

A jövőbeli erőművi portfólió elemzés költség- és kibocsátás minimum optimalizálás szempontjából

Future Power Plant Portfolio Analysis from the Point of View of Minimum Cost and Emission Optimization

BOZSIK NÁNDOR

Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola. Magyarország. bozsik.nandor@uni-obuda.hu (levelező szerző)

Absztrakt. A cikk a 2030-ra várható magyarországi erőművi portfólió összetételét vizsgálja. A vizsgált mutatók az erőműtípusok teljes élettartam alatti fajlagos költsége (LCOE) és teljes élettartam alatti fajlagos szén-dioxid kibocsátása (LCA(CO₂)) szerint vizsgálják. Ezen két mutató – mint célfüggvény – minimumát lineáris programozási módszerrel határozzák meg az erőművi portfólióra. Az eredmények szerint a 2030-ra várható erőművi portfóliók LCOE-minimum értéke abszolút értékben rosszabb, fajlagos értékben viszont jobb, mint 2021-ben. Az LCA(CO₂)-minimum érték pedig mind abszolút, mind fajlagos értékben kedvezőbben alakul 2021-ben. Ezek az eredmények mind a harminc, mind pedig a huszonöt százalékos villamosenergia-import mellett teljesülnek. A húsz százalékos import mellett az abszolút értékek rosszabbul, a fajlagos értékek jobban alakulnak mindkét mutató esetén. Ellenben a 2030-ra végzett számítások eredményei elmaradnak a zöld átmenetet szolgáló Egyensúly Intézet 2030 menetrendtől. Ennek oka a késésben lévő új nukleáris erőmű üzembe helyezésében és az ipar egyre növekvő villamosenergia-igényű átalakulásában keresendő. A vizsgált portfóliók esetében teljesül, hogy a hazai termelés minimum harminc százaléka megújuló forrásokból származik. Ez jelentősen hozzájárul az Európai Unió azon törekvéséhez, hogy az ágazat 2050-re nettó üvegházhatású gázkibocsátás mentes legyen.

Abstract. The article examines the expected composition of the power plant portfolio in Hungary by 2030. The indicators considered are the life-cycle unit costs (LCOE) and the life-cycle specific carbon dioxide emissions (LCA(CO₂)) of the power plant types. The minimum of these two indicators, as objective functions, is determined by a linear programming method for the power plant portfolio. The results show that the LCOE minimum for the power plant portfolios in 2030 is worse in absolute terms and better in specific terms than in 2021. In both absolute and specific terms, the LCA(CO₂) minimum is more favourable in 2021. These results are met under the thirty and twenty-five percent electricity import scenarios. With twenty percent imports, the absolute values are worse and the specific values are better for both indicators. On the other hand, the results of the calculations for 2030 fall short of the 2030 Agenda of the Institute for a Green Transition. This is due to the delay in commissioning a new nuclear power plant and the transformation of industry with increasing electricity demand. For the portfolios under review, a minimum of thirty percent of domestic generation from renewable sources is met. This contributes significantly to the European Union's ambition for the sector to be net greenhouse gas-free by 2050.

Kulcsszavak: villamos erőmű, portfólió, optimalizálás, kibocsátás, költség, életciklus

Keywords: Power Plant, Portfolio, Optimisation, Emissions, Cost, Life Cycle

Bevezetés

A villamosenergia-termelés összetételét számos szempontból lehet vizsgálni: műszaki, gazdasági, környezetvédelmi és klímavédelmi szempontok alapján. Ezen belül további bontás szerint is vizsgálódhatunk. A cikk egy gazdasági és egy klímavédelmi mutató összefüggésében elemzi a magyar villamosenergia-termelő rendszer összetételét. Ezt két mutató, az erőműveket az életciklusukra eső költsége (LCOE, Levelized Cost of Electricity) és az életciklusukra eső szén-dioxid-kibocsátása (LCA, Life Cycle Analysis) alapján vizsgálja. Ezeket a mutatókat a jelenlegi és a 2030-ra tervezett forgatókönyvek alapján elemzi. A számítások célja az egyes erőművi portfóliók költségének minimalizálása és a szén-dioxid-kibocsátás csökkentése. A változók közé tartozik az ország éves villamosenergia-igénye és importja, valamint az erőmű típusok termelése, amelyek a kapacitásfaktor és a beépített kapacitás alapján kerülnek meghatározásra. További fontos változók az erőmű típusok egységnyi megtermelt villamosenergiájára eső életciklus költsége és az ezzel járó szén-dioxid-kibocsátás.

Az elemzést nehezíti, hogy az erőművek előregedettek és mind a gazdasági, mind pedig a szén-dioxid-kibocsátásra vonatkozó adataikban nagy a bizonytalanság. Sok esetben nehézséget okoz az adatok hozzáférhetősége is. Ezekben az esetekben a nemzetközi, hasonló technológiájú és korú erőművek átlagértékei lettek alapul véve. Ezek mellett egy másik nehézség, ami viszont a jövő forgatókönyveit érinti, a gyakori jogszabályi változások. Nehézséget okoz a kalkulációkban az is, hogy az új energetikai beruházások megvalósulása bizonytalan, mint például a megújulók terén a szélerőművek újbóli engedélyeztetése, az új gázerőművek létesítése, és a nukleáris erőművi kapacitások bővítése. Az egyes beruházások jelentős csúszásban vannak, mint például Paks II nukleáris erőmű. Szintén nehézséget okoz a jövőbeni villamosenergia-fogyasztás előrejelzése, amelynek bizonytalansága a jövőben nőni fog. Ennek egyik oka az iparban tervezett nagy energiaigényű fogyasztók megjelenése, a másik pedig a klímaváltozás okozta időnként szélsőségesé váló időjárás. Ezen változók figyelembevétele rövid távon a Magyar Kormány hivatalos jelentéseiben, középtávon pedig a Nemzeti Energia- és Klímaterv (korábban Nemzeti Energiastratégia), a Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia (NTFS), az Egyensúly Intézet és a McKinsey jelentéseiben alapultak.

1. A jövőbeni nemzeti energiastratégia

A Nemzeti Energia- és Klímaterv (NEKT) fő sarokpontja, hogy a villamosenergia-fogyasztáson belül a megújulók aránya legalább a 20 százalékot elérje. Ennek a célkitűzésnek a megvalósítása érdekében a napelemes kapacitások jelentős bővítése szükséges, amelynek során a 2016-os 680 MW kapacitás 2030-ra 6500 MW-ra emelkedne. Egy másik kiemelt cél a lignit felhasználásának teljes megszüntetése, amihez sok szakértő fenntartásokkal viszonyul, mivel az energiabiztonság szempontjából a lignit az egyetlen hazai forrású, jelentős mennyiségű energiahordozó. A klímavédelmi célok teljesítéséhez elengedhetetlen, hogy a villamosenergia-termelés 2030-ra 90 százalékban karbonmentes legyen. Ennek a célnak a megvalósulásához jelentősen hozzájárulhat a Paks II beruházás befejezése [1].

A Nemzeti Energiastratégia 2030-ra 57,8 TWh, 2040-re pedig 66,7 TWh villamosenergia-fogyasztást jelez előre. A Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia (NTFS) előrejelzései 2050-ig szólnak, ekkorra 80,8 TWh-t modellez a GDP jelenlegi alakulása mellett. Ezt azonban jelentősen módosíthatja az orosz-ukrán háború, illetve a tervezett akkumulátorgyártó- és a cikk írása közben bejelentett

elektromos autógyártó-kapacitások energiaigénye. Az előbbi a növekvő elektrifikáció, az utóbbi az új ipari ágazatok jelentős villamosenergia-igénye miatt jelentkeznek. Ezért a kormány részéről már 2030-ra a tervezettnél magasabb, 68 TWh villamosenergia-fogyasztást jósolnak [2]. Ennek a Magyar Kereskedelmi és Iparkamara rendezvényén, 2023. március 9-én elhangzott kijelentésnek az értéke hordoz némi bizonytalanságot, mivel a szakmai háttér nem ismerhető meg. A jelen cikkben javarészt az Energiastratégia 2023. márciusi előrejelzései jelentik a kiindulási alapot a számításoknál.

A NEKT középtávon 20 százalékos villamosenergia-import arányt jelöl ki 2030-ra. Ez jelenleg 26,3 százalék. Ezt a célt veszélyezteti az orosz-ukrán háború miatt kialakult helyzet. Hazánkban, ahogy sok más európai országban is, a villamosenergia-fogyasztás évi átlagos növekedése egy-másfél százalék lesz. Ez köszönhető a közlekedés és a fűtés elektrifikációjának. Ezzel a trenddel 2050-re 80–90 TWh vagy ennél magasabb hálózati villamosenergia-igény várható, különösen, ha figyelembe vesszük az új, jelentős energiaigényű ipari szegmensek megjelenését.

A Paks II beruházás 2014-ben indult, és befejezését 2032-re valószínűsítik, de a realista verzió ezt néhány évvel későbbre, 2035–36-ra teszi. Ekkorra is csak az egyik blokk teljes hálózatra kapcsolt üzemét valószínűsítik. A jelentős késések miatt az új, küszöbön álló technológiák – például a moduláris nukleáris erőművek – a Paks II kifizetődő voltát erősen megkérdőjelezzik. Ennek ellenére az ellátásbiztonságban és a klímacélok elérésében fontos szerepet foglalt el Paks II jövőbeli üzeme. Az utóbbiaknál a cél a minimum harminc százalékos megújuló energiaforrás részarány, illetve a fentebb már említett kilencven százalékos karbonmentesség elérése 2030-ra [3]. A késésben lévő Paks II beruházás, a megnövekedett villamosenergia-igény, az ország energiabiztonsága és a további nem kívánt import növelése szükségessé teszi a hazai gázerőművi kapacitások növelését [4]. Ezt a kapacitásnövelést a kormány új gázerőművek megépítésében látja. A jelenlegi 4060 megawatt kapacitás mellé épülne még összesen 1650 megawatt kapacitású, korszerű, magas hatásfokú, három gázerőművi blokk, amelyek a magyar villamosenergia-rendszer jobb szabályozhatóságát is lehetővé teszik [5], [6].

A McKinsey piaci elemző cég a megújuló energiák felfutását jelzi előre. Ebben jelentős szerepe van a megújulók egyre kisebb technológiai költségeinek és az alacsony – gyakorlatilag csak a gyártás során jelentkező – szén-dioxid-kibocsátásnak. A McKinsey energia modelljei szerint a megújulók kapacitása 2040-re elérheti a 19,3 gigawattot, amelyből 80 százalékot a naperőművek és 20 százalékot a szélenergia tesz ki világszerte. Fontos, hogy a napelemek és a szélenergia költségei idővel tovább csökkennek. Ezek már ma is a legkisebb költséggel járó energiatermelő lehetőségek Magyarországon. Jelenleg a legalacsonyabb költségű fosszilis lehetőség a kombinált ciklusú gázturbinás erőmű (CCGT), amelynek LCOE értéke 59 USD/MWh, szemben a napenergia LCOE értékével, amely 54 USD/MWh. Ez a különbség a jövőben tovább fog nőni; 2030-ra a napenergia LCOE értéke 30 USD/MWh-ra fog csökkenni, ami már kevesebb lesz, mint a fele a CCGT erőművek 2030-ra várható 62 USD/MWh-ra növekvő LCOE értékének. A szélenergia területén is jelentős csökkenés várható [7].

A fentiek alapján nyilvánvaló, hogy a közeljövőben Magyarország villamosenergia-igénye jelentősen növekedni fog. Azonban az energia összetétele (portfólió, mix) jelenleg még csak körvonalazódik. Ezért a cikk a változók értékeinek tekintetében a közepet alkalmazza a számítások során.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. Életciklus-elemzés

A villamos erőművek életciklus-elemzése egy komplex módszer, amely az erőművek teljes életciklusát figyelembe veszi különböző mutatók vizsgálatával. Ilyen mutatók többek között a költségek, a szén-dioxid, egyéb gázok és szilárd szennyezők kibocsátása. Ezen mutatók megadásának leggyakoribb módja a teljes életciklus alatt megtermelt energiára eső érték. A mutatókat általában fajlagosan adják meg, például kWh-ra vagy MWh-ra vetítve. Az életciklus elemzés során figyelembe vett fázisok az építéstől az üzemeltetés végéig terjednek.

2.1.1. Az élettartamra vonatkozó fajlagos energiaköltség

A villamosenergia-termelés költségeinek egyik leggyakrabban használt mutatója az LCOE. Az LCOE az egyes energiaforrások által termelt elektromos energia egységköltségét jelenti, figyelembe véve az összes kapcsolódó költséget az élettartam során. Ebben az értelemben az LCOE lehetővé teszi az energiaforrások közötti összehasonlítást különféle technológiák és üzemeltetési körülmények között.

Az LCOE számításánál az alábbi fő tényezőket veszik figyelembe:

- Beruházási költségek. Az erőmű megépítése során felmerülő költségek, beleértve a tervezést, az engedélyezést és az építést. Ezen belül számolják el a tőkekiadásokat is.
- Üzemeltetési és karbantartási költségek. A rendszer fenntartásának és üzemeltetésének fix és változó költségeit, beleértve a személyzet béreit is.
- Üzemanyag (szükség esetén).
- Üzemeltetési idő és kapacitásfaktor. Az éves üzemeltetési idő és a kapacitásfaktor határozza meg, hogy az erőmű mekkora részét használják ki valójában az elérhető teljesítményből. Az LCOE számításánál figyelembe veszik, hogy mennyi ideig és milyen hatékonysággal működik az erőmű.
- Finanszírozási költségek és tőkehozam. Az LCOE meghatározásánál kalkulálnak a finanszírozási költségekkel is, például a hitelkamatokkal és a tőkehozamokkal, amelyek befolyásolják a projekt hosszú távú pénzügyi teljesítményét.

Az egyes energiaforrások LCOE-je jelentősen eltérhet egymástól. A megújuló energiaforrások, mint például a szél- vagy a napenergia, az utóbbi években egyre versenyképesebbé váltak az általuk megtermelt villamosenergia árában (1. táblázat). A fosszilis tüzelőanyagokkal működő erőművek LCOE-je gyakran függ az energiahordozó aktuális áráról, valamint az esetleges kibocsátási díjaktól, mint például a szén-dioxid-kibocsátási kvótáktól.

Az LCOE kiszámítása:

$$LCOE = \frac{\text{Költségek teljes idő alatt}}{\text{Villamosenergia – termelés teljes idő alatt}} \quad (1)$$

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I + (FO\&FM)_t + (VO\&VM)_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (2)$$

ahol:

- I: beruházási költségek,
- (FO&FM)_t: fix üzemeltetési és fix fenntartási költségek a t-edik évben,
- (VO&VM)_t: változó üzemeltetési és változó karbantartási költségek üzemanyagköltségek nélkül a t-edik évben,
- F_t: üzemanyagköltség a t-edik évben,
- E_t: energiatermelés a t-edik évben,
- r: diszkont ráta,
- n: eszköz várható élettartama [8].

	McKinsey (2020), [7]	McKinsey (2030), [7]	EU Report (2018), [8]	Lazard-EIA-IRENA-IEA-NREL (2019), [9]			Lazard (2023), [10]
				minimum	maximum	medián	
nukleáris	74	68	79-97	42	153	82	29-34 141-221*
gáz, CCGT	59	62	111-116	34	108	67	51-73 39-101*
gáz, OCGT	126	131	59-118	40	141	94	115-221
szén	n.a.	n.a.	100-112	34	113	75	29-74 68-166*
lignit	70	73	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
olaj	331	344	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
napelem	54	30	51-198	14	157	51	24-282
naphő	n.a.	n.a.	216	79	222	129	n.a.
szél	54	41	48-105	27	120	52	24-75
biomassza	130	129	127-266	41	189	81	n.a.
vízermű	114	114	52-165	27	142	48	n.a.
geotermikus	n.a.	n.a.	35-138	29	109	56	61-102

*: új építésű erőmű

1. táblázat: Az erőművek LCOE értékei, USD/MWh (szerző számítása)

A szükséges árfolyam-átváltások a Macrotrends adatbázisa alapján történtek [11].

2.1.2. A szén-dioxid LCA

Az erőműveknél az LCA során kiemelt figyelmet kap a szén-dioxid (CO₂) kibocsátás (2. táblázat), mivel ez az egyik legfontosabb üvegházhatású gáz, ami hozzájárul a klímaváltozáshoz. Nem utolsó sorban a szén-dioxid kvóták miatt sem mindegy, hogy mekkora mértékű a kibocsátás. Az erőművek szén-dioxid-kibocsátásának életciklus-értékelése során fontos szempontok a következők:

- A nyersanyagok kitermelése és előkészítése. Az erőművek építéséhez szükséges anyagok, például acél, beton vagy üveg előállítása jelentős szén-dioxid-kibocsátással jár. A cementgyártás különösen sok szén-dioxidot enged a légkörbe.
- Az építési és üzemeltetési folyamatok. Az erőmű építése és működtetése is jár kibocsátással, beleértve a szállítást, az építési folyamatokat, az üzemeltetéshez szükséges energiaigényt és a karbantartási tevékenységeket.

- A villamosenergia-termelési folyamatok. A villamosenergia-termelés jelentős kibocsátással jár. Ez nagy mértékben függ a használt üzemanyagtól, energiaforrástól és az erőmű technológiájától. Például a szénalapú erőművek jelentős szén-dioxid-kibocsátással járnak, míg a megújuló energiaforrások, mint a nap- vagy szélenergia, jóval alacsonyabb kibocsátással járnak.
- A bontás és újrahasznosítás. Az erőmű élettartama végén fontos az épület lebontása és az anyagok újrahasznosítása vagy elhelyezése. Ezek is mind hozzájárulnak a teljes életről szén-dioxid-kibocsátáshoz.

A felsorolások közül az utolsót, a bontást és az újrahasznosítást, ritkán veszik figyelembe az LCA számítások során. Erre a jelen cikkben sem kerül sor.

A szén-dioxid LCA kiszámítása:

$$LCA_{CO_2} = \frac{CO_2 \text{ kibocsátás mennyisége teljes idő alatt}}{\text{Villamosenergia – termelés mennyisége teljes idő alatt}} \quad (3)$$

	Bodnár (2019), [12]	Kapros (2004), [13]	Kádár (2010), [14]	Korényi (2022), [15]	Varun (2009), [16]	Turconi (2013), [17]
nukleáris	4,68	10-40	10 (5-15)	15	24	3-35
gáz, CCGT	530	400-500	520 (370-580)	410	608	380-1000
gáz, OCGT	530	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
szén	n.a.	800-1100	1100 (660-1200)	985	975	660-1050
lignit	1340	1060-1370	1000 (400-1000)	n.a.	n.a.	800-1300
olaj	970	650-870	n.a.	n.a.	742	530-900
napelem	65	40-100	130 (50-200)	160	53-250	13-190
naphő	n.a.	n.a.	170 (170-200)	n.a.	14-202	n.a.
szél	10	7-20	25 (10-40)	20	10-124	3-41
biomassza	58	20-100	1000 (550-1000)	n.a.	35-178	9-130
biogáz	n.a.	n.a.	„0”(800)	n.a.	n.a.	n.a.
hulladék	621	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
vízerőmű	5	5-30	n.a.	15	4-237	2-20
tározós vízerőmű	n.a.	5-20	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
hőszivattyú	n.a.	n.a.	40-215	n.a.	n.a.	n.a.
szél+nap	n.a.	n.a.	78 (75-120)	n.a.	n.a.	n.a.

2. táblázat: A különböző erőműtípusok életről szén-dioxid-kibocsátása, g/kWh (szerző számítása)

Kádár esetében a „0” azt jelenti, hogy a számításoknál a biogáz zéró szén-dioxid-kibocsátású technológiaként lett figyelembe véve. A zárójelben a minimum és maximum értékek vannak.

2.2. A kapacitásfaktor

A kapacitásfaktor (CF) az energiaiparban egy erőmű tényleges teljesítményének a maximális potenciális teljesítményéhez viszonyított mérőszáma.

Az éves kapacitásfaktor számítása:

$$CF_{\text{éves}} = \frac{\text{Éves megtermelt villamosenergia}}{\text{Névleges kapacitással maximálisan megtermelhető éves villamosenergia}} \quad (4)$$

A kapacitásfaktor betekintést nyújt az energiatermelő rendszer hatékonyságába és megbízhatóságába (3-4. táblázat). A magasabb kapacitásfaktor azt jelzi, hogy az erőmű huzamosabb ideig képes folyamatosan működni teljes üzemben. Több tényező befolyásolhatja az erőművi kapacitásfaktort, például a karbantartási idő, a tüzelőanyag vagy az erőforrások rendelkezésre állásának ingadozásai és a hálózati igények változásai. A megújuló energiaforrások, mint például a szél- és a napenergia, alacsony és változó kapacitásfaktorkkal rendelkeznek az időjárási viszonyoktól való függésük miatt. A kapacitásfaktorok kulcsfontosságúak az erőmű gazdaságosságának felméréséhez, valamint az energiatermeléssel és beruházásokkal kapcsolatos döntések meghozatalához.

	IEA (2015), [18: 11]	Lazard (2019), [18: 11]	IRENA (2018), [18: 11]	NREL (2019), [18: 11]	Kádár (2010), [19]	Lazard (2023), [10]
nukleáris	0,85	0,90-0,91	n.a.	0,92	0,95	0,90-0,95 0,89-0,92*
gáz, CCGT	0,85	0,55-0,70	n.a.	0,87	0,80	0,45-0,70 0,30-0,90*
gáz, OCGT	0,85	0,10	n.a.	0,30	n.a.	0,10-0,15
szén	0,85	0,66-0,83	n.a.	0,85	0,75	0,35-0,65 0,65-0,85*
olaj	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
napelem	0,11-0,21	0,21-0,34	0,12-0,27	0,15-0,27	0,15	0,15-0,30
naphő	0,34-0,60	0,39-0,68	0,32-0,60	0,50-0,64	n.a.	n.a.
szél	0,20-0,49	0,38-0,55	0,25-0,54	0,23-0,48	0,20	0,30-0,55
biomassza	0,48-0,80	n.a.	0,44-0,94	0,56	0,50	n.a.
víz	0,40-0,63	n.a.	0,23-0,74	0,60-0,66	0,50	n.a.
geotermikus	0,80-0,92	n.a.	0,68-0,94	0,80-0,90	0,50	0,80-0,90

*: új építésű erőmű

3. táblázat: Az erőműtípusok kapacitásfaktora (szerző számítása)

A 3. táblázat első négy adatoszlopjának értékei Timilsina gyűjtéséből származnak [18]. Az egyes intézetek adatai közötti jelentős eltéréseket okozhatja az eltérő módszertan, illetve a különböző területi és/vagy eltérő időpontban történt adatfelvétel. A gáz IEA (2015) esetében a CCGT és az OCGT azonos értéke valószínűleg hibás, ami az azonos besorolásnak tudható be. Az OCGT erőművi kapacitásfaktor minden esetben jelentősen kisebb, mint a CCGT erőművi kapacitásfaktor.

	Kapacitás, MW	Éves termelés, GWh	Kapacitásfaktor
nukleáris	2026,6	15990	0,90
gáz	4095,4	9653	0,27
szén	1166,3	3105	0,30
olaj	420,0	59	0,02
nap	1829,3	3796	0,24
szél	323,3	664	0,23
biomassza + biogáz	342,5	2070	0,69
víz	58,3	212	0,42
hulladék	49,4	161	0,37

geotermikus	2,7	12	0,51
összesen	10313,8	35722	

4. táblázat: A magyar erőművek kapacitásfaktora a 2021-es termelési adatok alapján
(szerző számítása, MEKH alapján) [20]

2.3. Optimalizálás

A számítások a lineáris egyenletrendszerek optimalizációs módszerét alkalmazzák. Az egy célú optimalizáció (SOO, Single-Objective Optimization) olyan optimalizációs típus, ahol csak egy célfüggvényt kell minimalizálni vagy maximalizálni. Matematikai formában egyetlen célfüggvényt fogalmazznak meg, és a feladat az, hogy olyan értékeket találjunk a változók számára, amelyek minimalizálják vagy maximalizálják ezt a célfüggvényt.

Az optimalizációban az erőműtípusok LCOE- és LCA(CO₂) értékei adják a célfüggvény együtthatóit. Az SOO során az LCOE-minimum és a hozzá tartozó LCA(CO₂) érték, illetve az LCA(CO₂)-minimum és a hozzá tartozó LCOE érték kerül kiszámításra. Az ezekhez tartozó erőműtípusok abszolút és a teljes termeléshez viszonyított százalékos értékei is kiszámításra kerülnek.

Általánosságban az alábbi lineáris programozási feladat megoldását keressük:

$$\min_x f^T x \quad \left| \begin{array}{l} A \cdot x \leq b, \\ Aeq \cdot x = beq, \\ lb \leq x \leq ub. \end{array} \right. \quad (5)$$

ahol:

- A és Aeq a feltételeket definiáló együtthatók mátrixa,
- x a döntési változók vektora,
- b és beq a feltételek jobboldalán álló konstansok vektora,
- f a célfüggvény együtthatóiból álló vektor,
- lb és ub az x változók alsó- és felső korlátját meghatározó skalár változók.

A cikkben a megoldáshoz a program a $[w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ a portfólió súlyvektorát keresi, hogy:

$$(w_1 f_1 x_1 + w_2 f_2 x_2 + \dots + w_n f_n x_n) \rightarrow \min \quad (6)$$

és

$$(w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n) = \text{Termelés (éves)} \quad (7)$$

teljesül, ahol

- w_i az i-edik erőműtípus súlya a portfólión belül,
- f_i a célfüggvény i-edik tényezője (i-edik tényező: az i-edik erőműtípushoz tartozó LCOE-, illetve LCA(CO₂) érték),
- x_i az i-edik erőműtípus éves termelése.

Az optimalizációt végző Matlab program a fenti értékek alapján paraméterezett „linprog” függvényt alkalmazta [21]. Az eredmények ábrázolása és a részszámítások az MS Excelben történtek.

3. Eredmények

3.1. A forrásadatok helytállósága

A cikkben számos kutató és kutatóintézet adatainak összehasonlítására került sor. Az adatok kiválasztásánál elsődleges szempont az volt, hogy minél jobban tükrözzék a magyar erőművek valós paramétereit. Ennek érdekében előnyt élveztek a magyar szerzők, például Bodnár adatsorai [10], valamint a hazai intézetek, például a REKK adatsorai [23]. Másodsorban fontos szerepet kapott a jövőbeli adatsorokra vonatkozó előrejelzések figyelembevétele, mint például a McKinsey(2030) előrejelzései [7]. Harmadsorban jelentőséggel bírt az egyes erőműveknél, különösen a gázerőműveknél, a régi és új technológiák megkülönböztetése, mint ahogy azt Lazard(2023) is bemutatja [10].

3.2. A 2021-es magyar erőművi portfólió

Az 5. táblázat a 2021. évi magyar erőművi portfólió teljesítményadatait tartalmazza (2-3. oszlop), amelyek a MEKH adatbázisából származnak. Ez az adatbázis nem tartalmazza a háztartási méretű kis erőművek adatait. Az LCOE adatok (4. oszlop) a McKinsey(2020) jelentéséből származnak [7], kivéve a hulladék és a geotermikus értékeket, amelyek a REKK adatsoraiból származnak [23]. Az LCA(CO₂) értékei (5. oszlop) Bodnár gyűjtéséből valók [12], kivéve a geotermikus értéket, ami Szőnyi és társaitól származik [24]. Az eredményeket a 5. táblázat 6-7. oszlopai tartalmazzák erőműtípusok szerint.

	Kapacitás MW	Termelés GWh	LCOE USD/MWh	LCA(CO ₂) t/MWh	LCOE millió USD	LCA(CO ₂) ezer tonna
nukleáris	2026,6	15990	74	0,00468	1183,260	74,83
gáz	4095,4	9653	59	0,53000	569,527	5116,09
szén	1166,3	3105	70	1,34000	217,350	4160,70
olaj	420,0	59	331	0,97000	19,529	57,23
nap	1829,3	3796	54	0,06500	204,984	246,74
szél	323,3	664	54	0,01010	35,856	6,71
biomassza + biogáz	342,5	2070	130	0,05750	269,100	119,03
víz	58,3	212	114	0,00549	24,168	1,16
hulladék	49,4	161	108	0,62100	17,388	99,98
geotermikus	2,7	12	95	0,12000	1,140	1,44
összesen		35722			2542,302	9884

5. táblázat: A 2021. évi erőműtípusok szerinti költség- és kibocsátásadatai (szerző számítása) [7], [23]

3.3. Egyensúly Intézet 2030

Az Egyensúly Intézet a hazai villamosenergiafogyasztást 57 839 GWh-ra becsüli 2030-ra. Szerkezetét tekintve 36 százalék megújuló, 28 százalék nukleáris energia, 5 százalék földgáz és 30 százalék import lenne (6. táblázat). Az energiabiztonság és a kibocsátáscsökkentés érdekében az importplafont el kell törölni. Az intézet álláspontja szerint az éves 30 százaléknyi importarány műszakilag és pénzügyileg is kezelhető [3].

	Kapacitás MW	Termelés GWh	LCOE USD/MWh	LCA(CO ₂) t/MWh	LCOE millió USD	LCA(CO ₂) ezer tonna
nukleáris	2000	16000	68	0,00468	1088,00	74,88
gáz	4060	3200	62	0,53000	198,40	1696,00
nap	9000	10800	30	0,06500	324,00	702,00
szél	4000	8000	41	0,01010	328,00	80,80
biomassza + biogáz	434	2100	129	0,05750	270,90	120,75
egyéb	123	400	108	0,62100	43,20	248,40
összesen		40500			2252,50	2922,83

6. táblázat: Az Egyensúly Intézet 2030-as scenáriója (szerző számítása) [3: 49]

A 6. táblázatban az "egyéb" kategória magában foglalja a hulladékból, vízből, maradványhőből és más hasonló forrásokból származó energiát.

3.4. A 2030-as évek megnövekedett villamosenergia-energia igényű iparral

A késésben lévő Paks II befejezése és a terveken felüli villamosenergia-fogyasztás megköveteli az új energiaforrások megteremtését. Ez a jelenlegi tervek alapján három gázerőmű blokk megépítését jelenti, amely 1650 MW plusz kapacitást fog eredményezni a hálózatban. Mellette továbbra is üzemben lesz a lassan elavuló és alacsony kapacitásfaktorú bő 4 000 MW gázerőművi kapacitás (ebben benne vannak a gyorsindítású gázerőművek is). A napelemkapacitás értékét a 2030-as évekre a Nemzeti Tiszta Fejődési Stratégia 10 000 MW-ra becsüli [25]. A Nemzeti Energia- és Klímaterv 2023-as felülvizsgálati változatában 1000 MW szélenergia-kapacitást valószínűsít 2030-ra a jelenlegi 330 MW-tal szemben (7. táblázat) [26].

	Kapacitás MW	Termelés GWh	LCOE USD/MWh	LCA(CO ₂) t/MWh
nukleáris	2000	15768	68	0,00468
gáz	4095	9653	62	0,53000
gáz+	1650	11563	70	0,40000
olaj	420	59	344	0,97000
nap	10000	13400	30	0,06500
szél	1000	2190	41	0,01010
biomassza + biogáz	343	2070	129	0,05750
vízzerőmű	58	212	114	0,00549
hulladék	49	161	108	0,62100
geotermikus	3	12	95	0,12000
összesen		56164		

7. táblázat: A 2030-as években rendelkezésre álló erőműtípusok jellemzői (szerző szerkesztése) [25], [26]

A 2030-as elemzés során az import figyelembevétele a következőképpen történik: a 2030-ra prognosztizált energiafogyasztásból (68 TWh) levonjuk a tervezett importált energiát, és a különbséget tekintjük az ország saját termelésének. Ezt a saját termelési mennyiséget használjuk az erőművi portfólió optimalizálásához. Az optimalizálás során minden paraméter a 2030-ra várható körülményeket és technológiai fejlettséget tükrözi.

Az alábbi 8-10. táblázatok az LCOE- és LCA(CO₂)-minimum célérték portfólióit tartalmazzák évi 68 TWh fogyasztás és minimum 30%-os hazai megújuló termelés mellett, különböző importhányadok (30%, 25%, 20%) függvényében.

	LCOE- minimum GWh	LCA(CO ₂)- minimum GWh	LCOE- minimum		LCA(CO ₂)- minimum	
			LCOE millió USD	CO ₂ ezer tonna	LCOE millió USD	CO ₂ ezer tonna
nukleáris	15768	16644	1072,224	73,8	1131,792	77,9
gáz	7242	1509	449,004	3838,3	93,558	799,8
gáz+	9000	11563	630,000	3600,0	809,410	4625,2
olaj	0	0	0	0	0	0
nap	13400	13400	402,000	871,0	402,000	871,0
szél	2190	2190	89,790	22,1	89,790	22,1
biomassza + biogáz	0	2070	0	0	267,030	119,0
víztermelő	0	212	0	0	24,168	1,2
hulladék	0	0	0	0	0	0
geotermikus	0	12	0	0	1,140	1,4
összesen	47600	47600	2643,018	8405	2818,888	6518

8. táblázat: Az LCOE- és az LCA(CO₂)-minimum célérték portfóliók 47,6 TWh hazai termelés, 30% import és minimum 30% hazai megújuló esetén (szerző számítása)

	LCOE- minimum GWh	LCA(CO ₂)- minimum GWh	LCOE- minimum		LCA(CO ₂)- minimum	
			LCOE millió USD	CO ₂ ezer tonna	LCOE millió USD	CO ₂ ezer tonna
nukleáris	16644	16644	1131,792	78	1131,792	78
gáz	9653	4909	598,486	5116	304,358	2602
gáz+	9113	11563	637,910	3645	809,410	4625
olaj	0	0	0	0	0	0
nap	13400	13400	402,000	871	402,000	871
szél	2190	2190	89,790	22	89,790	22
biomassza + biogáz	0	2070	0	0	267,030	119
víztermelő	0	212	0	0	24,168	1
hulladék	0	0	0	0	0	0
geotermikus	0	12	0	0	1,140	1
összesen	51000	51000	2859,978	9732	3029,688	8320

9. táblázat: Az LCOE- és LCA(CO₂)-minimum célérték portfóliók 51 TWh hazai termelés, 25% import és minimum 30% hazai megújuló esetén (szerző számítása)

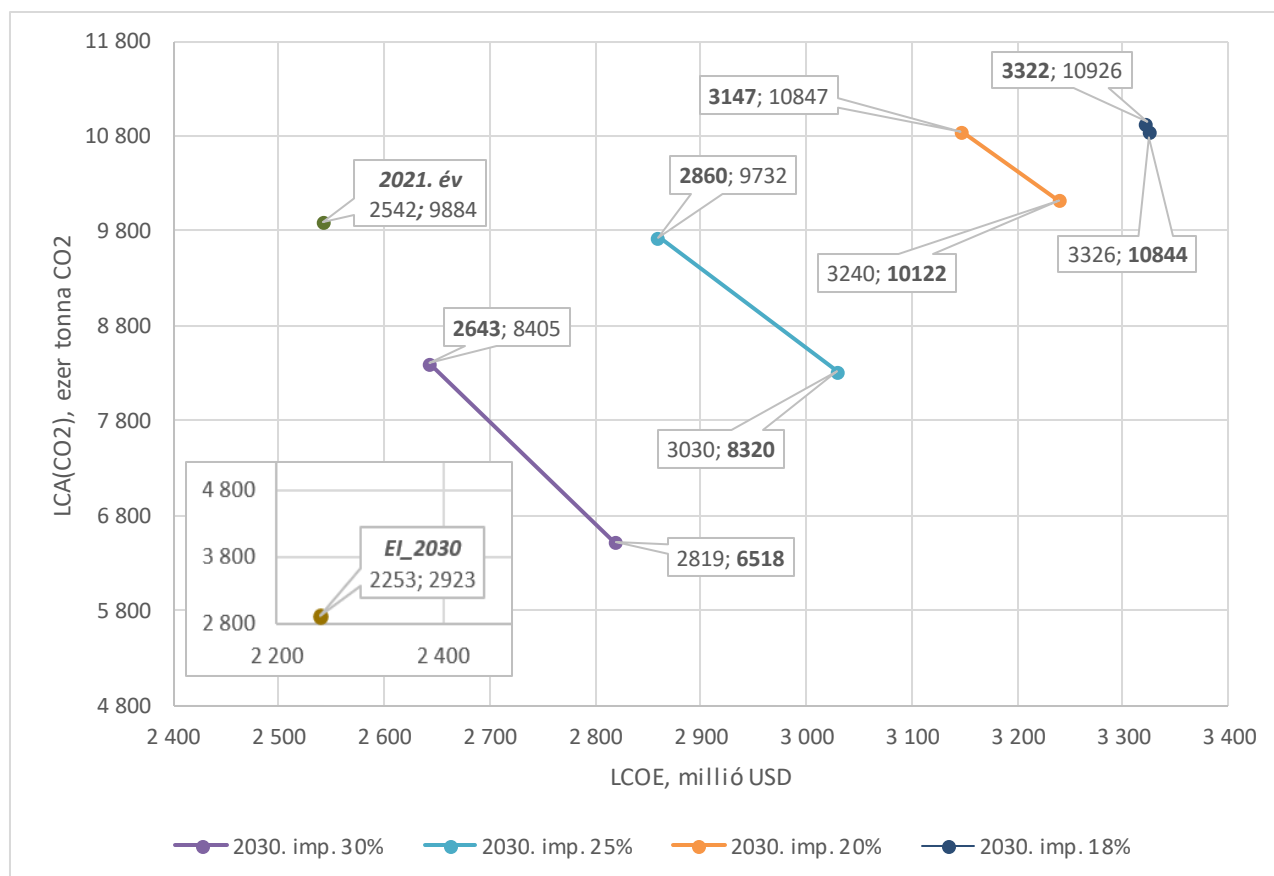
	LCOE- minimum GWh	LCA(CO ₂)- minimum GWh	LCOE- minimum		LCA(CO ₂)- minimum	
			LCOE millió USD	CO ₂ ezer tonna	LCOE millió USD	CO ₂ ezer tonna
nukleáris	16644	16644	1131,792	78	1131,792	78
gáz	9653	8309	598,486	5116	515,158	4404
gáz+	11563	11563	809,410	4625	809,410	4625
olaj	0	0	0	0	0	0

nap	13400	13400	402,000	871	402,000	871
szél	2190	2190	89,790	22	89,790	22
biomassza + biogáz	565	2070	72,885	32	267,030	119
vízermű	212	212	24,168	1	24,168	1
hulladék	161	0	17,388	100	0	0
geotermikus	12	12	1,140	1	1,140	1
összesen	54400	54400	3147,059	10847	3240,488	10122

10. táblázat: Az LCOE- és LCA(CO₂)-minimum célérték portfóliók 54,4 TWh hazai termelés, 20% import és minimum 30% hazai megújuló esetén (szerző számítása)

Az 1. ábra a 2021-es év állapotát mutatja, ahol az LCOE értéke 2 542 millió USD, az LCA(CO₂) értéke 9 884 ezer tonna szén-dioxid volt. Az 1. ábra belső diagramja az Egyensúly Intézet 2030-hoz tartozó értékeit mutatja, ahol az LCOE értéke 2 253 millió USD, az LCA(CO₂) értéke 2 923 ezer tonna szén-dioxid.

Az 1. ábrán lévő vonalak végpontjai egyrészt az LCOE minimumhoz tartozó LCA(CO₂), másrészt az LCA(CO₂) minimumhoz tartozó LCOE értékpárokat mutatják három import szaldó (30%, 25%, 20%) vonatkozásában, illetve szélsőségeként a 18 százalékos import is be lett jelölve. Ezek a 2030-as megnövekedett villamosenergia-igényű ipar hazai villamosenergia-termelés szcenáriójára vonatkoznak. A kivastagított szám az optimalizáció adta minimum értéket jelenti.



1. ábra: A különböző szcenáriók és import szaldók összesítő diagramja (szerző szerkesztése)

A különböző eredmények összehasonlítása érdekében a 11. és 12. táblázatokban az LCOE és LCA(CO₂) egy GWh-ra vetített értékei is kiszámításra kerültek.

	LCOE, ezer USD/GWh	LCA(CO ₂), ezer tonna/GWh
2021-es év	71,1691	0,2767
Egyensúly Intézet 2030	55,6173	0,0722

11. táblázat: A 2021-es év és a 2030 Egyensúly Intézet fajlagos LCOE- és LCA(CO₂) értékei (szerző számítása)

	LCOE minimum		LCA(CO ₂) minimum	
	LCOE ezer USD/GWh	CO ₂ ezer tonna/GWh	LCOE ezer USD/GWh	CO ₂ ezer tonna/GWh
30% import	55,5256	0,1766	59,2203	0,1369
25% import	56,0780	0,1908	59,4056	0,1631
20% import	57,8503	0,1994	59,5678	0,1861
18% import	59,5857	0,1959	59,6403	0,1945

12. táblázat: A 2030-ra tervezett, energiaintenzív ipart kiszolgáló erőművi portfólió fajlagos LCOE- és LCA(CO₂)-minimum értékei, eltérő importráták mellett (szerző számítása)

4. Következtetés, összegzés

A 2011-ben készült Nemzeti Energiastratégia 2030-at [27: 30290], az atom-szén-megújulókat forgatókönyvet valószínűsítette, a gázon alapuló erőművek szinten tartása mellett. Jelentős növekedést jósoltak a megújulóknak. A szén- és biomassza erőműveknek a tiszta szén technológia bevezetését prognosztizálták. „Az Atom-Szén-Zöld forgatókönyv megvalósításával kiválthatóvá válik a hazai össz fogyasztás 13%-át kitevő jelenlegi – elsősorban nyári – villamosenergia-import. Sőt, az importot a villamosenergia-termelésünk 14%-át kitevő export válthatja fel 2030-ra...” (sic!) [27: 30215]. A villamosenergia-termeléshez kapcsolt 2011-es CO₂-intenzitás 370 gramm CO₂/kWh szintről 2030-ra megközelítőleg 200 gramm CO₂/kWh-ra fog csökkenni [27: 30217]. A MAVIR 2015 és Aszódi alapján 2030-ra 50,4-52,2 TWh villamosenergia-fogyasztás várható [28]. Ezt az értéket a 2023-ban felülvizsgált Nemzeti Energia- és Klímaterv 55-60 TWh-ban jelölte meg 2030-ra [26: 244-245].

A fentiekből is kitűnik, hogy közel tízéves intervallumban is mennyire egymástól jelentősen eltérő forgatókönyvek készültek. A cikkben vizsgált scenárió 68 TWh-ás éves villamosenergia-fogyasztással számol 2030-ra. Ennek LCOE- és LCA(CO₂)-minimum értékek alakulását vizsgálja különböző importhányadok mellett. A 2023-as felülvizsgált Nemzeti Energia- és Klímatervhez képest ez 8-13 TWh-s növekedést jelent. Ennek fő oka az olyan ipari beruházások jövőbeli létesítése, amelyek igen nagy volumenű villamosenergia-fogyasztással járnak. A 2030-as erőművi portfólió egyik sarkalatos pontja, hogy a Paks II nukleáris erőmű addigra nagy valószínűséggel nem valósul meg. Elkészülése esetén ez kétszer 1200 MW kapacitásbővülést fog jelenteni a magyar erőművi portfólióban. Addig ezt a hiányt gázerőművekkel és az egyre növekvő megújuló – főleg napelemes – energiákkal kívánják pótolni. Az új gázerőművek már tervezési szakaszban vannak, és 1650 MW új kapacitást fognak jelenteni. Megjegyzendő, hogy az egyre inkább elavuló gázerőművek is lassan cserére szorulnak, illetve az időjárásfüggő megújuló energiák is szükségessé teszik az új gázerőművi kapacitások megvalósulását. Ezekre szükség van az ellátásbiztonság és a hálózatstabilitás fenntartása érdekében is.

Az eredmények azt mutatják, hogy a jelenlegihez képest a 2030-as erőművi portfólió alacsonyabb LCA(CO₂) értékkel jár, mind a harminc százalékos, mind a huszonöt százalékos villamosenergia-import mellett. Az is igaz, hogy a LCOE értékek mindkét esetben magasabbak. Az is jól látszik az eredményeken, hogy a kedvezőbb LCA(CO₂) értékekhez növekvő LCOE értékek tartoznak. Meg kell jegyezni, hogy a

klímaváltozással kapcsolatosan vállalt kötelezettségek érdekében szükséges a magasabb költségek vállalása. Erre ösztönzőleg hat az országonként kiosztható ingyenes kvóta csökkenése, ami csak egyes EU-országoknak – köztük Magyarországnak – jár 2030-ig [29]. Fontos figyelembe venni azt is, hogy a jövőbeni szén-dioxid kvóta ára folyamatosan emelkedik. A cél az, hogy drágább legyen szén-dioxid kvótát vásárolni, mint amennyiért egy erőmű vagy cég klímabarát beruházásokat tudna végrehajtani. Ezért inkább a probléma megoldása lesz az érdekük, nem pedig az, hogy kivásárolják magukat a kötelezettségekből [30].

Az optimalizáció eredményei ugyan elmaradnak az Egyensúly Intézet 2030-as számaitól, azonban az Egyensúly Intézet 2030-as scenáriója nagyobb megújulóenergia-aránnyal és kisebb villamosenergia-fogyasztással számolt a 2030-as évet illetően.

Amennyiben az eredményeket egységnyi villamosenergiára vetítjük, úgy a 2030-ra tervezett erőművi összetétel, minden mutatóban kedvezőbb a 2021-es év számaihoz képest. A mutatók, mind az életciklus-költség, mind az életciklus alatti szén-dioxid-kibocsátás terén alacsonyabbak, mint a 2021-es évé. Ezek még akkor is kedvezőbb értékűek, ha az LCOE-minimum esetén az LCA(CO₂) értéket, az LCA(CO₂)-minimum esetén az LCOE értéket vesszük alapul az összehasonlításnál. Az is igaz, hogy a 2030-ra végezett számítások LCA(CO₂) értékei elmaradnak az Egyensúly Intézet 2030 scenáriójától, viszont az életciklus-költségek szinte azonos értékűek. A 2030-as scenáriókat az importráták szerint a csökkenő import hányad jelentősen növeli az erőművi portfólió fajlagos életciklus költség minimumát és jelentősen növeli a fajlagos szén-dioxid-kibocsátás minimumát.

Fontos megjegyezni, hogy az import csökkenésével ugyan a villamosenergia-import függőség csökken, addig más energiahordozók – főleg a gáz, illetve a majdan elkészülő Paks II után a nukleáris fűtőanyag – terén a függőség nő. Az eredményekből az is kiderül, hogy az import csökkenésével – főleg 25%-os import alatt – a portfólió szűkül (rövidebb szakaszok jelzik az 1. ábrán), azaz csökken az elérhető erőművi kapacitások mozgástere.

A fent vázolt módszer alkalmas arra, hogy mind a jelen, mind pedig a jövő erőművi portfóliók sarokpontjait meghatározzuk. A cikkben a teljes életciklus alatti költség és a teljes életciklus alatt kibocsátott szén-dioxid-kibocsátás minimum-maximum értékpárjainak, illetve ezek egységnyi villamosenergia-mennyiségre vetített értékeinek kiszámítására láttunk példát. Természetesen más erőművi paraméterek esetén is használható a módszer. Mivel ezek sarokpontok, ezért az optimális erőművi mix ezen pontok között van. Az, hogy ez az érték hol van pontosan azt nagyon sok tényezőtől függ. Ezek főleg gazdasági, műszaki és energiabiztonsági szempontok.

Összeférhetetlenségek

A szerző nem ismer összeférhetetlenségi tényezőt.

Hivatkozások

- [1] Nemzeti Energia- és Klímaterv, 2020, Elérhető: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/hu_final_necp_main_hu_0.pdf [Elérés: 2024. március 11.]

- [2] Magyarország Kormánya, „Orbán Viktor beszéde...”, *Kormány.hu*, Elérhető: <https://kormany.hu/beszedekek-interjuk/miniszterelnok/orban-viktor-beszede-a-magyar-kereskedelmi-es-iparkamara-gazdasagi-evnyito-esemenyen-20230309> [Elérés: 2024. március 18.]
- [3] „Hogyan újítsuk meg 2030-ra Magyarország energiarendszerét?”, *Egyensúly Intézet*, Elérhető: https://egyensulyintezet.hu/wp-content/uploads/2023/03/energia_hatter.pdf. [Elérés: 2024. március 18.]
- [4] O. Toldi, „Modern földgáztüzelésű erőművekre márpedig szükség van”, *qbit.hu*, . Elérhető: <https://qbit.hu/2023/04/04/toldi-otto-modern-foldgasztuzelesu-eromuvekre-marpedig-szukseg-van>. [Elérés: 2024. április 18.]
- [5] G. Hegedűs, „Három új gázerőmű épül Magyarországon, ismertté váltak a helyszínek”, *Magyar Építők*, 2023, Elérhető: <https://magyarepitok.hu/energetika/2023/03/harom-uj-gazeromu-epul-magyarorszagon-ismertte-valtak-a-helyszinek> [Elérés: 2024. március 25.]
- [6] A. M. Orbán, „Megkerülhetetlen a gázerőművek szerepe a folyamatos villamosenergia-ellátásban”, *vg.hu*, Elérhető: <https://www.vg.hu/energia-vgplus/2023/04/megkerulhetetlen-a-gazeromuvek-szerepe-a-folyamatos-villamosenergia-ellatasban> [Elérés: 2024. május 03.]
- [7] S. Smit, L. Jánoskúti, A. Havas, P. Puskás and M. Békés, „Repülőrajt, A magyar gazdaság növekedési pályája 2030-ig”, *McKinsey & Company*, Elérhető: https://www.mckinsey.com/hu/~/_media/McKinsey/Locations/Europe%20and%20Middle%20East/Hungary/Our%20Insights/Flying%20start%20Powering%20up%20Hungary%20for%20a%20decade%20of%20growth/McKinsey-Hungary-2030-Report-December-HU.pdf [Elérés: 2024. március 21.]
- [8] T. Badouard, D. M. de Oliveira, J. Yearwood and P. Torres, „Final Report Cost of Energy (LCOE)”, *Trinomics*, 2020, Elérhető: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-10/final_report_levelised_costs_0.pdf [Elérés: 2024. március 21.]
- [9] G. R. Timilsina, „Are renewable energy technologies cost competitive for electricity generation?”, *Renewable Energy*, Volume 180, 2021, Pages 658-672, ISSN 0960-1481, Elérhető: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.088>
- [10] „LCOE V16.0”, *Lazard 2023*, Elérhető: <https://www.lazard.com/media/typdngxmm/lazards-lcoeplus-april-2023.pdf> [Elérés: 2024. március 18.]
- [11] Macrotrends, Euro Dollar Exchange Rate (EUR USD), Elérhető: <https://www.macrotrends.net/2548/euro-dollar-exchange-rate-historical-chart> [Elérés: 2024. július 8.]
- [12] I. Bodnár, „Villamosenergia-termelés környezeti hatásainak elemzése”, *Multidiszciplináris tudományok*, 11. kötet. (2021) 4 sz. pp. 382-394. Elérhető: <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.4.42>
- [13] T. Kapros, „Erőművek CO₂ kibocsátás csökkentése CCS technológiák alkalmazásával”, *Hulladék Online* elektronikus folyóirat 3. évfolyam 2. szám 2012, ISSN 2062-9133, Elérhető:

https://epa.oszk.hu/02000/02099/00004/pdf/EPA02099_hulladek_online_2012_2_kapros2.pdf [Elérés: 2024. március 18.]

- [14] P. Kádár, „Power generation portfolio optimization by externality minimization”, *Acta Electrotechnica et Informatica*, Vol. 10, No. 2, 2010, 5–9 5, ISSN 1335-8243 © 2010 Fei Tuke, , Elérhető: https://www.aei.tuke.sk/papers/2010/2/01_Kadar.pdf [Elérés: 2024. március 18.]
- [15] Z. Korényi, „Erőművek életciklus alapú komplex értékelése”, *Magyar Energetika*, 2022/2 június, Elérhető: https://energiaakademia.lapunk.hu/dokumentumok/202206/cikk_korenyi_me_2022_2_jav.pdf [Elérés: 2024. március 18.]
- [16] G. Varun, I.K.Bhat and R. Prakash, „LCA of renewable energy for electricity generation systems— A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 13, Issue 5, 2009, Pages 1067-1073, Elérhető: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.004>
- [17] R. Turconi, A. Boldrin and T. Astrup, „Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 28, 2013, Pages 555-565, Elérhető: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.013>
- [18] G. R. Timilsina, „Demystifying the Costs of Electricity Generation Technologies”, World Bank Group, Development Economics, Development Research Group, June 2020, Elérhető: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/125521593437517815/pdf/Demystifying-the-Costs-of-Electricity-Generation-Technologies.pdf> [Elérés: 2024. március 22.]
- [19] P. Kádár, „Multi Objective Power Mix Optimization”, *2010 IEEE 8th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMi)*, 189-193. Elérhető: <https://doi.org/10.1109/SAMI.2010.5423742>
- [20] „A magyar villamosenergia-rendszer 2021. évi adatai”, *mekh.hu* Elérhető: https://www.mekh.hu/download/1/72/31000/MEKH_statistikai_kiadvany_villamos_energia_A4_web_V%C3%89GLEGES.pdf [Elérés: 2024. március 18.]
- [21] Mathworks, Elérhető: https://www.mathworks.com/help/optim/ug/linprog.html#responsive_offcanvas [Elérés: 2024. április 18.]
- [22] B. Glevitzky, „Operációkutatás I.”, Debreceni Egyetem, 2003, Elérhető: <https://gyires.inf.unideb.hu/mobiDiak/Glevitzky-Bela/Operaciokutatas-1/opkut1.pdf> [Elérés: 2024. április 18.]
- [23] REKK, 2019, Elérhető: https://rekk.hu/downloads/projects/2019_REKK_NEKT_megujulo_final.pdf [Elérés: 2024. április 11.]
- [24] J. Szőnyi Judit, L. Rybach, L. Lenkey, T. Hámor, F. Zsemle, E. Pulay, T. Mátrahalmi, I. Striczki, T. Lengyel, Zs. Csernóczki, Á. Zahorán, J. Pápay and L. Alföldi, „A geotermikus energiahasznosítás nemzetközi és hazai helyzete, jövőbeni lehetőségei Magyarországon”, MTA /háttér tanulmány/,

- (2018), Elérhető: https://www2.sci.u-szeged.hu/geotermika/dokumentumok/MTA_geotermika.pdf [Elérés: 2024. április 11.]
- [25] O. Toldi, „A megújuló energia ellátásbiztonságra gyakorolt hatása, 2021”, *klimapolitikaiintezet.hu*, Elérhető: <https://klimapolitikaiintezet.hu/elemzes/a-megujulo-energia-ellatasbiztonsagra-gyakorolt-hatasa> [Elérés: 2024. április 18.]
- [26] Nemzeti Energia- és Klímaterv /2023. évi felülvizsgált változat/, https://commission.europa.eu/system/files/2023-09/HUNGARY%20-%20DRAFT%20UPDATED%20NECP%202021-2030%20_HU.pdf [Elérés: 2024. április 18.]
- [27] MAGYAR KÖZLÖNY, 2011. évi 119. sz, Elérhető: https://njt.hu/document/5d/5df020114130000077_1.PDF [Elérés: 2024. április 18.]
- [28] A. Aszódi, „A villamosenergia-fogyasztás növekedéséről”, 2015. december 05., Elérhető: https://aszodiattila.blog.hu/2015/12/05/a_villamosenergia-fogyasztas_novekedeserol [Elérés: 2024. április 18.]
- [29] European Commission, Modernisation Fund, Elérhető: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/modernisation-fund_en [Elérés: 2024. április 21.]
- [30] METGroups Countries, „A szén-dioxid (CO₂) kvóta működése és jövője”, *hu.met.hu* Elérhető: <https://hu.met.com/hu/mind-the-fyouture/mindthefyouture/a-szen-dioxid-co2-kvota> [Elérés: 2024. április 21.]



© 2024 by the authors. Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).