

AZ RCP KLÍMAFORGATÓKÖNYVEKEN ALAPULÓ NAP-SZÉL ERŐMŰ KAPACITÁSFAKTOR HORIZONTÁLIS ÉS VERTIKÁLIS ELEMZÉSE

Bozsik Nándor 

Ph.D. hallgató, Óbudai Egyetem, Biztonságtudományi Doktori Iskola
1081 Budapest, Népszínház u. 8., e-mail: bozsik.nandor@uni-obuda.hu

Takács István 

egyetemi tanár, Óbudai Egyetem, Keleti Károly Gazdasági Kar, Gazdaság- és Társadalomtudományi Intézet
1084 Budapest, Tavaszmező u. 17., e-mail: takacs.istvan@kgk.uni-obuda.hu

Absztrakt

A cikk egy szokatlan szemszögből vizsgálja a magyar napenergia- és szélenergia-termelés jelenlegi és jövőbeli alakulását. A nap- és szélerőművek kapacitásfaktor-változásán keresztül vizsgál meg két egymást követő harmincéves időszakot, három klímaforgatókönyv mentén. Az elemzés Magyarország nyolc NUTS2-es besorolású régiójára készült el. Az ilyen vizsgálatok segítenek a források optimális kihasználásában és a különböző termelési mintázatokkal rendelkező területek integrálásában, ezáltal növelve a termelés hatékonyságát és csökkentve annak bizonytalanságát. Ezeket a vizsgálatokat érdemes eltérő vertikális és horizontális felbontás mellett elvégezni.

Kulcsszavak: klímaváltozás, RCP, napenergia, szélenergia, kapacitásfaktor, portfólió

Abstract

The article takes an unusual perspective on the current and future development of solar and wind power generation in Hungary. It examines two consecutive 30-year periods through the change in capacity factor of solar and wind power plants under three climate scenarios. The analysis is carried out for eight NUTS2 regions of Hungary. Such studies help to optimise the use of resources and integrate areas with different production patterns, thereby increasing the efficiency of production and reducing its uncertainty. These studies should be carried out at different vertical and horizontal resolutions.

Keywords: climate change, RCP, solar energy, wind energy, capacity factor, portfolio

1. Bevezetés

A villamosenergia-rendszereket érintő éghajlatváltozás és geopolitikai kockázatok világszerte gyors intézkedéseket tesznek szükségessé, kiváltképp igaz ez Európára. Ebben nyújthat nagy segítséget a megújuló energiák használata, különösen a nap- és a szélenergia. Ez a két energiaforrás a legalacsonyabb kockázatú és a legkisebb károsanyag-kibocsátással járó technológia. A különböző energiaforrások és technológiák együttes üzeme csökkenti a kiegészítő energiák és az integráció költségeit (Prol et al., 2024).

A globális energiaipar arra készül, hogy a 2023–2028-as időszak alatt több megújuló kapacitást épít, mint az előző száz évben összesen. Ez a világ 130 országa támogató politikájának köszönhetően 3700 GW megújuló energiaforrás-kapacitást jelent. A 2028-ig terjedő időszakban több, a megújuló energiával kapcsolatos cél elérése várható, többek között:

- 2024-től a nap- és a szélerőművek több villamos energiát fognak termelni, mint a vízenergia,
- 2025-től a megújulókból termelt villamos energia meg fogja haladni a szénből termelt villamos energia mennyiségét,
- 2025 és 2026 küszöbén a nap- és szélenergiatermelés meghaladja a nukleáris villamosenergia-termelést,
- 2028-ra várhatóan a megújulókból származó villamosenergia-termelés a világ villamosenergia igényének 42%-át fogja szolgáltatni. A nap- és szélenergia a villamosenergia-termelés 25%-át teszi majd ki (IEA, 2023a).

A megújuló energiaforrások közül a napelemes technológia az egyetlen, amely 2050-ig tervezett nettó nulla kibocsátású (NZE) forgatókönyv mentén halad. A többi megújuló a szél-, a víz-, a geotermikus, a naphő- és az óceáni energia jelentősen elmarad ettől. Ahhoz, hogy ezek is a napelemes energiaforrás fejlődését megközelítő pályára álljanak, az 5%-ról 17%-ra kell növelniük a részesedésüket az összes villamosenergia-termelésen belül. Ezen cél megvalósulásához a megújuló energiaforrásoknak évi átlagosan 13%-kal kell növekedniük (IEA, 2023a).

Az NZE-forgatókönyv szerint a szén-dioxid-kibocsátás csökkentésének egyik legfontosabb tényezője a megújuló energiák bővítése. Ennek megvalósításban a legnagyobb szerepe a nap- és szélenergia alkalmazásának van. Ez a technológia játszhatja a legnagyobb szerepet a fosszilis energiaforrások kiszorításában. Ezek közül is a legszenneyezőbbet, a szénelapú erőműveket válthatja ki. A végfelhasználói szektorban a megújuló energia közvetlenül villamos áramként, közvetetten pedig például 'zöld hidrogénként' használható fel. Ezek a módok az eddig használt fosszilis tüzelőanyagok jelentős részét kiválthatják. A végfelhasználói szektoron belül ez leginkább az ipar és a közlekedés ágazatát fogja érinteni.

2. A nap- és szélenergia jelenlegi helyzete Magyarországon

2.1. Napelemes energia

A napelemes (fotovoltaikus v. PV) energiatermelők egyik nagy előnye a moduláris technológia. A modulok néhány wattos teljesítményétől a több száz wattos teljesítményéig széles a kínálat. Ezek felhasználásával a háztartási méretű (0–50 kW) kiserőművektől (HMKE) a közepes méretű (>50 kW, <500 kW) erőműveken át a naperőművekig (>500 kW) széles energiaigény kielégíthető. A szabványos moduloknak köszönhetően a gyártásuk és tesztelésük könnyen automatizálható (IEA, 2023b).

A napelemek gyártása drága nyersanyagokat igényel, ennek ellenére – főleg közüzemi teljesítményszinten – ez a legolcsóbb megoldás a villamosenergia-termelésre a legtöbb országban. A növekvő energiaárak mellett a háztartási elterjedése is egyre nő. A napelemes energiatermelő-rendszerek ma már az elosztott villamosenergia-termelés egyik alappillérvé váltak. A házak tetőzetétől az épületek falain át a bányák meddőhányójáig mindenhol megtalálhatók. Sok esetben másodlagos funkcióval is bírnak, például árnyékolás (IEA, 2023b).

Igen fontos, hogy a napelemes rendszerek az elmúlt években tapasztalt nagy fokú növekedése folytatódjon. Ez kell ahhoz, hogy a 2050-re kitűzött nettó nulla kibocsátású forgatókönyv teljesüljön, ehhez pedig folyamatos szakpolitikai támogatás is szükséges. A napelemek önmagukban a megújuló kapacitások bővülésének háromnegyed részét tették ki 2023-ban. A következő években a megújuló energiaforrások bővülésében a nap- és a szélenergia bő 95%-ot fog kitenni. Ennek fő oka, hogy a termelési költségek alacsonyabbak, mint a fosszilis energiaforrásoké, amelyben fontos szerepe van az egyre dráguló szén-dioxid-kvótának is. Az előrejelzések szerint 2028-ra a 2022-höz képest kétszeresére nő a nap- és szélenergia (IEA, 2023b).

2.2. Szélerenergia

A szárazföldi szélerenergia (onshore) már igen hosszú múltra tekint vissza. Az utóbbi időben a fejlődési irány, hogy maximalizálja a beépített kapacitások villamosenergia-termelő képességét. Más szóval a cél a szélerőművek kapacitásfaktor (CFR) növelése. A technológia nagy léptékben fejlődik, a szélturbinák nagyobbak lettek, magasabb lett az agymagasság és nagyobb lett a rotorátmérő. A tengeri szélerenergia (offshore) nagy valószínűséggel még gyorsabban fog növekedni az elkövetkező években, mivel a turbinák tengeri telepítése egyre nagyobb hatásokkal tudja kihasználni az erősebb szeleket.

A nettó nulla kibocsátású forgatókönyv szerint 2050-re a napenergia mellett a szélerenergia lesz a villamosenergia-termelés meghatározó forrása. Ehhez már a 2030-ig tartó szélkapacitás-növekedést jelentősen gyorsítani kell, hogy a 2050-re kitűzött célok teljesülni tudjanak. Ezért, mind a szárazföldi, mind a tengeri szélerőművek fokozott állami támogatást igényelnek. A támogatásokon kívül fontos még az engedélyeztetések megkönnyítése és az elbírálási határidők csökkentése (IEA, 2023c).

2.3. A napelemes és szélerenergia-termelés számokban

A magyar bruttó villamosenergia-termelés bő 73%-át a nem megújulók adják. A villamos energia 45,6%-át a nukleáris, 20,6%-át a földgáz- és a 7,2%-át a széntüzelőanyag-alapú erőművek termelték 2023-ban. A megújulók terén a napelemes energia 18,7%-ot, a szélerenergia 1,9%-ot, a biomassza 3,2%-ot a többi együttesen 2,8%-ot képviselt 2023-ban (MEKH, 2024).

1. táblázat A magyar éves bruttó nap- és szélerenergia-termelés (GWh), 2018–2023

	2018	2019	2020	2021	2022	2023*
Szélerenergia	607	729	655	664	610	644
Napenergia	629	1497	2459	3796	4732	6537
ebből HMKE	372	576	851	1398	1613	2130
Összesen	1236	2188	3114	4460	5342	7181

* előrejelzés

Szembetűnő, hogy míg a napenergia 2018-tól 2023-ig több mint tízszeresére nőtt, addig a szélerenergia szinte változatlan maradt. Ez utóbbi oka a 2016 óta életben lévő „szélerenergia stop” jogszabályi rendelet. A napelemes és a szélerenergia-termelésnél érdemes megjegyezni, hogy 2018-ban 1 : 1 volt az éves termelésük aránya, ez 2023-ra 11 : 1-re változott. Az is szembetűnő, hogy amíg 2018-ban a nagyüzemi és a háztartási méretű napelemes erőművek 1 : 1 arányt képviseltek, addig 2023-ra ez az arány 2 : 1-re változott (1. táblázat) (MEKH, 2024).

2.4. RePowerEU

A 2023-as magyarországi RePowerEU terv legfontosabb célja az orosz gáztól való függetlenség elérése. Ennek érdekében kerültek meghatározásra az energiapolitikai irányok és célkitűzések. A leválás eléréséhez két fő területet határoztak meg, az egyik az energiafogyasztás csökkentése, a másik a megújuló energiaforrások minél nagyobb mérvű kihasználása. Lényeges, hogy az energiatermelés terén a megújulók felé mozduljunk el, ne pedig a fosszilis tüzelőanyagok használatának irányába (European Council, 2024) (Farkas, 2023).

Ahhoz, hogy a jövőben a megújuló energiák minél nagyobb súllyal szerepeljenek a bruttó végső energiafogyasztásban, a Nemzeti Energia és Klímatervben specifikus célokat dolgoztak ki. A Nemzeti Energia és Klímaterv (magyarul: NEKT, angolul: NECP), készítését és időszakos felülvizsgálatát az Európai Unió (EU) 2018/1999 rendelete („az energiaunió és az éghajlat-politika irányításáról”) írja elő (Vigh, 2023).

A specifikus célok 2030-ra 13 GW időjárásfüggő megújuló energiakapacitás beépítését határozza meg. Ebből 12 GW-ot a napenergia és 1 GW-ot a szélenergia képvisel. Sajnos rendszerüzemeltetés szempontjából ez az arány nem a legkedvezőbb, sőt messze van tőle. Egyelőre ebbe az irányba mutatnak a bővítési tervek. A NEKT határoz arról is, hogy az időjárásfüggő megújuló technológiának támogatnia kell a többi termelővel való együttműködésen alapuló piac kiépítését. Emellett a technológiának le kell tudnia követni – amennyire lehetséges – a nap- és szélenergia-termelésből eredő ingadozásokat és törekedni kell, hogy a rendszer ezt minél rugalmasabban kezelje (Farkas, 2023) (NEKT, 2023).

A célok között van a megújuló energián alapuló erőművek csatlakozási engedélyének elősegítése. Erre szükség is van a közeljövőben megvalósuló közel 12 GW napenergia-kapacitásra bővülő villamosenergia-termelés hálózatba integrálása miatt. A gondot valószínűleg a szélerőművek korlátozott támogatása fogja okozni. Előreláthatólag a csatlakozási lehetőség nem fog az egész országra kiterjedni, illetve limitálva lesz a hálózatba kapcsolható szélerőművek száma is. Ez azért is hátrányos mert az orosz gázimportról való leválásnak az egyik leghatékonyabb eszköze a szélenergia alkalmazása lenne (NEKT, 2023).

3. Anyag

A számításokhoz az adatsorok a Copernicus Climate Change Service (C3S) Energyből származnak (Copernicus, 2024a). A Copernicus az Európai Unió űrprogramjának (EU Space) Föld-megfigyelési része. Ez széles körű környezeti információkat szolgáltat, amelyek műholdas és nem műholdas Föld-megfigyelésekből állnak. Ezt a programot jelenleg az Európai Bizottság irányítja. A végrehajtást a tagállamok, az Európai Űrügynökség (ESA), a Meteorológiai Műholdak Európai Szervezete (EUMETSAT), az Európai Környezetvédelmi Ügynökség (EEA) és a különböző időjárási központok és kutatóintézetek végzik, felügyelik. A program során hatalmas mennyiségű műholdas, földi, légi és tengeri mérőrendszerekből származó adat keletkezik. Az adatok feldolgozásuk és elemzésük után állnak rendelkezésre az ipar, a mezőgazdaság, környezetvédelem stb. számára (Copernicus, 2024b).

Ezek az adatkészletek az éghajlati és energiamutatókat biztosítják. Az energiaszektor számára pedig különösen fontos környezeti mutatókat tartalmaznak. Ilyen a napsugárzás, a szélsébség (10 és 100 méteres magasságban), a levegő-hőmérséklet, a csapadék és a légnyomás. Az energiamutatók között a villamosenergia-igényre, illetve a különböző forrásokból származó energiákra ad értékeket és előrejelzéseket, illetve történelmi adatsorokat. Az energiaforrások terén a szél-, a nap- és a vízenergia-kapacitásokra ad számított értékeket. Ezek a mutatók különböző földrajzi felbontásban érhetők el. A felbontás függ az adat típusától. A felbontások országos, regionális és rácsszintűek. A rácscok kb. 30 × 30 kilométeres területet fednek le, de ettől eltérő rácsfelbontás is elérhető. Különösen fontos a gazdasági elemzések szempontjából a földhasználaton alapuló NUTS0 és NUTS2 regionális összesítés (Nomenclature des unités territoriales statistiques). Ehhez hasonló a MAR0 és MAR1 osztályok is, ezek tengeri területeket határoznak meg. A NUTS-ok által meghatározott területeket az Eurostat (Európai Statisztikai Hivatal) definiálja (KSH, 2019). (2. táblázat)

2. táblázat*A magyarországi NUTS 0, 1 és 2-es osztályok (saját szerkesztés)*

NUTS0	Magyarország (HU)		
NUTS1	Közép-Magyarország (HU1)	Dunántúl (HU2)	Alföld és Észak-Magyarország (HU3)
NUTS2	Budapest (HU11)	Közép-Dunántúl (HU21)	Észak-Magyarország (HU31)
	Pest (HU12)	Nyugat-Dunántúl (HU22)	Észak-Alföld (HU32)
		Dél-Dunántúl (HU23)	Dél-Alföld (HU33)

A magyarországi NUTS2-es régiók földrajzi elhelyezkedése az alább látható. (1. ábra)



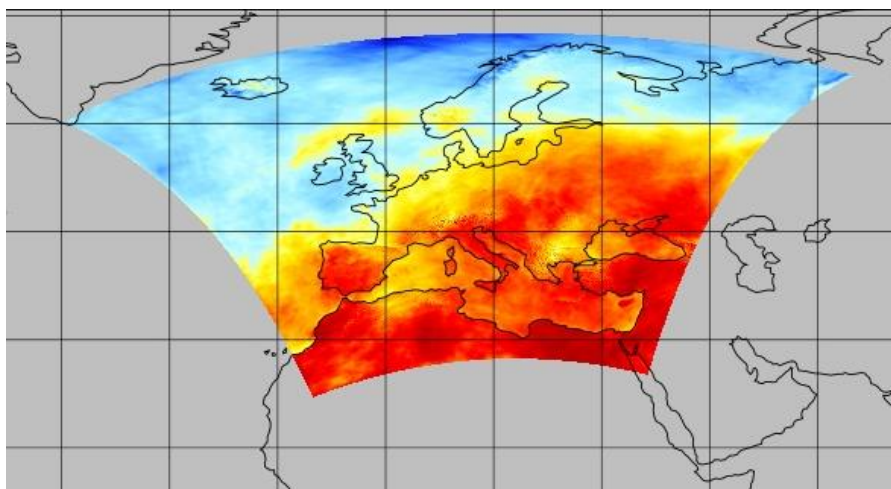
1. ábra. Magyarország NUTS2 szerinti felosztása (saját szerkesztés KSH [2012] alapján)

Az éghajlati és az energiarendszerre vonatkozó adatok térben és időben vannak rendezve. Több változó esetén különböző scénáriókat is tartalmaznak, mint például az RCP-forgatókönyvek. Az RCP-k (Representative Concentration Pathways) feladata elsősorban a légkörben található üvegházhatású gázok koncentrációváltozásának időbeli leírása és az ehhez szorosan kapcsolódó környezeti, gazdasági és energetikai előrejelzések nyomvonalának kijelölése. Ezek a forgatókönyvek lehetőséget adnak rövid, közép- és hosszú távú rendszer tervezésre, gazdasági előrejelzésre. Különösen fontos a hőmérséklet-emelkedésre adott villamosenergia-igény változás. Szintén fontos, hogy milyen hatással van a hőmérséklet-változás a megújuló energiák termelésére.

A már említett C3S Energy szolgáltatás időtartományokat tekintve három fő komponensből áll:

1. történelmi (1979-től napjainkig),
2. szezonális előrejelzés,
3. előrejelzés (2005–2100).

Ezek közül az előrejelzés adatkészlet, referenciául szolgáló éghajlati változókat generál. Mindezt az európai regionális klímamodell-kísérlet, a CORDEX alapján teszi (Copernicus, 2024a). A CORDEX-et (COordinated Regional climate Downscaling Experiment) a World Climate Research Programme hozta létre 2009-ben. Ezek kontinensméretű tartományokra készítene éghajlati modellszimulációkat. (2. ábra) (Copernicus, 2024c) Európa esetén ez a nyugati hosszúság -22 fok és a keleti hosszúság 45 fok közötti, illetve az északi szélesség 72 fok és az északi szélesség 27 fok közötti tartomány jelenti. A cikkben a CORDEX-nek az Euro-CORDEX elnevezésű szimulációkat végző ág adatai kerültek felhasználásra. (A CORDEX az Euro-CORDEX-hez képest még tartalmazza Európa mellett az Észak-Afrika tartományt is.) (Csaba, 2018)



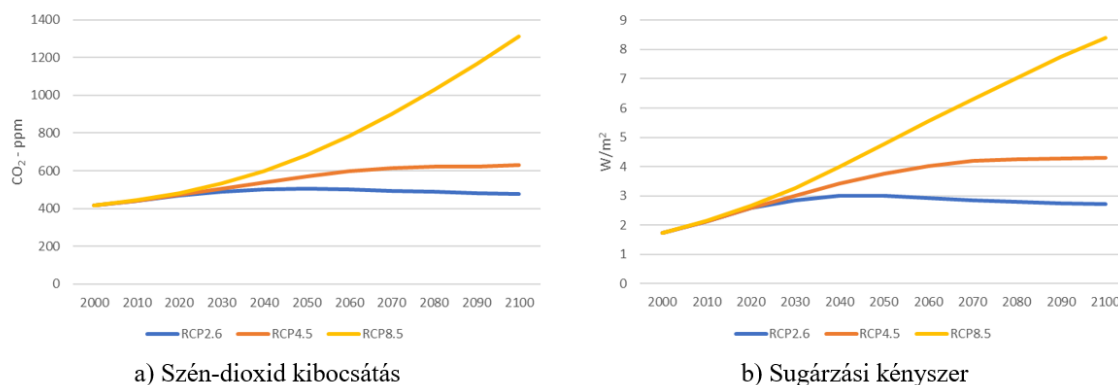
2. ábra. CORDEX (Copernicus, 2024c)

A klímaváltozás okozta hőmérséklet-emelkedés negatív hatással van a villamosenergia-termelésre. A megújulók esetén a napelemes rendszerek hatásfokát csökkenti a magas hőmérséklet. Ennek oka, hogy a napelemes rendszerek félvezető-technológián alapulnak, amelynek hatásfoka a hőmérséklet emelkedésével csökken. A hőerőművek esetén a hőmérséklet-emelkedés szintén negatív hatással van, mivel a rendelkezésre álló hűtővíz hőmérséklete is emelkedik, ezért az erőművek több energiát fordítanak a hűtésre. Ezért az erőművek önfogyasztása nő, ebből következik, hogy az erőmű hatásfoka csökken. A fogyasztási oldalon szintén kedvezőtlen hatással van a hőmérséklet-emelkedés, mivel mind az ipar, mind a lakosság hűtési igénye nő, amely növeli a villamosenergia-fogyasztást. A klímaváltozás okozta szélirány- és sebességváltozás is hatással van a villamosenergia-termelésre. A szél-erőművek egy bizonyos szélsőbesség-tartományban képesek gazdaságosan üzemelni. Ezek a mutatók hosszú távon földrajzi és talaj feletti magasságban is tartósan megváltozhatnak. Ez lehetőséget ad olyan területeken történő szél-erőművek létesítésére amire eddig nem volt lehetőség, vagy nem volt gazdaságos. A szél-erőművek gondolái ma már $80-100$ m és a feletti magasságban vannak, illetve a lapáttechnológiák is folyamatosan fejlődnek.

Az energia-idősorok értékeinek kiszámításához az éghajlati változók statisztikai modelljeit és az energiatermelő berendezések fizikai modelljeinek kombinációit használják fel. Ezek az adatok szolgálnak hivatkozási alapként az éghajlatváltozás és az energiaváltozók közötti kapcsolat robusztusságának felméréséhez (Copernicus, 2024d).

3.1. Az RCP klímaforgatókönyvek

Az üvegházhatású gázok (ÜHG) jövőre vonatkozó emisszióját és a légköri koncentrációját nehéz megjósolni. Ez ugyanis sok mindentől függ, mint például a népesség- és gazdasági növekedés, fokozott energia- és azon belül megújuló energiafelhasználás, technológiai változás és földhasználat stb. A klímamodellhez három gyakori koncentrációs útvonalat határoztak meg, az RCP2.6, az RCP4.5 és az RCP8.5. Az RCP-k térben és időben szimulálják az emberi tevékenység által kibocsátott üvegházhatású gázok és szennyező anyagok koncentrációját. Az RCP-k számszerűsítik az üvegházhatású gázok koncentrációját és a sugárzási kényszer mértékét. (3. ábra) A sugárzási kényszer az energia-egyensúly változásának a mutatója. Ezt olyan légköri „kényszerítő” anyagok jelenléte – ami lehet gáz, por stb. – okozzák, amelyek befolyásolják a globális energia-egyensúlyt és hozzájárulnak az éghajlatváltozáshoz (He et al., 2018).



3. ábra Az RCP-k szén-dioxid-kibocsátás (a) és sugárzási kényszer (b) alakulása (saját szerkesztés)

A cikkben az alábbi három RCP szerinti forgatókönyv került elemzésre, ezek fő jellemzői:

1. Az RCP2.6 esetén az üvegházhatású gázok, különösen a szén-dioxid-kibocsátás intenzitása a század elejéig jelentősen nem változik. Ezt követően a kibocsátás csökken, majd a század végére negatívvá válik. Ez a forgatókönyv feltételezi, hogy a fosszilis alapú tüzelőanyag-felhasználás intenzíven csökkeni fog, meredeken nőni fog a megújuló energiák használata, a termőföldek egy része bioüzemanyag-termelésre áll át és a metánkibocsátás 40%-os csökkenést ér el (van Vuuren et al., 2018) (van Vuuren et al., 2007).
2. Az RCP4.5 esetén a szén-dioxid-kibocsátás enyhe emelkedése várható a század közepéig, majd csökkeni kezd. Az energiafelhasználás jelentősen csökkeni fog, és nagy léptékű erdőszítések kezdődnek. Az új agrártechnológiáknak köszönhetően növekszik a hozam és az alacsonyabb hús fogyasztás miatt csökken a mezőgazdasági területek mérete. Mindenre kiterjedő új klímapolitikákat vezetnek be, és a metánkibocsátás nem nő tovább (Clarke et al., 2007) (Smith et al., 2006) (Wise et al., 2006).
3. Az RCP8.5 esetén az évszázad végére a szén-dioxid-kibocsátás a jelenlegi háromszorosa lesz. A metánkibocsátás fokozottan megnövekszik. Az energiafelhasználás és a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása tovább fog nőni. A megújuló energia felhasználása korlátozott felhasználású lesz, és csak alig valósul meg valami az éghajlat-politikai célkitűzésekből (Riahi et al., 2007).

A jövőben a különböző üvegházhatású gázok koncentrációja miatt az RCP2.6 azt eredményezi, hogy ennél a forgatókönyvnél lesz a legkisebb a felmelegedés és a klímaváltozás mértéke. Ezzel szemben az RCP8.5 esetén lesz a leggyorsabb a felmelegedés és a legnagyobb mértékű a klímaváltozás. Az RCP-

forgatókönyvek menete az évszázad közepéig alig tér el egymástól. Ennek oka, hogy az éghajlati rendszerek lassan reagálnak az üvegházhatású gázok változásaira. Másképpen fogalmazva az éghajlati rendszereknek nagy a tehetetlensége, ez egyben azt is jelenti, hogy a beavatkozásokra lassan történik a viszsza rendeződés. Az RCP8.5 jelentős felmelegedéssel fog járni és nagy lesz az ingadozás vízhozamokban, a vizek hőmérsékletében és a csapadék mennyiségben. Az RCP2.6 és RCP4.5 közötti különbség kisebb lesz, mint az RCP4.5 és az RCP8.5 között (Copernicus, 2024e) (Fujino et al., 2006).

3.2. Energetikai adatkészlet

Az energiakínálati és -keresleti adatok több forrásból tevődnek össze, egyik legfontosabb az ENTSO-E. Az ENTSO-E, a Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányítók Európai Hálózata az európai átviteli-rendszer-üzemeltetők (TSO-k) együttműködésének szövetsége. Ez a szervezet 36 országot képvisel, amiben 40 TSO tag felel Európa villamosenergia-rendszerének biztonságos és összehangolt működéséért (ENTSOE, 2024). Számos feladatuk között ágazati adatokat szolgáltat hosszú távú előrejelzések készítéséhez. (4. ábra)

3.2.1. Napelemesenergia-adatkészlet

A fotovoltaikus energia (SPV) adatbázist fizikai adatok és statisztikai modellek felhasználásával számítják ki. Az SPV kapacitás faktora (CFR) a valós termelés és a névleges beépített kapacitás aránya, hányadosa. A fotovoltaikus energia kapacitás faktorja dimenziómentes: $0 \dots 1$, illetve $0\% \dots 100\%$ közé esik.

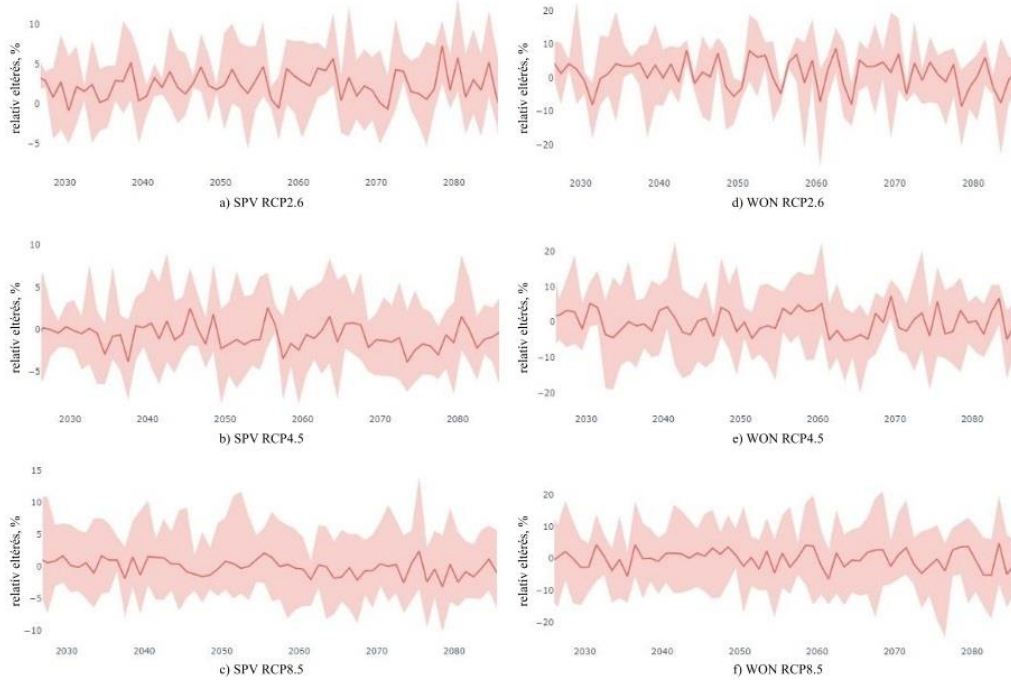
Az adott térség napelemes kapacitásfaktorát a hálózati pont szintjére számolják ki. Ez az érték nem egyetlen napelemes rendszer villamosenergia-termelését jelenti. A számítás elve az, hogy minden egyes rácspon, régió reprezentálja a telepített napelemes erőművek összesített villamosenergia-termelését. Ehhez meghatároznak egy referenciául szolgáló erőműmodellt. Ez a referenciamodell figyelembe veszi:

- a meteorológiai adatokat: globális horizontális sugárzást, hőmérsékletet,
- a napelemtábla-modul tájolását és -dőlésszögét,
- a napelemes rendszermodell elemeit: optikai veszteséget, modul, inverter stb. jellemzőket.

3.2.2. Szélerenergia-adatkészlet

Alapvetően kétféle szélerenergiát különböztetünk meg, az egyik a szárazföldi szélerenergia (WON), a másik a tengeri szélerenergia (WOF). A cikkben csak a szárazföldi szélerenergiáról lesz szó. A szélerenergia-kapacitási faktorát (CFR) – hasonlóképpen a napenergia-kapacitás faktorához – a tényleges termelés és a beépített kapacitás hányadosaként határozzák meg. A szélerenergia-kapacitás faktora szintén dimenziómentes: $0 \dots 1$, illetve $0\% \dots 100\%$ közé esik. A szélerenergia-termelés adatkészleteit egy egyszerű fizikai modell segítségével számítják ki.

A kapacitás faktorát a hálózati pontok szintjén számítják ki. Ez egyetlen szélturbina-típust vesz alapul a szélerenergia-számításhoz. Minden rácspononban egy turbina kerül modellezésre. Ezek a turbinák mind 100 méteres agymagassággal rendelkeznek. A cikkben a cél nem az, hogy a turbinák termelési adatait pontosan előre jelezze, hanem a régiók összehasonlítási alapja legyen. Megjegyzendő, hogy a kapacitásfaktorok a legtöbb esetben túlbecsültek a tapasztalati értékekhez képest, mivel nem a ténylegesen beépített turbinák jellemzőivel rendelkeznek. Ez alatt értendő az eltérő agymagasság, kisebb-nagyobb beépített kapacitás stb., illetve nem veszi számításba a turbinák, karbantartásából meghibásodásából eredő eltérő kihasználtságát.



4. ábra. A nap(spV)- és szél(won)erőművek kapacitás faktor (CFR) relatív értékeinek alakulása RCP-forgatókönyvek alapján (szerző szerkesztése Copernicus, 2024d alapján)

4. Módszer

Minden egyes régióhoz, időszakhoz és RCP-forgatókönyvhöz kiszámításra került a nap-szél portfólió közös szórása és az ehhez tartozó CFR-érték. A földrajzi felbontás a NUTS2 régiók szerint történt. A vizsgált két időszak a 2026–2055-ig és a 2056–2085-ig terjedtek ki. A bemutatott forgatókönyvek közül az RCP2.6, az RCP4.5 és az RCP8.5 kerültek összehasonlításra.

A számításokhoz a kiinduló adatok a Climate Data Store (Copernicus, 2024d) szolgáltatásból kerültek kinyerésre. Egy-egy NUTS2-es régió portfóliójának kiszámításához egy időszak éves kapacitásfaktor-értéke kerül letöltésre mind a napenergia, mind a szélenergia szintjén. Így rendelkezésünkre állt két harminc elemből álló éves idősor. Az idősorokból meghatározható az egyes időszakok szórása és a két idősor kovarianciája. A portfólió felbontása 10%-os lépésközü, ahol $w(spV)$ és $w(won)$ a kapacitásfaktorok súlyát jelenti a portfólióban (Copernicus, 2024d).

Ezek ismeretében az együttes szórásnégyzetük minden $w(spV)$ és $w(won)$ értékpárra:

$$\sigma_{spV,won}^2 = w_{spV}^2 \sigma_{spV}^2 + w_{won}^2 \sigma_{won}^2 + 2w_{spV}w_{won}cov(CFR_{spV}, CFR_{won}) \quad (1)$$

ebből az együttes szórás, ami nem más, mint a portfólió kockázata az adott $w(spV)$ és $w(won)$ értékpárnál:

$$\sigma_{spV,won} = \sqrt{\sigma_{spV,won}^2} \quad (2)$$

, ahol

- CFR_{spv}: a napelemes erőművek éves kapacitásfaktora,
- CFR_{won}: a szélenergiás erőművek éves kapacitásfaktora,
- w(sp_v): a CFR_{spv} súlya, 0 ... 1, illetve 0 ... 100%,
- w(won): a CFR_{won} súlya, 0 ... 1, illetve 0 ... 100%,
- w(sp_v) + w(won) = 1, illetve 100%,
- σ(sp_v): az időszak CFR_{spv} szórása,
- σ(won): az időszak CFR_{won} szórása,
- cov(CFR_{spv}, CFR_{won}): az időszak CFR_{spv} és CFR_{won} kovarianciája.

Az egyes portfóliókhoz a hozam értékét az idősorok átlaga és a portfólió pontjához tartozó w(sp_v) és w(won) súlyok függvényében számoljuk ki az alábbi szerint:

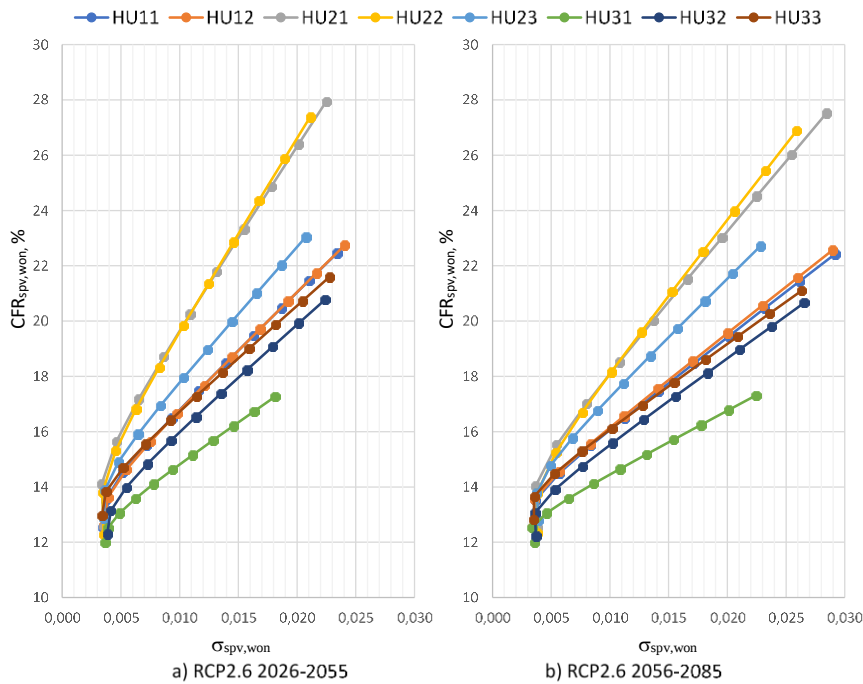
$$CFR_{spv,won} = w_{spv}\mu_{spv} + w_{won}\mu_{won} \quad (3)$$

ahol

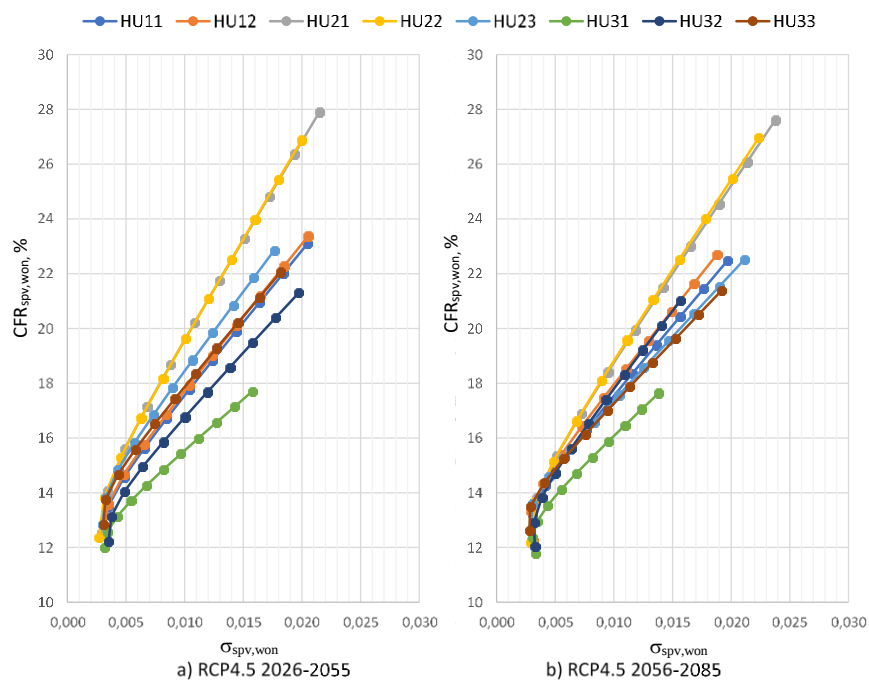
- μ(sp_v): az időszak CFR_{spv} átlaga,
- μ(won): az időszak CFR_{won} átlaga.

5. Eredmények

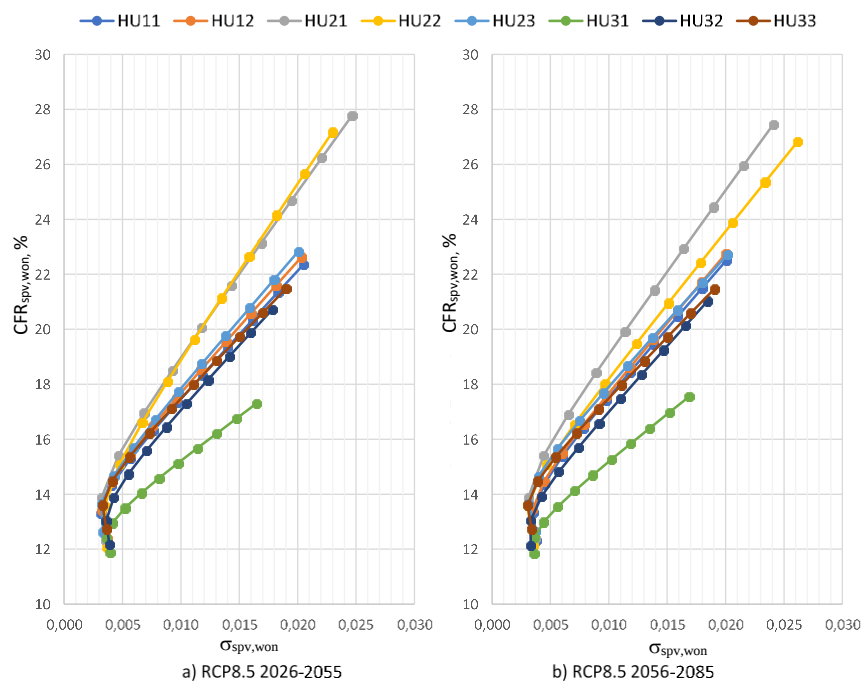
Az előzőtt fejezetben a 2-es és 3-es egyenletek eredményei adják az alábbi diagramok értékpárjait. Itt fontos megjegyezni, hogy az eredmények jelentősége az RCP-forgatókönyvek közötti különbségek és az időszakok közötti változás trendjében van.



5. ábra. Az együttes szórás és együttes kapacitásfaktor alakulása RCP2.6 esetén



6. ábra. Az együttes szórás és együttes kapacitásfaktor alakulása RCP4.5 esetén

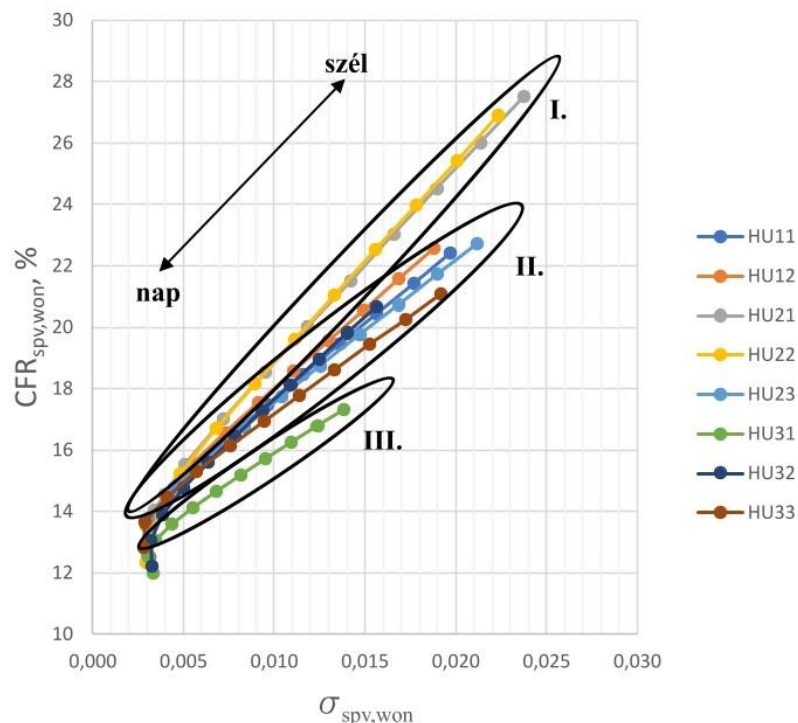


7. ábra. Az együttes szórás és együttes kapacitásfaktor alakulása RCP8.5 esetén

Az eredményekből kitűnik, hogy a nagyobb napenergiasúllyal rendelkező portfóliók viszonylag nem változnak sem a két időszak vonatkozásában, sem pedig a különböző RCP-forgatókönyvek terén. Ellenben a nagyobb szélerőmű portfóliókban enyhe csökkenés történik a kapacitásfaktor-értékekben és enyhe növekedés a szórás esetében. Ezek a változások az RCP-forgatókönyvenként a két időszak között jelentkeznek.

A 5–6–7. ábrákon jól elkülöníthető NUTS2-es régiók három csoportba sorolhatók:

- I: Közép-Dunántúl (HU21), Nyugat-Dunántúl (HU22),
- II: Budapest (HU11), Pest (HU12), Dél-Dunántúl (HU23), Észak-Alföld (HU32), Dél-Alföld (HU33),
- III: Észak-Magyarország (HU31). (8. ábra)



8. ábra. A régiók három fő csoportja

Ami elsőre szembetűnik, hogy minden egyes portfóliógörbén a nagy súllyal szereplő naperőmű kis CFR-értékkel és kis szórással rendelkezik. (Ez a görbék bal alsó tartománya.) A portfólió görbén a nagy súllyal szereplő szélerőmű nagy CFR-értékkel és nagy szórással rendelkezik. (Ez a görbék jobb felső tartománya.)

Mind a hat diagram – 5. ábra, 6. ábra és 7. ábra – jól mutatja, hogy mind a három klímaforgatókönyv esetén a napelemes erőművek CFR-érték és -szórás eredményei szűk tartományba esnek. Ezzel szemben a szélerőművek három csoportra különülnek el a CFR értékük és szórásuk alapján. Az I-es a magas CFR értékű és nagy szórású, a II-es közepes CFR-értékű és közepes szórású és a III-as alacsony CFR-értékű és kis szórású csoportokra. (8. ábra)

6. Összefoglalás

Az eredmények konkrét tervezéshez nem elegendők, viszont jó alapot adnak a jövőbeli optimális arányok megtalálásához. A számítások segítenek a földrajzi minták és időbeli trendek feltárásában. Ezt a módszert érdemes lehet továbbgondolni más megújuló energiák bevonásával. Magyarországon a nap- és a szélenergia mellett nagy lehetőségek vannak a biomassza és a földhő terén. A vizsgálat kiterjedhet nemcsak a villamosenergia-termelésre, hanem hő-, tüzelőanyag- és (bio)üzemanyag-szektorra is. Ennél is nagyobb léptékben pedig a vizsgálatokba bevonhatók a nem megújuló – egy ideig még velünk maradó – fosszilis energiahordozók is.

A kutatások során érdemes figyelembe venni, hogy Magyarország területének jelentős hányadán a napos és a szeles adottságok jobbak, mint Németország számos helyén. Több német kisvárosban a nap- és szélenergia együttes hasznosítása adja az önellátás alapját. A szélerőművek telepítésének újraengedélyezése és felzárkóztatása a napelemes energiatermelés mellé nagy lépést jelenthet az ingadozó időjárásfüggő termelés kiegyenlítésére. Ez minden 1000 MW napelem mellé 500 MW szélenergia telepítését jelenti. Ez segíthet csökkenteni az energia kiegyenlítésre fordított költségeket, és hozzájárul a minél nagyobb arányú megújuló energiák használatát, támogatva a NZE-klímacélok 2050-es elérését (Energiaklub, 2024).

Irodalom

- [1] Prol, J.L., de Llano Paz, F., Calvo-Silvosa, A., Pfenninger, S., and Staffell, I. (2024). Wind-solar technological, spatial and temporal complementarities in Europe: A portfolio approach, *Energy*, 130348. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130348>
- [2] IEA (2023a). *Energy system. Renewables*. *iea.org* (letöltés ideje: 2024. 04. 20.), <https://www.iea.org/energy-system/renewables> (letöltés ideje: 2024. 04. 10.).
- [3] IEA (2023b). *Energy system. Renewables. Solar PV*. *iea.org*, <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv> (letöltés ideje: 2024. 04. 20.).
- [4] IEA (2023c). *Energy system. Renewables. Wind*. *iea.org*, <https://www.iea.org/energy-system/renewables/wind> (letöltés ideje: 2024. 04. 20.).
- [5] MEKH (2024). *Bruttó villamosenergia-termelés 2014–2023*. https://mekh.hu/download/3/22/61000/4_2_brutto_villamos_energia_termeles_eves_2014_2023E.xlsx (letöltés ideje: 2024. 04. 20.).
- [6] European Council (2024). REPowerEU: energiapolitika az uniós országok helyreállítási és rezilienciaépítési terveiben. Európa Tanács. <https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/eu-recovery-plan/repowereu/> (letöltés ideje: 2024. 04. 10.).
- [7] Farkas D. (2023) *Megújuló energiaforrások a RePower EU tervében*. MTVSZ blog, https://mtvsz.blog.hu/2023/11/14/megujulo_energiaforrasok_a_repower_eu_tervben?utm_medium=lista&utm_campaign=bloghu_cimlap&utm_source=nagyvilag (letöltés ideje: 2024. 04. 10.).
- [8] Vigh P. (2023). *Közelíti Magyarországot a klímasegélyességhez, de továbbra sem érjük el vele. A frissített Nemzeti Energia és Klímaterv szakmai-civil értékelése*. <https://masfelfok.hu/2023/10/16/magyarorszag-nemzeti-energia-klimaterv-klimasegelyesség-eu-szakmai-civil-ertekeles/> (letöltés ideje: 2024. 04. 25.).
- [9] NEKT (2023). *Nemzeti Energia- és Klímaterve*. Comission Europa. https://commission.europa.eu/system/files/2023-09/HUNGARY%20-%20DRAFT%20UPDATED%20NECP%202021-2030%20_HU.pdf (letöltés ideje: 2024. 04. 25.).

- [10] Copernicus (2024a). *Copernicus Climate Change Service. Energy sector*. copernicus.eu. <https://climate.copernicus.eu/energy> (letöltés ideje: 2024. 04. 10.).
- [11] Copernicus (2024b). *About Copernicus*. copernicus.eu, <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus> (letöltés ideje: 2024. 04. 10.).
- [12] KSH (2019). *Területi atlasz – Régiók*. https://www.ksh.hu/teruletiatlasz_regiok (letöltés ideje: 2025. 02. 05.).
- [13] Copernicus (2024c). *CORDEX regional climate model data on single levels*. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cordex-domains-single-levels?tab=overview> (letöltés ideje: 2024. 04. 10.).
- [14] Csaba Zs. T. (2018). A Kárpát-medence domborzatának csapadékváltozásban betöltött szerepének vizsgálata regionális klíma modellek segítségével. In: *Aktuális környezeti problémák az időjárás és az éghajlat összefüggésében*. Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája, January 2018. <http://doi.org/10.31852/EMF.30.2018.159.166>
- [15] Copernicus (2024d). *Copernicus Climate Data Store*. <https://cds.climate.copernicus.eu/> (letöltés ideje: 2024. 04. 10.).
- [16] He, T., Wang, D. & Qu, Y. (2018). 5.06 – Land Surface Albedo. *Comprehensive Remote Sensing*. 140–162. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10370-7>
- [17] van Vuuren, D. P., John Weyant, J. & de la Chesnaye, F. (2006). Multi-gas scenarios to stabilize radiative forcing. *Energy Economics*, Vol. 28, Issue 1, 102–120. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2005.10.003>
- [18] van Vuuren, D., M. den Elzen, P. Lucas, B. Eickhout, B. Strengers, B. van Ruijven, S. Wonink, & R. van Houdt, (2007). Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-006-9172-9>
- [19] Clarke, L., Edmonds, J., Jacoby, H., Pitcher, H., Reilly, J. & Richels, R. (2007). *Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations*. Sub-report 2.1A of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington, 7 DC., USA, 154 p.
- [20] Smith, S. J. & Wigley, T. M. L. (2006). Multi-Gas Forcing Stabilization with the MiniCAM. *Energy Journal* (Special Issue #3) pp 373–391. <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-VolSI2006-NoSI3-19>
- [21] Wise, M. A., Calvin, K. V., Thomson, A. M., Clarke L. E., Bond-Lamberty, B., Sands, R. D., Smith, S. J., Janetos, A. C. & Edmonds, J. A. (2009). Implications of Limiting CO₂ Concentrations for Land Use and Energy. *Science*, May 29, 2009, 324, 1183–1186. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1168475>
- [22] Riahi, K., & Nakicenovic, N. (eds.) (2007). Greenhouse Gases – Integrated Assessment. *Technological Forecasting and Social Change*, Special Issue, 74 (7), September 2007, 234 p.
- [23] Copernicus (2024e). *How to use different RCPs?* copernicus.eu, <https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/2021-01/infosheet3.pdf> (letöltés ideje: 2024.04.10.).
- [24] Fujino, J., Nair, R., Kainuma, M., Masui, T. & Matsuoka, Y. (2006). Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. Multigas Mitigation and Climate Policy. The Energy Journal Special Issue. <http://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-VolSI2006-NoSI3-17>

- [25] ENTSO-E (2024). *ENTSO-E Mission Statement*. entsoe.eu, <https://www.entsoe.eu/about/inside-entsoe/objectives/> (letöltés ideje: 2024. 02. 25.).
- [26] Energiaklub (2024). *Energiaklub tanulmány – Szél és napenergia együtt*. <https://energiaklub.hu/files/study/Energiaklub%20tanulma%CC%81ny%20-%20Sze%CC%81l%20e%CC%81s%20napenergia%20egy%CC%88tt.pdf> (letöltés ideje: 2024. 04. 25.).