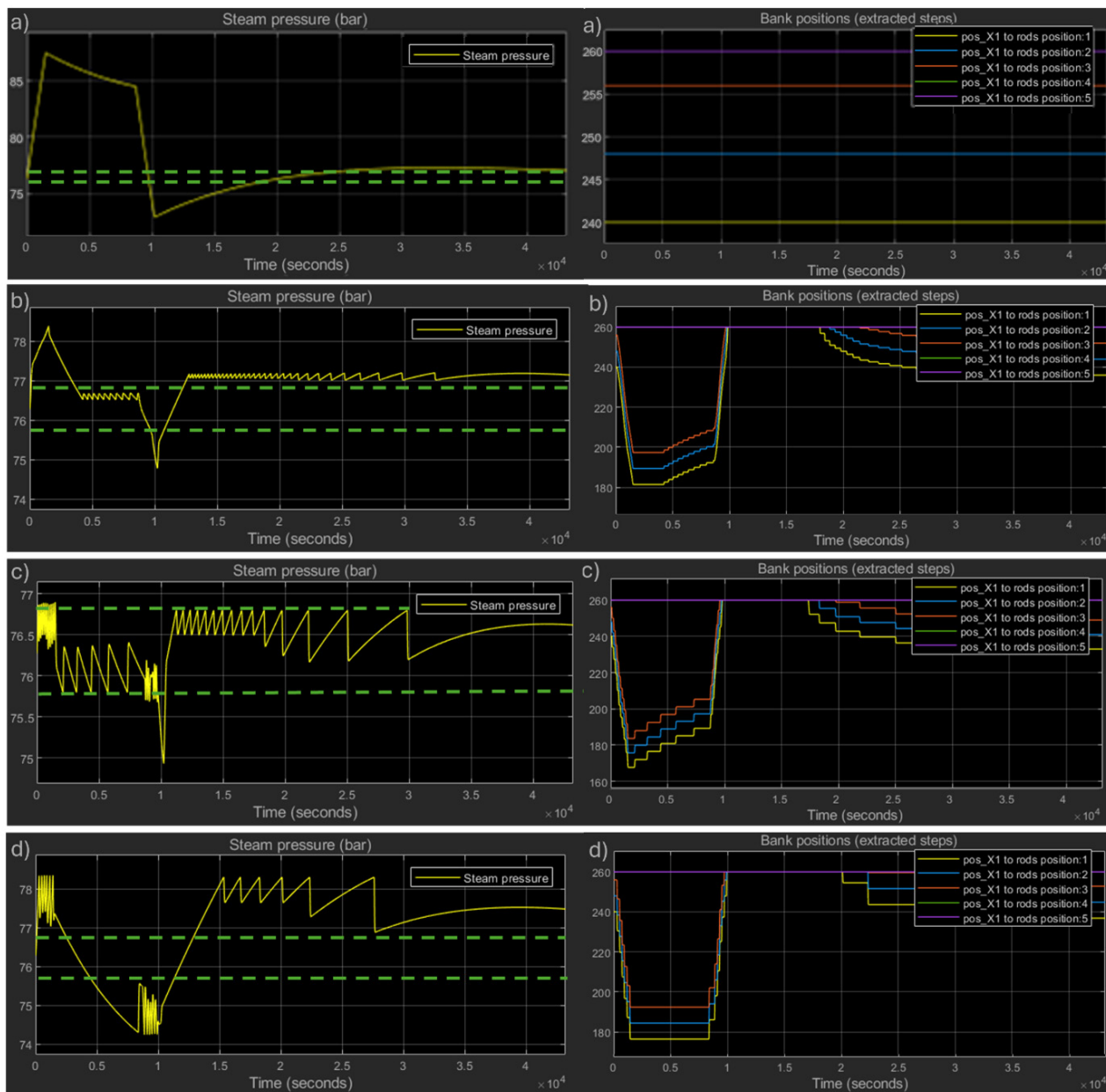
### Az operátortámogató rendszer továbbfejlesztése és adaptálása

Az OAPS nem intruzív, valós idejű prediktív operátortámogató rendszer került kiválasztásra a magyar atomerőművi blokkokra való adaptáció és fejlesztés céljából, az optimális és biztonságos rugalmas manőverezés elősegítésére. Az OAPS rendszer eredetileg az N4 típusú francia reaktorok manővereinek támogatására lett kifejlesztve, jelen kutató-fejlesztő munka keretében pedig adaptálásra kerül VVER erőművekre is. Ennek egyik előfeltétele a szekunder kör pontosabb leírása volt, ami VVER típusú erőművek esetében a szekunder körű frissgőznyomás-tartás miatt elengedhetetlen. Emellett olyan új funkciók és célfüggvények kerülnek kifejlesztésre, amelyek lehetővé teszik kifejezetten a VVER-440 vagy a VVER-1200 reaktorral szerelt erőművek manővereinek az adott típus igényeire való optimalizálását, akár több célfüggvény egyidejű figyelembevételével. A jelenlegi továbbfejlesztett modell már képes a VVER-specifikus szekunder körű nyomásszabályozás szimulálására, illetve átkapcsolással változtatható a szabályozási nyomásintervallum szélessége, a novovoronyezi VVER-1200 menetrendezett leterhelési tesztek során (Filimonov et al. 2021) alkalmazott kiterjesztett holtávú („soft”) szabályozás mintájára. Ezekkel a különböző szabályozási módokkal került végrehajtásra ugyanaz a manőver az említett modellen. Az 1. ábrán látható, hogy a nyomástartásnál aránylag nagyobb beállított hiszterézis miatt a szabályozórúd-csoportok mozgatása nagyobb lépésekben történt. Szélesebb nyomástartomány esetén pedig a várt módon csak a manőver elején, majd a felterhelés kezdetén van szükség beavatkozásra. A példaként vett ábrákon látható, hogy a névleges teljesítményre való visszatérés után mindhárom szabályozott esetben szükség van a szabályozórúd újabb zónába eresztésére a xenon-folyamatok kompenzálása miatt.

Jelenleg folyamatban van a teljesítménymanőverek valós idejű optimalizálására választható stratégiai célok kidolgozása. Ezek fejlesztésével és tesztelésével párhuzamosan átfogó dokumentáció készül, amelynek alapján elvégezhető az eredmények elméleti verifikációja, valamint a szakirodalmi és felvett adatsorokkal való összevetése.

### A rendszerintegrációs szimulációk eredménye

A rendszerintegrációs szimulációk elemzései azt mutatják, hogy ha egy ideális, összekapcsolt piacon elegendő exportlehetőség állna rendelkezésre a környező régiók-



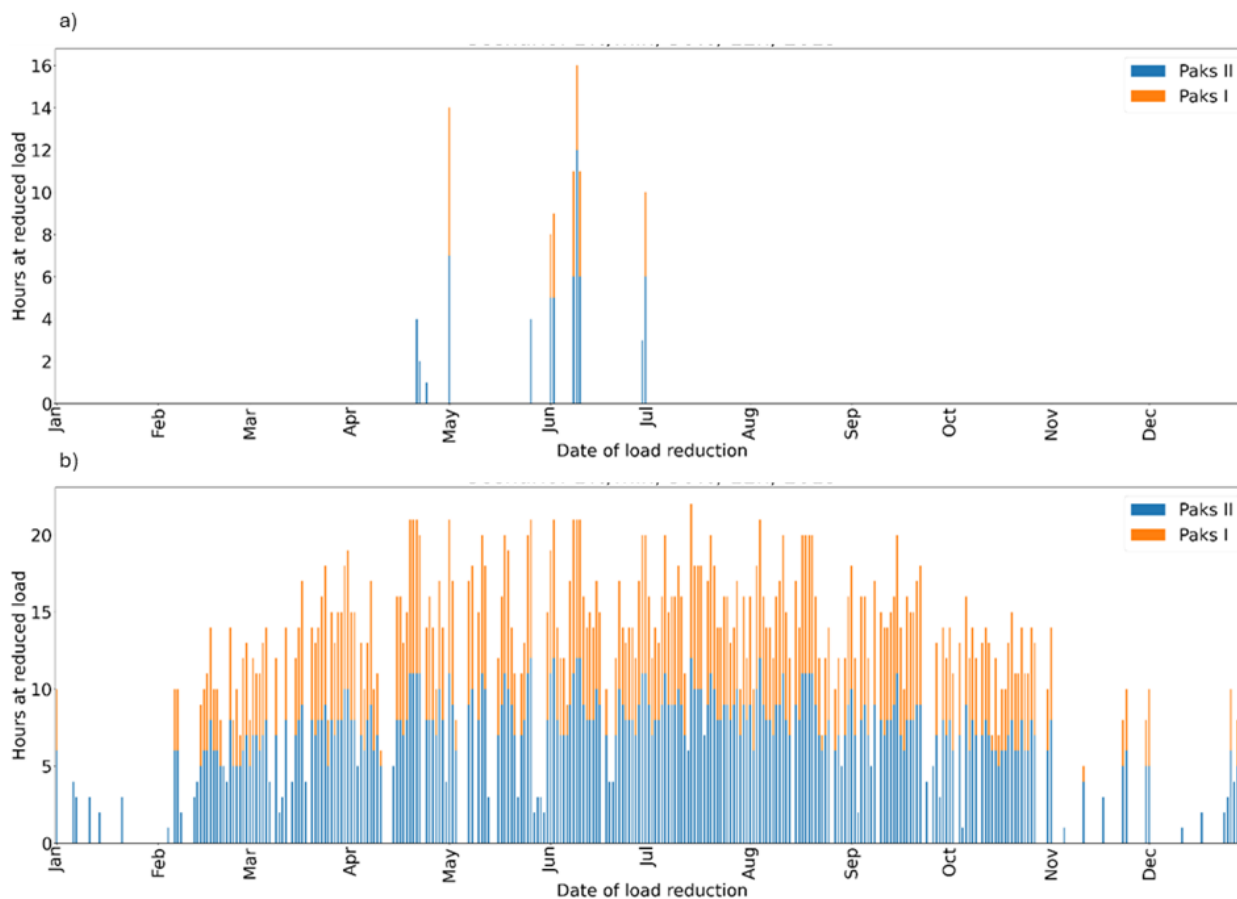
1. ábra

Példafuttatás optimalizáció nélkül a módosított szabályozási célú modellen két óra hosszú, 1%/perc sebességű, 25% amplitúdójú, turbinaszlep-zárásal és -nyitással végrehajtott le- és felterhelés szimulációjára, ahol a primer köri beavatkozás csak automatikus rúdmozgatással történik, a) nyomás-/hőmérséklettartás nélkül, b) primer köri átlaghőmérséklet-tartással, c) szekunder köri frissgőznyomás-tartással ( $\pm 0,5$  bar), valamint d) frissgőznyomás-tartással szélesebb nyomástartományban ( $\pm 2$  bar). Szaggatott vonal jelöli a normál nyomástartásnál alkalmazott intervallumot.

Forrás: saját továbbfejlesztett PWR-szimulátorfuttatás

ban (a feldolgozott NEKT-ek alapján), akkor atomerőművi teljesítménycsökkentésre (leszabályozásra) csak az alacsony fogyasztású és magas napsütéses besugárzású időszakokban lenne szükség (2.a ábra). Ugyanakkor a környező országok naperőművi kapacitásbővítésének elmúlt években tapasztalt trendjeit kivétve ezek az exportlehetőségek nem feltétlenül állnak majd rendelkezésre. Ilyen forgatókönyv esetén a számítások azt jelzik, hogy a hazai atomerőműveknek csaknem egész évben napi rendszerességgel kell majd részt venniük a menetrendtartásban (2.b ábra).

További eredmények születtek a visszaszabályozással meg nem termelt energiamennyiségről, az atomerőmű bevételeiről és a rendszerben kialakuló árakról az atomerőművek rugalmassága függvényében, amelyekre jelen cikk korlátai és átfogó tematikája miatt nem térünk ki részletesebben. Ezeknek a gazdasági és üzemeltetési dinamikáknak a részletes kvantitatív elemzése egy hamarosan megjelenő nemzetközi tudományos folyóiratcikk tárgyát képezi (Szondy et al. 2025b). Emellett folyamatban van a szükséges manővertípusok és ciklusszámok prospektív elemzése is a European Utility Requirements új atom-



2. ábra

A Paks I és Paks II erőművek részterhelésen töltött óráinak száma a blokkok referenciárgalmassági beállításai mellett a) ideális összekapcsolt rendszer és exportlehetőségek esetén, valamint b) export-felvevőpiac hiányában, a napi megújuló energia- és fogyasztási fluktuációkat a 2019-es adatsorokból skálázva.

Forrás: PLEXOS szimulációs eredmények: *Biró-Szondy 2023* és *Szondy et al. 2025b* alapján saját szerkesztés

erőművekre vonatkozó ajánlásainak tükrében. A negyven év fogyasztási és megújuló kapacitásfaktor-adatsoraival negyedórás felbontással készülő szimulációk futtatása szintén folyamatban van; ezek az eredmények még pontosabb adatokat szolgáltatnak majd a jövőbeli villamosenergia-rendszer és a különböző terhelésváltoztatási képességekkel rendelkező atomerőművek egymásra hatásáról.

## Összefoglalás és következtetések

A terhelésváltoztatások során igénybe vett berendezések közül az elterjedt vélekedés szerint elsősorban a reaktortartály fala korlátozza a manővereket. A szakirodalom alapján azt találtam, hogy az alapvető biztonsági korlátok betartásával elkerülhetők ezek a hatások. Elsődlegesen az üzemanyag állapota határozza meg, hogy milyen teljesítményváltoztatás engedhető meg, emiatt a legfontosabb a manőverek, a kiegészi szint és az üzemanyag kondicionálási állapotának folyamatos nyomon követése. A nyugati terheléskövető flottáknál több évtized alatt kialakult szoftveres megoldások közül került néhány említésre.

A lényegesebb funkciók VVER-modellen való tesztelése után tervezzük a Paksi Atomerőmű teljes léptékű szimulátorával való demonstrációs tesztelést. Ekkor a program még önmagában, automatikus visszacsatolásokkal való korrekció nélkül fut majd. A későbbiekben a valós idejű visszacsatolásokkal futó prediktív optimalizációhoz szükség lesz megadott paraméterek pillanatnyi értékének beolvasási lehetőségére is, amihez egyirányú kommunikáció is elegendő. Az erőműben való alkalmazásig még számos tanulmány és részletes tervezés szükséges. A vezénylőben való implementáció esetén a rendszer valós időben frissülő, optimális pályán vezet majd végig az operátorokat a manőverek során, miközben biztosítja a legfontosabb paraméterek folyamatos nyomon követését, és elősegíti az optimalizáció során figyelembe vett biztonsági és üzemeltetési korlátok automatikus betartását.

A rendszerintegrációs vizsgálat szimulációs eredményei közül bemutatásra kerültek a magyar atomerőművekkel szemben támasztott, 2035-re projektált leterhelési igények az ideális, összekapcsolt, Magyarország számára szinte folyamatos exportlehetőséget biztosító villamosenergia-piacon, valamint a hazai termelőegység-

gek által biztosított termelés–fogyasztás egyensúly esetén. Megállapítható, hogy az atomerőművek menetrendtartó képessége kihasználásra kerül. A leterhelések mértéke, hossza, alakja és éves ciklusszáma pedig függ az egyes blokk típusok beállított rugalmassági korlátaitól – ezek két nemzetközi folyóiratcikkben kerülnek kifejtésre részletesebben.

## Köszönetnyilvánítás

Különösen köszönöm a kutató-fejlesztő munkában nyújtott támogatást dr. prof. Aszódi Attila egyetemi témavezetőmnek, Bodnár Balázs ipari szakmai konzulensemnek, a PLEXOS-modelllek építését és futtatását végző Biró Bencének, valamint a Framatome Core Design & Transient Analysis Department munkatársai közül Alain Grossetête-nek és Guillaume Duprének.

A tanulmány az Innovációs és Technológiai Minisztérium Kooperatív Doktori Program Nemzetvédelmi Alprogram ösztöndíjprogramjának (NVKDP-2021) a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



## Irodalomjegyzék

- Biró, B. & Aszódi, A. (2024) Investigating the role of nuclear power and battery storage in Hungary's energy transition using hourly resolution electricity market simulations. *Heliyon*, Vol. 10. No. 9. e29841. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E29841>
- Biró B. & Szondy B. (2023) PLEXOS szimulációk különböző atomerőművi rugalmassági beállítások vizsgálata céljából. Munka-  
közi adatok. BME NTI, Budapest.
- Dupré, G., Grossetête, A., Chevrel, P. & Yagoubi, M. (2021) Enhanced Flexibility of PWRs (Mode A) Using an Efficient NMPC-Based Boration/Dilution System. *Proceedings of the European Control Conference (ECC)*, Rotterdam, The Netherlands, 29 June–2 July 2021. pp. 1092–1098. <http://dx.doi.org/10.23919/ECC54610.2021.9655159>
- Energy Exemplar (2025) PLEXOS. The Energy Analytics and Decision Platform for all Systems. <https://www.energyexemplar.com/plexos>
- ENTSO-E (é. n.) Transparency Platform. <https://transparency.entsoe.eu> [Letöltve: 2025. 08. 10.]
- Federal Ministry of Sustainability and Tourism (2019) Integrated National Energy and Climate Plan for Austria. [https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/at\\_final\\_necp\\_main\\_en\\_0.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/at_final_necp_main_en_0.pdf)
- Feutry, S. & Gain, T. (2021) Flexible operation: a major asset for nuclear generation to increase its competitiveness in a low carbon energy mix. in *World Nuclear Exposition*, Paris, France: EDF, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=lXmTmrX5wDg>
- Filimonov, P. E., Semchenkov, Yu. M., Malyshev, V. V., Dolgoplov, N. Yu., Povarov, V. P. & Gusev, I. N. (2021) VVER-1200 Tests in No. 6 Unit of the Novovoronezh NPP during Operation in a Daily Load Schedule. *Atomic Energy*, Vol. 129. No. 3. pp. 113–121. <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00721-y>
- Grossetête, A. (2014) ATMEA1&EPR mode T core control innovative features for high operating flexibility. in: *Transactions of the American Nuclear Society*, Anaheim, California, Nov. 2014, pp. 1095–1098
- International Atomic Energy Agency (2018) Non-baseload Operation in Nuclear Power Plants: Load Following and Frequency Control Modes of Flexible Operation. *Nuclear Energy Series*, 2018
- Kuhn, A. & Klaus, P. (2016) Improving automated load flexibility of nuclear power plants with ALFC. *VGB PowerTech*, vol. 96, no. 5, pp. 48–52, 2016, [Online]. Available: [http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:47075185](http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:47075185)
- MAVIR (é. n.) Main page. <https://www.mavir.hu/web/mavir/home> [Letöltve: 2025. 08. 14.]
- Milano, F., Dörfler, F., Hug, G., Hill, D. J. & Verbič, G. (2018) Foundations and Challenges of Low-Inertia Systems (Invited Paper). 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC). Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, NJ. pp. 37–61. <https://doi.org/10.23919/PSCC.2018.8450880>
- Ministry of Economy, Energy and Business Environment (2020) The 2021–2030 Integrated National Energy and Climate Plan. [https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-06/ro\\_final\\_necp\\_main\\_en\\_0.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-06/ro_final_necp_main_en_0.pdf)
- Ministry of Environment and Energy (2019) Integrated National Energy and Climate Plan for the Republic of Croatia for the period 2021–2030. [https://mingo.gov.hr/UserDocsImages/UPRAVA%20ZA%20ENERGETIKU/NECP\\_Update%20\\_CRO\\_EN\\_Revised.pdf](https://mingo.gov.hr/UserDocsImages/UPRAVA%20ZA%20ENERGETIKU/NECP_Update%20_CRO_EN_Revised.pdf)
- Ministry of Innovation and Technology (2020) National Energy and Climate Plan. [https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/hu\\_final\\_necp\\_main\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/hu_final_necp_main_en.pdf)
- Ministry of Mining and Energy (2022) Integrated National Energy and Climate Plan of the Republic of Serbia until 2030 with a vision until 2050. [https://www.mre.gov.rs/sites/default/files/2022/07/inecp\\_27\\_07\\_2022\\_eng.pdf](https://www.mre.gov.rs/sites/default/files/2022/07/inecp_27_07_2022_eng.pdf)
- Morilhat, P., Le Maitre, C., Favennec, J. M. & Feutry, S. (2019) Nuclear Power Plant flexibility at EDF. HAL. <https://edf.hal.science/hal-01977209>
- Mourlevat, J.-L. (2007) Evolution des modes de pilotage. *RGN*, No. 3, pp. 29–36, May 2007, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/rgn/20073029>
- NEA (2005) Thermal Cycling in LWR Components in OECD-NEA Member Countries. OECD Publishing, Paris. [https://oecd-nea.org/jcms/pl\\_18166/thermal-cycling-in-lwr-components-in-oecd-nea-member-countries](https://oecd-nea.org/jcms/pl_18166/thermal-cycling-in-lwr-components-in-oecd-nea-member-countries)
- Pfenninger, S. & Staffell, I. (2016) Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data. *Energy*, Vol. 114. pp. 1251–1265. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.08.060>
- Republic of Slovenia (2020) Integrated National Energy and Climate Plan of The Republic of Slovenia. [https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-06/si\\_final\\_necp\\_main\\_en\\_0.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-06/si_final_necp_main_en_0.pdf)
- Slovak Ministry of Economy (2019) Integrated National Energy and Climate Plan for 2021 to 2030. [https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/sk\\_final\\_necp\\_main\\_en\\_0.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/sk_final_necp_main_en_0.pdf)
- Staffell, I., & Pfenninger, S. (2016) Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. *Energy*, vol. 114, pp. 1224–1239, Nov. 2016. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.08.068>
- Szondy B., Aszódi A. & Bodnár B. (2023) Atomerőművek teljesítménymanőverezésének alapvető kérdései. *Magyar Energetika*, Vol. 30. No. 2.
- Szondy, B., Biró, B., Bodnár, B. & Aszódi, A. (2025a) Improving Nuclear Flexibility in the Hungarian Grid. 10th International

- Youth Conference on Energy (IYCE). <https://doi.org/10.1109/IYCE66046.2025.11155033>
- Szondy, B., Biró, B., Bodnár, B. & Aszódi, A. (2025b) Scenario-based assessment of the role of nuclear units' flexibility in an electricity grid with high intermittent renewable penetration. Preprint of manuscript under review at Energy Strategy Reviews, ESR-D-25-01507. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5599653>
- Szondy, B., Bodnár, B., Grossetête, A., Gain, T. & Aszódi, A. (2024) 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, Vol. 419, 112965. <https://doi.org/10.1016/J.NUCENGDES.2024.112965>

---

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