



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉSTERVEZET

BOZSIK NÁNDOR

A rurális térségek energiaellátása kockázatainak menedzselése energiaforrás diverzifikációval

Témavezető: Prof. Dr. Takács István

**BIZTONSÁGTUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA**

Budapest, 2025.06.01.

Tartalomjegyzék

Bevezetés	6
1 A villamosenergia-termelés optimalizációjának gazdasági és környezeti dimenziói	9
1.1 A villamosenergia-rendszer átalakulása és a kutatás célkitűzései	9
1.2 Kvantitatív modellezés LCOE és LCA(CO ₂) indikátorokkal	12
1.2.1 Az élelciklus-elemzés szerepe az erőművi teljesítményértékelésben	12
1.2.2 Az élettartamra vetített fajlagos energiaköltség (LCOE) számítása	12
1.2.3 Az élelciklusra vetített szén-dioxid-kibocsátás (LCA(CO ₂)) értelmezése	14
1.2.4 A kapacitásfaktor szerepe az erőművi hatékonyságban	16
1.2.5 Optimalizációs modell: lineáris programozás alkalmazása	17
1.2.6 A MATLAB programkód logikája és paraméterezése	19
1.3 Portfólió-optimalizálási eredmények különböző jövőképekre	20
1.3.1 A használt forrásadatok megbízhatóságának értékelése	20
1.3.2 A 2021-es hazai erőművi portfólió jellemzői	20
1.3.3 A 2030-as scenárió az Egyensúly Intézet előrejelzése alapján	21
1.3.4 A magas ipari energiaigényű forgatókönyv modellezése	22
1.4 A portfólióelemzés következtetései a nemzeti energiastratégiára nézve	27
2 Lakossági napelemes rendszerek fenntarthatósági és szabályozási aspektusai	30
2.1 A lakossági napelemes rendszerek szerepe az energiaellátásban	30
2.2 Modellalkotás HOMER-rel és szabályozási keretek figyelembevételével	32
2.2.1 A háztartások átlagos villamosenergia-felhasználása	32
2.2.2 Hálózati tarifák és szabályozási keretek bemutatása	32
2.2.3 Villamosenergia-díjszabás és támogatási rendszerek	33
2.2.4 Rendszerelemek, inverterek és akkumulátorok költség szerkezete	33
2.2.5 Meteorológiai adatsorok felhasználása a modellezésben	35
2.2.6 HOMER szoftver és HOMER Grid alapkonceptiói	36

2.2.7	A decentralizált energiarendszerek szimulációs és optimalizációs kerete HOMER környezetben	37
2.2.8	Szimulációs eljárás különböző rendszerkonfigurációkra	38
2.2.9	Rendszeroptimalizálás gazdasági és környezeti szempontok szerint	38
2.2.10	Érzékenységvizsgálat külső paraméterek változékonysága mentén	38
2.3	Gazdasági és környezeti indikátorok alakulása különböző rendszerkonstrukciókra	40
2.3.1	A kiegyenlített villamosenergia-költség (LCOE) eredményei	40
2.3.2	Életciklusra vetített szén-dioxid-kibocsátás.....	41
2.3.3	A beruházások pénzügyi megtérülése és hatékonysága	43
2.3.4	A megújulóenergia-részarány várható alakulása	46
2.4	A háztartási napelemes rendszerek fenntarthatóságával kapcsolatos következtetések	48
3	A megújuló energiaforrások teljesítményének modellezése különböző klímaforgatókönyvek mentén	50
3.1	A megújulók térbeli eloszlásának és szerepének háttere	50
3.1.1	A napelemes rendszerek jellemzői és elterjedése	51
3.1.2	A szélenergia-potenciál elméleti alapjai	52
3.1.3	A hazai megújuló energiaforrások	53
3.1.4	A RePowerEU stratégia	54
3.2	A megújuló energiatermelés jövőbeli alakulása RCP forgatókönyvek alapján: módszertani keret és modellezés.....	55
3.2.1	A Copernicus éghajlati adatbázis és idősorainak bemutatása.....	55
3.2.2	Energia-idősorok képzése statisztikai és fizikai modellek alapján.....	58
3.2.3	RCP forgatókönyvek és éghajlati feltételek jövőbeli változásai	58
3.2.4	Energiakínálati és -keresleti adatok forrásai és jellemzői.....	60
3.2.5	A napenergia-termelés regionális adatkészletei és kapacitásfaktorai	61

3.2.6	A szárazföldi szélenergia-termelés regionális adatkészletei és kapacitásfaktorai	61
3.2.7	Portfólióelemzés: nap- és szélenergia szórásának és hozamának meghatározása.....	62
3.3	Kapacitásfaktor-eredmények és klaszteranalízis értékelése.....	66
3.3.1	A magyarországi NUTS2 régiók portfólió diagramja	66
3.3.2	Klaszterek azonosítása hierarchikus módszerrel	68
3.4	Területi különbségek következtetései az energiarendszer adaptációjára	70
4	A klímaváltozás hatása a napelemes energiatermelés jövőbeli potenciáljára.....	73
4.1	A kutatás szakirodalmi háttere és koncepcionális áttekintése.....	73
4.2	Alkalmazott módszertan, modellezési eszközök és szimulációs feltételek	76
4.2.1	A napelemek energiatermelésének elméleti alapjai és számítási keretei..	76
4.2.2	Villamos áramkörre épülő fizikai modell és matematikai leírás	77
4.2.3	A modulok hőmérsékletfüggő hatékonyságváltozása.....	81
4.2.4	A teljesítménymaximum követés (MPPT) technikai megközelítése	82
4.2.5	Az éves szinten várható villamosenergia-termelés számítása	83
4.2.6	Az éghajlati forgatókönyvek (RCP2.6, 4.5 és 8.5) bemutatása	84
4.2.7	Meteorológiai adatforrások és adatelőkészítés	85
4.2.8	A System Advisor Model (SAM) szimulációs szoftver felépítése	86
4.2.9	A vizsgált napelemes rendszer telepítési paraméterei és konfigurációi ...	86
4.2.10	A sugárzási, hőtechnikai és villamos jellemzők integrált modellje.....	87
4.2.11	A szimuláció algoritmusai és számítási logikája	88
4.2.12	Pearson- és parciális korrelációs vizsgálatok alkalmazása	90
4.2.13	Lineáris regresszió és grafikus illeszkedési modellek	90
4.3	Eredmények és statisztikai értékelés az RCP forgatókönyvek mentén.....	92
4.3.1	Szimulációs eredmények regionális és időbeli bontásban	92
4.3.2	Idősoros elemzések és szezonális változások vizsgálata	93
4.3.3	Középtávú és hosszú távú trendek összehasonlítása.....	95

4.3.4	Pearson-korrelációs mátrix és értelmezése	96
4.3.5	Parciális korreláció: kontrollált hatásvizsgálat	98
4.3.6	Lineáris regresszió: magyarázóváltozók és trendirányok	99
4.3.7	Klaszteranalízis: a β_1 paraméterek alapján történő területi csoportosítás	100
4.4	A klímaváltozás hatásai a napelemes energiatermelés jövőbeli trendjeire és regionális eltéréseire	102
	Összegzett következtetések.....	104
	Hipotézisek értékelése	104
	Tudományos eredmények	106
	Ajánlás	108
	Irodalomjegyzék	110
	Táblázatjegyzék	121
	Ábrajegyzék	122
	Függelék.....	124
	Köszönetnyilvánítás.....	142

Bevezetés

A 21. század egyik legsürgetőbb kihívása a fenntartható és biztonságos villamosenergia-ellátás biztosítása, amely nem csupán a gazdasági növekedés és a társadalmi fejlődés alapfeltétele, hanem kulcsszerepet tölt be a klímaváltozás mérséklésében is. A fosszilis energiahordozóktól való fokozatos elmozdulás, a megújuló energiaforrások térnyerése és az energiatermelés dekarbonizációja egyre nagyobb hangsúlyt kapnak a globális és nemzeti energiapolitikákban. A technológiai, gazdasági és szabályozási keretek gyors átalakulása, valamint az éghajlati változások hatása új követelményeket támasztanak az energiarendszerek tervezésével és működtetésével szemben.

Magyarország villamosenergia-rendszere e folyamatok közvetlen hatása alatt áll. Az elavult erőművi kapacitások kiváltása, az importfüggőség mérséklése, a megújulók integrációjának elősegítése és a rendszer rugalmasságának biztosítása komplex szakpolitikai és műszaki megközelítést igényel. Ezzel összhangban az értekezés célja, hogy tudományos igényességgel tárja fel a hazai energiaellátás diverzifikációs lehetőségeit, különös tekintettel a gazdasági, környezeti és éghajlati szempontok együttes érvényesítésére.

Az értekezés egy átfogó kutatási koncepció mentén épül fel, amelyben a különböző vizsgálati szintek — makrogazdasági optimalizáció, háztartási méretű napelemes rendszerek elemzése, a megújulók jövőbeli teljesítményének előrejelzése klímaforgatókönyvek mentén, valamint a napelemes energiatermelésre gyakorolt klímaváltozási hatások — egymásra épülve és egymást kiegészítve szolgálják a fő kutatási kérdés megválaszolását. A disszertáció tehát nem különálló tanulmányok gyűjteménye, hanem egységes rendszerben vizsgálja az energiaellátás átalakulásának kulcstényezőit, hozzájárulva ezzel a nemzeti energiastratégiai célkitűzések tudományos megalapozásához.

A dolgozat négy fő vizsgálati egységre tagolódik, amelyek időben és térben is egymással összefüggő kérdésköröket ölelnek fel. Az első rész a magyar villamosenergia-termelés szerkezetének optimalizálását mutatja be gazdasági és környezeti indikátorok alapján. A második rész a háztartási napelemes rendszerek fenntarthatósági és szabályozási aspektusait elemzi. A harmadik rész a megújuló energiaforrások jövőbeli teljesítményének modellezésére koncentrálna az RCP klímaforgatókönyvek mentén, míg a negyedik rész a klímaváltozás hosszú távú hatásait vizsgálja a napelemes rendszerek

termelési potenciáljára. E négy egység közös jellemzője, hogy mindegyik kvantitatív módszertanon és szimulációs eszközökön alapuló, a fenntarthatóságot többdimenziós megközelítésben vizsgáló kutatás.

A kutatás biztonság tudományi jelentőségét az energiaellátás kockázatainak csökkentése, az ellátásbiztonság növelése és a klímaadaptív alkalmazkodóképesség tudományos megalapozása adja.

A disszertáció célja, hogy tudományos megalapozottsággal járuljon hozzá a hazai energiarendszer jövőorientált átalakításához, különös figyelmet fordítva a diverzifikációs lehetőségek optimalizálására, a környezeti hatások mérséklésére és az éghajlati adaptáció kihívásainak kezelésére.

A kutatási programot a fenntartható villamosenergia-termelés feltételrendszerének feltárása vezérelte, különös tekintettel az energiaellátás gazdasági, környezeti és éghajlati kihívásaira. Az értekezés célkitűzéseire igazodva a vizsgálatok kvantitatív alapokon nyugszanak, amelyek során optimalizációs modellek, életciklus-elemzések (LCOE és LCA(CO₂)), szimulációs szoftverek (MATLAB, HOMER, SAM) és statisztikai módszerek (korreláció- és regresszióelemzés, klaszteranalízis) kerültek alkalmazásra.

A disszertáció alapjául szolgáló kutatási kérdések a következőkben foglalhatók össze:

- Milyen gazdasági és környezeti optimalizációs lehetőségek állnak rendelkezésre a magyar villamosenergia-rendszer jövőbeli szerkezetének alakítására?
- Hogyan befolyásolják a szabályozási és műszaki keretek a háztartási napelemes rendszerek fenntarthatóságát?
- Milyen hatással bírnak az eltérő klímaforgatókönyvek a megújuló energiaforrások jövőbeli teljesítményére?
- Hogyan alakul a napelemes rendszerek teljesítménye a várható klimatikus változások tükrében, különös tekintettel a térségi eltérésekre?

A fenti kutatási kérdésekre adott válaszokat a fejezetekhez rendelt hipotézisek strukturált vizsgálata teszi lehetővé. Az egyes fejezetek céljai ugyan tematikusan elkülönülnek, azonban egymásra épülve, közös tudományos logikát követve vizsgálják a diverzifikált és klímatudatos energiatermelés lehetséges útvonalait. A módszertani megközelítések összehangolása lehetővé tette az elemzések közötti következetesség és összehasonlíthatóság megteremtését.

Az értekezés szerkezeti felépítése tehát a kutatási célok és módszerek természetes logikai egymásra épülését tükrözi. Az eredmények integrált módon járulnak hozzá a disszertáció központi céljához: a rurális térségek energiaellátásának kockázatcsökkentéséhez a megújuló alapú forrásmix diverzifikációjával.

A dolgozat a hazai villamosenergia-termelés jelenlegi kihívásait és a fenntartható, klímataudatos jövő irányába mutató lehetőségeket több, egymásra épülő vizsgálati szinten elemzi. A kutatási célok teljesülésének vizsgálatát hipotézisek mentén végeztem, amelyek strukturált értékelésére a [Hipotézisek értékelése] fejezetben kerül sor.

1 A villamosenergia-termelés optimalizációjának gazdasági és környezeti dimenziói

1.1 A villamosenergia-rendszer átalakulása és a kutatás célkitűzései

A villamosenergia-termelés összetételét számos szempontból lehet vizsgálni: műszaki, gazdasági, környezetvédelmi és klímavédelmi tényezők alapján. Ezen belül további bontás szerint is vizsgálódhatunk. Ebben a fejezetben a magyar villamosenergia-termelő rendszer összetétele egy gazdasági és egy klímavédelmi mutató összefüggésében kerül elemzésre. Az elemzés során az erőművek gazdasági és klímavédelmi összefüggései két mutató alapján kerülnek vizsgálatra: az életciklusukra eső költség és az életciklusuk során keletkező szén-dioxid-kibocsátás. Ezek a mutatók a jelenlegi és a 2030-ra tervezett forgatókönyvekből származnak. A számítások célja az egyes erőműv portfóliók költségének minimalizálása és a szén-dioxid-kibocsátás csökkentése. A változók közé tartozik az ország éves villamosenergia-igénye és nettó importja, valamint az erőművek 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 az erőművek elöregedése és az adatok jelentős bizonytalansága, mind gazdasági, mind szén-dioxid-kibocsátási szempontból. Sok esetben nehézséget okoz az adatok hozzáférhetősége is. Ezekben az esetekben a nemzetközi, hasonló technológiájú és korú erőművek átlagértékei kerültek alapul vételre. Egy másik nehézséget a gyakori jogszabályi változások jelentik, amelyek a jövő forgatókönyveit érintik. A kalkulációkat nehezíti az új energetikai beruházások bizonytalan megvalósulása, ideértve a szélerőművek újbóli engedélyezését, az új gázerőművek létesítését és a nukleáris kapacitások bővítését. Az egyes beruházások jelentős csúszásban vannak, például a 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 szélsőségesse váló időjárás. Ezen változók figyelembevétele rövid távon a Magyar Kormány hivatalos jelentésein, középtávon pedig a Nemzeti Energia- és Klímaterv (korábban Nemzeti Energiastratégia), a Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia (NTFS), az Egyensúly Intézet és a McKinsey jelentésein alapul.

A Nemzeti Energia- és Klímaterv (NEKT) egyik fő célja, hogy a megújulók aránya a villamosenergia-fogyasztáson belül elérje a 20 százalékot. 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. Ehhez jelentősen hozzájárulna 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 disszertáció írása közben bejelentett elektromos autógyártó-kapacitások energiaigénye. Az előbbi a növekvő elektrifikáció, az utóbbi az új ipari ágazatok jelentős villamosenergia-igénye miatt jelentkezik. Ezért a Kormány már 2030-ra is a tervezettnél magasabb, 68 TWh villamosenergia-fogyasztást prognosztizál [2]. Ennek a Magyar Kereskedelmi és Iparkamara rendezvényén, 2023. március 9-én elhangzott kijelentésnek az értéke hordoz némi bizonytalanságot, mivel a szakmai háttér nem ismert. Ezért 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 növekvő trenddel 2050-re 80–90 TWh vagy ennél magasabb hálózati villamosenergia-igény várható, különösen, ha figyelembe vesszük az új, jelentős energiaigényű ipari szegmensek megjelenését is.

A Paks II beruházás 2014-ben indult, befejezését 2032-re tervezik, de valószínűbb a 2035–36 közötti átadás. A jelentős késések miatt az új technológiák, például a moduláris reaktorok, a projekt gazdaságosságát megkérdőjelezhetik. Ettől függetlenül Paks II jövőbeli üzemének fontos szerepe lesz az ellátásbiztonság és a klímacélok elérésében. A klímacélok teljesítésében a cél a minimum harminc százalékos megújuló energiaforrás

részarány, illetve a fentebb már említett kilencven százalékos karbonmentesség elérése 2030-ra [3]. A Paks II beruházás késése, a megnövekedett villamosenergia-igény, az ország energiabiztonsági szempontjai és a nem kívánt import növekedése szükségessé teszi a hazai gázerőművi kapacitások bővítését [4]. Ezt a kapacitásnövelést a kormány új gázerőművek megépítésében látja. A tervek szerint a jelenlegi 4060 megawatt kapacitás mellé épülne még összesen 1650 megawatt kapacitású, korszerű, magas hatásfokú három gázerőművi blokk. Ezek az új blokkok 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 előrejelzései szerint a megújulók kapacitása 2040-re 19,3 gigawatt lesz, amelynek 80%-át naperőművek, 20%-át pedig szélerőművek adják. Fontos, hogy a napelemek és a szélturbinák költségei idővel tovább csökkennek. Ezek már ma is a legkisebb költséggel járó energiatermelők Magyarországon. A fosszilis alapú energiatermelők közül a legalacsonyabb költségű 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 LCOE csökkenés várható [7].

A fentiek alapján megállapítható, hogy Magyarország villamosenergia-igénye a közeljövőben nagymértékben növekedni fog. Azonban az energia összetétele (portfólió, mix) jelenleg még csak körvonalazódik. A számítások során a változók értékeihez számtani átlag és medián került alkalmazásra.

1.2 Kvantitatív modellezés LCOE és LCA(CO₂) indikátorokkal

1.2.1 Az életciklus-elemzés szerepe az erőművi teljesítményértékelésben

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-kibocsátás, valamint egyéb gázok és szilárd szennyezők emissziója. Ezek a 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 az építéstől az üzemeltetés végéig tartó fázisokat veszi figyelembe.

1.2.2 Az élettartamra vetített fajlagos energiaköltség (LCOE) számítása

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. Ezáltal az LCOE lehetővé teszi az energiaforrások összehasonlítását különféle technológiák és üzemeltetési körülmények között.

Az LCOE kiszámításakor az alábbi fő tényezőket veszik figyelembe:

- Beruházási költségek. Az erőmű megépítésével járó költségek, beleértve a tervezés, az engedélyezés és az építés. Ezen belül számolják el a tőkekiadásokat is.
- Üzemeltetési és karbantartási költségek. A rendszer fenntartásának és üzemeltetésének fix és változó költségei, beleértve a személyzet bérei is.
- Üzemanyagköltség (szükség esetén).
- Üzemeltetési idő és kapacitásfaktor. Az éves üzemidő és a kapacitásfaktor határozza meg, hogy az erőmű az elérhető teljesítményéből mekkora részt használ ki ténylegesen. Az LCOE számításánál figyelembe veszik azt is, 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- és napenergia, az utóbbi években egyre

versenyképesebbé váltak az általuk megtermelt villamosenergia árában. (1. táblázat) A fosszilis tüzelőanyagokkal működő erőművek LCOE-je gyakran függ az energiahordozók aktuális áráról, valamint az esetleges kibocsátási díjaktól, például a szén-dioxid-kibocsátási kvótától.

Az LCOE kiszámítása:

$$LCOE = \frac{\text{Költségek teljes idő alatt}}{\text{Villamosenergia – termelés teljes idő alatt}}$$

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

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].

1. táblázat Az erőművek LCOE értékei, USD/MWh

	Mc-Kinsey (2020), [7]	Mc-Kinsey (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.
vízerőmű	114	114	52-165	27	142	48	n.a.
geotermikus	n.a.	n.a.	35-138	29	109	56	61-102

* új építésű erőmű, n.a.: nincs adat

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

1.2.3 Az életciklusra vetített szén-dioxid-kibocsátás (LCA(CO₂)) értelmezése

Az erőműveknél az LCA során kiemelt figyelmet kap a szén-dioxid-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 a következő szempontok érvényesülnek:

- 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 szintén hozzájárulnak a teljes életciklusra vetített szén-dioxid-kibocsátáshoz.
- A felsorolások közül az utolsót, a bontást és az újrahasznosítást, ritkán veszik figyelembe az LCA számítások során.

A szén-dioxid LCA kiszámítása:

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

2. táblázat Az erőművek életciklusra vetített fajlagos szén-dioxid-kibocsátása, g/kWh

	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.

n.a.: nincs adat

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.

1.2.4 A kapacitásfaktor szerepe az erőművi hatékonyságban

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

Az éves kapacitásfaktor számítása:

$$CF_{\text{éves}} = \frac{\text{Éves megtermelt villamosenergia}}{\text{Névleges teljesítményen max. megtermelhető éves villamosenergia}}$$

A kapacitásfaktor az energiatermelő rendszer hatékonyságának és megbízhatóságának mérőszáma. (3-4. táblázat) A magasabb kapacitásfaktor azt jelzi, hogy az erőmű huzamosabb ideig képes folyamatosan működni teljes üzemben. Több tényező befolyásolhatja az erőmű kapacitásfaktort, például a karbantartási idő, a tüzelőanyag- vagy erőforrás-ellátás ingadozása, valamint a hálózati igények változása. A megújuló energiaforrások, mint például a szél- és a napenergia, alacsony és változó kapacitásfaktoral rendelkeznek, mivel termelésük az időjárási viszonyoktól függ. A kapacitásfaktorok kulcsfontosságúak az erőművek gazdaságosságának felméréséhez, valamint az energiatermeléssel és beruházásokkal kapcsolatos döntések meghozatalához.

3. táblázat Az erőműtípusok kapacitásfaktora

	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, n.a.: nincs adat

Forrás: számítás [10], [18: 11], és [19] alapján

A 3. táblázat első négy adatszlopának értékei Timilsina gyűjtéséből származnak [18]. Az egyes intézetek adatai jelentős eltéréseket mutatnak. Ezt okozhatja a nem azonos módszertan, a különböző földrajzi területeken és/vagy eltérő időpontokban történt adatfelvétel. A gáz esetében az IEA (2015) a CCGT és az OCGT azonos értéke valószínűleg hibás, amely feltehetően az azonos besorolásból ered. Az OCGT erőmű kapacitásfaktora minden esetben jelentősen alacsonyabb, mint a CCGT erőmű kapacitásfaktora.

4. táblázat A magyar erőművek kapacitásfaktora a 2021-es termelési adatok alapján

	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	

Forrás: számítás [20] alapján

1.2.5 Optimalizációs modell: lineáris programozás alkalmazása

A számítások során a lineáris egyenletrendszerek optimalizációs módszere került alkalmazásra. Az egycélú optimalizáció (SOO, Single-Objective Optimization) olyan optimalizációs típus, amelyben egyetlen célfüggvényt kell minimalizálni vagy maximalizálni. Matematikai formában egyetlen célfüggvényt fogalmazznak meg, és a feladat az, hogy olyan változóértékeket kell találni, amelyek minimalizálják vagy maximalizálják ezt a célfüggvényt.

Az optimalizáció során a célfüggvény együtthatóit az erőműtípusokra jellemző LCOE- és LCA(CO₂)-értékek alkotják. Az SOO során az LCOE-minimum és a hozzá tartozó LCA(CO₂) érték, illetve az LCA(CO₂)-minimum és a hozzá tartozó LCOE érték került kiszámításra. Az ezekhez tartozó erőműtípusok abszolút és relatív, a teljes termeléshez viszonyított értékei szintén kiszámításra kerültek.

A lineáris programozási feladat matematikai megfogalmazása az alábbiak szerint történik:

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

, ahol

- A és Aeq a feltételeket definiáló együtthatómátrixok,
- x a döntési változók vektora,
- b és beq a feltételek jobboldalán álló konstansvektorok,
- f a célfüggvény együtthatóit tartalmazó vektor,
- lb és ub az x változók alsó- és felső korlátját meghatározó skalárértékek.

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

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

és

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

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 optimalizáció a fenti értékek alapján paraméterezett **linprog** függvény alkalmazásával kerül végrehajtásra a MATLAB környezetben [21]. Az eredmények ábrázolása és a részszámítások MS Excelben kerülnek elvégzésre [22].

1.2.6 A MATLAB programkód logikája és paraméterezése

A kód egy lineáris programozási problémát old meg, amelyben az erőművek teljesítményelosztása került optimalizálásra két különböző célfüggvény alapján: a költségek és a szén-dioxid-kibocsátás minimalizálása szerint. Az egyenlőtlenségi feltételeket az A mátrix és a b vektor határozza meg; ez olyan korlátozást tartalmaz, amelyek az optimalizálás során teljesül. A megadott A mátrix tíz egyenlőtlenségi feltételt tartalmaz, amelyek az egyes erőművek teljesítményének felső határát szabják meg, valamint egy további (sort) feltételt a megújuló energiaforrások arányára vonatkozóan.

Az egyenlőségi feltételeket az Aeq mátrix és a beq vektor definiálja. Az alsó és felső határt az lb és az ub vektorok adják meg, amelyek minden erőmű számára minimális és maximális teljesítményt határoznak meg.

Az f vektor a költségekhez/ szén-dioxid-kibocsátáshoz tartozó együtthatókat tartalmazza. Az optimalizálás során kettő eredményvektor kerül meghatározásra, amelyek az egyes erőművek optimális teljesítményét tartalmazzák a két különböző célfüggvény szerint. Ezt követően az egyes erőművek költsége és szén-dioxid-kibocsátása kerül kiszámításra.

Az erőművek eredménye bontásban is megjelenik: a teljesítményeloszlás, a költség és a kibocsátás szerint. Ez lehetőséget teremt a költségminimalizálás és a környezetvédelmi szempontok összehasonlítására.

1.3 Portfólió-optimalizálási eredmények különböző jövőképekre

1.3.1 A használt forrásadatok megbízhatóságának értékelése

Az elemzések során több kutató és kutatóintézet adatai kerültek összevetésre. Az adatok kiválasztásánál az elsődleges szempont, hogy minél pontosabban tükrözzék a magyar erőművek valós paramétereit. Ennek érdekében előnyt élveznek a magyar szerzők – például Bodnár és Kádár – adatsorai [12] [14] [19], illetve a hazai intézmények, például a REKK adatai [23]. Másodsorban a jövőbeli adatsorokra vonatkozó előrejelzések is figyelembe lettek véve, például a McKinsey 2030-as prognózisai [7]. Harmadsorban fontos szempont az egyes erőműtípusok – különösen a gázerőművek – esetében a régi és az új technológiák megkülönböztetése, ahogyan azt Lazard (2023) is szemlélteti [10].

1.3.2 A 2021-es hazai erőművi portfólió jellemzői

Az 5. táblázat a 2021. évi magyar erőművi portfólió teljesítményadatait tartalmazza (3. oszlop), amely a MEKH adatbázisából származik. Ez az adatbázis nem tartalmazza a háztartási méretű kiserőművek adatait. Az LCOE-értékek (4. oszlop) a McKinsey (2020) jelentéséből származnak [7], kivéve a hulladék- és a geotermikus adatokra vonatkozó értékeket, amelyek a REKK adatsoraiból származnak [23]. Az LCA(CO₂) értékek (5. oszlop) Bodnár gyűjtése alapján kerültek figyelembevételre [12], kivéve a geotermikus értéket, amely Szőnyi és munkatársaitól származik [24]. Az eredményeket az 5. táblázat 6–7. oszlopai tartalmazzák erőműtípusok szerinti bontásban.

5. táblázat A 2021. évi erőműtípusok szerinti költség- és kibocsátásadatai

	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

Forrás: számítás [7] [12] [23] [24] alapján

1.3.3 A 2030-as scenárió az Egyensúly Intézet előrejelzése alapján

Az Egyensúly Intézet becslése szerint a hazai villamosenergia-fogyasztás 2030-ra eléri az 57 839 GWh-t. Az energiamix várható összetétele: 36% megújuló energia, 28% nukleáris, 5% földgáz és 30% import. (6. táblázat) Az intézet álláspontja szerint az energiabiztonság és a kibocsátáscsökkentési célok elérése érdekében az importarány korlátozásának felülvizsgálata indokolt, mivel az évi 30%-os importarány műszakilag és pénzügyileg is kezelhető [3].

6. táblázat Az Egyensúly Intézet 2030-as scenáriója

	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

Forrás: számítás [3: 49] alapján

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

1.3.4 A magas ipari energiaigényű forgatókönyv modellezése

A Paks II projekt csúszása és a növekvő villamosenergia-igény új energiaforrások bevonását teszi indokolttá. A jelenlegi tervek három új gázerőmű-blokk megépítését irányozzák elő, amely összesen 1650 MW többletkapacitást biztosít a hazai villamosenergia-rendszerben. Emellett továbbra is üzemben marad a közel 4000 MW összteljesítményű gázerőművi kapacitás, amely fokozatosan korszerűtlenné válik, és alacsony kapacitáskihasználtsággal működik. Ideértve a gyorsindítású gázerőműveket is, amelyek tartalékként szolgálnak, és néhány percen belül képesek az üzembe helyezésre.

A Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia a napelemes kapacitást 2030-ra 10 000 MW-ra becsüli [25]. A Nemzeti Energia- és Klímaterv 2023-as felülvizsgált változata pedig 1000 MW szélerőenergia-kapacitással számol 2030-ra, szemben a jelenlegi 330 MW-tal [26]. (7. táblázat)

7. táblázat A 2030-as években rendelkezésre álló erőműtípusok jellemzői

	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
vízerőmű	58	212	114	0,00549
hulladék	49	161	108	0,62100
geotermikus	3	12	95	0,12000
összesen		56164		

Forrás: számítás [25] [26] alapján

A 2030-ra vonatkozó elemzés során az import az alábbiak szerint lett figyelembe véve: a prognosztizált bruttó villamosenergia-fogyasztásból (68 TWh) levonásra került a tervezett nettó import mennyiségét, a fennmaradó érték pedig hazai termelésként került

figyelembevételre. Az így meghatározott „saját termelés” képezi az erőművi portfólió optimalizálásának alapját.

Az optimalizáláskor minden paraméter a 2030-ra becsült környezeti, gazdasági és technológiai feltételek alapján került meghatározásra. A 8–10. táblázat az LCOE- és LCA(CO₂)-minimumra optimalizált portfóliókat mutatja be 68 TWh éves fogyasztás és legalább 30%-os hazai megújuló termelési részarány mellett, különböző nettó importhányadok (30%, 25%, 20%) figyelembevételével.

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

	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
vízermű	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

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

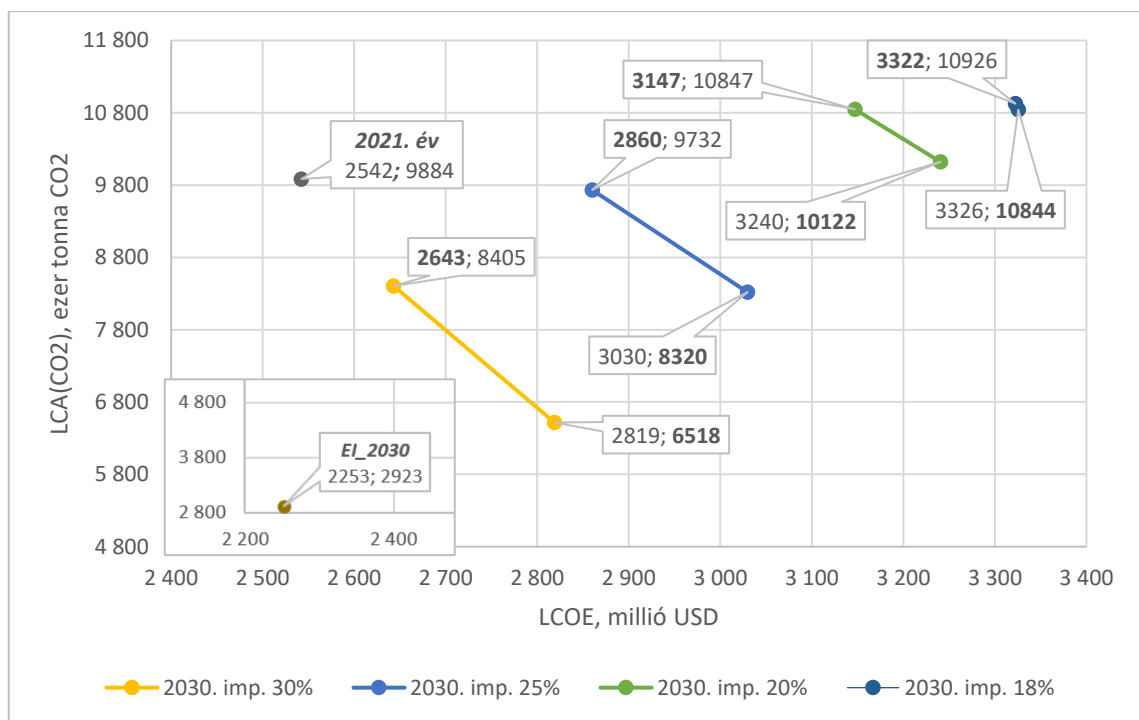
	LCOE- minimum GWh	LCA(CO ₂) - minimum GWh	LCOE- minimum		LCA(CO ₂)- minimum	
			LCOE millió USD	CO ₂ ezer tonna	LCOE millió USD	CO ₂ ezer tonna
nukleáris	16644	16644	1131,792	78	1131,792	78
gáz	9653	4909	598,486	5116	304,358	2602
gáz+	9113	11563	637,910	3645	809,410	4625
olaj	0	0	0	0	0	0
nap	13400	13400	402,000	871	402,000	871
szél	2190	2190	89,790	22	89,790	22
biomassza biogáz	0	2070	0	0	267,030	119
vízerőmű	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

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

	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
vízerőmű	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

A 2. ábra a 2021-es állapotot is mutatja, ahol az LCOE értéke 2 542 millió USD, az LCA(CO₂) értéke pedig 9 884 ezer tonna szén-dioxid volt. Az 2. ábra belső diagramja az Egyensúly Intézet 2030-ra vonatkozó értékeit szemlélteti: az LCOE értéke 2 253 millió USD, az LCA(CO₂) értéke pedig 2 923 ezer tonna szén-dioxid.

Az 1. ábrán látható vonalak végpontjai egyrészt az LCOE-minimumhoz tartozó LCA(CO₂), másrészt az LCA(CO₂)-minimumhoz tartozó LCOE értékpárokat mutatják három különböző nettó importarány – 30%, 25% és 20% – vonatkozásában. Szélső értéként a 18%-os importarány is feltüntetésre került. Ezek az adatok a 2030-as, megnövekedett villamosenergia-igényű ipar hazai termelésére vonatkozó forgatókönyv eredményeit mutatják. Az 1. ábrán a kivastagított szám az optimalizáció által meghatározott minimum értéket jelzi. Ez előbbieket a 2. ábrára is igazak, ahol a számok fajlagos értéket képviselnek.



1. ábra Az LCOE-LCA(CO₂) párok abszolút értéken

Az eredmények jobb összehasonlíthatósága érdekében a 11. és 12. táblázatban az LCOE és az LCA(CO₂) mutatók egységnyi, GWh-ra vetített értékeit is tartalmazza.

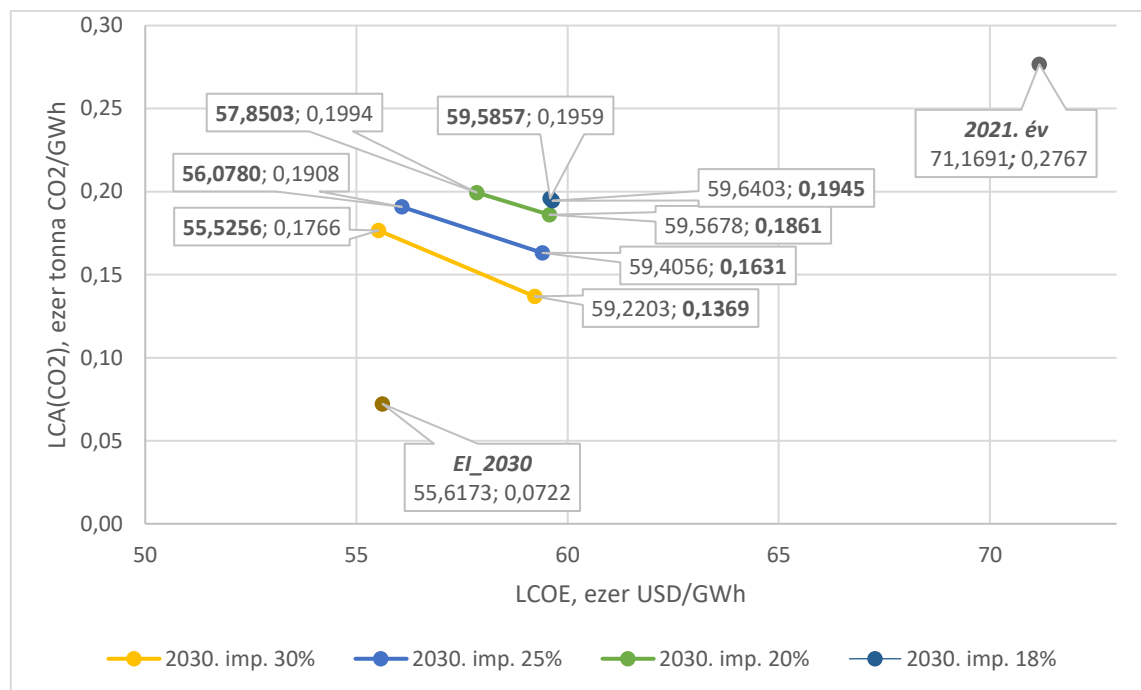
11. táblázat A 2021. év és 2030 Egyensúly Intézet fajlagos LCOE- és LCA(CO₂) értékei

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

12. táblázat A 2030-ra tervezett, nagy energiaigényű ipart kiszolgáló erőművi portfólió LCOE- és LCA(CO₂)-minimumának értékei különböző importráták mellett.

	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

A 2. ábrán a 11-12. táblázat értékei láthatók. Ez a 1. ábra adatainak fajlagos értéken történő ábrázolása.



2. ábra Az LCOE-LCA(CO₂) párok fajlagos értéken

1.4 A portfólióelemzés következtetései a nemzeti energiastratégiára nézve

A 2011-ben készült Nemzeti Energiastratégia 2030 [27: 30290] az atom–szén–megújulók forgatókönyvét valószínűsítette, a gázalapú erőművek változatlan szinten tartásával. A dokumentumban jelentős növekedést jósoltak a megújuló energiaforrásoknak. A szén- és biomassza-erőműveknél a tiszta szén technológia bevezetését prognosztizálták. A stratégia szerint: „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 kapcsolódó szén-dioxid-intenzitás 2011-ben 370 gramm CO₂/kWh volt, amely a becslések szerint 2030-ra megközelítőleg 200 gramm CO₂/kWh-ra csökkenhet [27: 30217]. A MAVIR (2015) és Aszódi becslése szerint 2030-ra 50,4–52,2 TWh éves villamosenergia-fogyasztás prognosztizálható [28]. Ezt az értéket a 2023-ban felülvizsgált Nemzeti Energia- és Klímaterv 2030-ra 55–60 TWh közötti tartományban határozta meg [26: 244–245].

A fentiekből is jól látszik, hogy még egy közel tízéves időtávon belül is mennyire eltérő forgatókönyvek készültek a villamosenergia-rendszer jövőjére vonatkozóan. A vizsgált scenárió 2030-ra 68 TWh éves villamosenergia-fogyasztással számolt. Ennek az LCOE- és LCA(CO₂)-minimum értékeinek alakulása került vizsgálatra különböző importhányadok mellett. A 2023-ban felülvizsgált Nemzeti Energia- és Klímatervhez képest ez 8–13 TWh-os növekedést jelent. Ennek fő oka az olyan, jövőben megvalósuló ipari beruházások megjelenése, amelyek nagymértékű villamosenergia-felhasználással járnak. A 2030-as erőművi portfólió egyik meghatározó tényezője, hogy a Paks II atomerőmű várhatóan nem valósul meg időben. Üzembe helyezésekor kétszer 1200 MW-tal növeli majd a magyar villamosenergia-termelő kapacitást.

A kieső kapacitást addig gázerőművekkel és az egyre növekvő arányú megújuló – elsősorban napelemes – energiaforrásokkal kívánják pótolni. Az új gázerőművek már tervezési szakaszban vannak, és összesen 1650 MW új kapacitást jelentenek. Fontos megjegyezni, hogy a fokozatosan előregedő, alacsony hatékonyságú gázerőművek is cserére szorulnak, továbbá az időjárásfüggő megújuló energiaforrások szintén szükségessé teszik új gázerőművi kapacitások létesítését. Ezekre elengedhetetlenül szükség van az ellátásbiztonság és a rendszerstabilitás fenntartása érdekében.

Az eredmények azt mutatják, hogy a 2030-as erőművi portfólió – a jelenlegihez képest – alacsonyabb LCA(CO₂)-értékkel jár majd, akár a 30%-os, akár a 25%-os villamosenergia-import mellett. Ugyanakkor az is igaz, hogy az LCOE-értékek a csökkenő nettó import arányával növekednek.

Az eredményekből az is jól látható, hogy a kedvezőbb LCA(CO₂)-értékekhez növekvő LCOE-értékek társulnak. Fontos megjegyezni, hogy a klímaváltozással összefüggő nemzetközi vállalások teljesítése érdekében indokolt lehet a magasabb energiaköltségek vállalása is. Ezt a folyamatot erősíti az országoként kiosztható ingyenes kvóták fokozatos csökkenése, amely jelenleg csak néhány uniós tagállam – köztük Magyarország – számára elérhető 2030-ig [29]. Figyelembe kell venni továbbá, hogy a szén-dioxid-kvóta ára várhatóan folyamatosan emelkedik. A cél ezzel az, hogy drágább legyen kvótát vásárolni, mint amennyiért egy vállalat vagy erőmű klímabarát beruházásokat tud végrehajtani. Ennek eredményeként hosszú távon a környezeti szempontból kedvező megoldások válhatnak gazdaságilag is előnyösebbé, így a szereplők érdekeltté válnak a valós kibocsátáscsökkentésben, nem pedig abban, hogy kivásárolják magukat a kötelezettségekből [30].

Az optimalizáció eredményei ugyan elmaradnak az Egyensúly Intézet 2030-ra vonatkozó számaitól, azonban ez a scenárió nagyobb megújulóenergia-aránnyal és alacsonyabb villamosenergia-fogyasztással számolt.

Amennyiben az eredményeket egységnyi villamosenergiára vetítjük, a 2030-ra tervezett erőművi összetétel minden mutatóban kedvezőbbnek bizonyul a 2021-es évhez képest. (11-12. táblázat) A vizsgált mutatók – az életciklusköltség és az életciklus alatti szén-dioxid-kibocsátás – egyaránt alacsonyabb értéket mutatnak, még akkor is, ha az összehasonlítás során az LCOE-minimum esetén az LCA(CO₂), illetve az LCA(CO₂)-minimum esetén az LCOE-értéket vesszük alapul. Ugyanakkor az is megállapítható, hogy a 2030-ra végzett számítások LCA(CO₂)-értékei elmaradnak az Egyensúly Intézet 2030-as scenáriójában szereplő értékektől, azonban az életciklusköltségek közel azonos szinten mozognak. A csökkenő nettó import jelentősen növeli mind az erőművi portfólió fajlagos életciklusköltségének, mind a szén-dioxid-kibocsátásának minimumértékét. (2. ábra)

Fontos megjegyezni, hogy bár az import csökkenésével mérséklődik a villamosenergia-importfüggőség, ugyanakkor más energiahordozók – különösen a földgáz, illetve Paks II

üzembe helyezése után a nukleáris fűtőanyag – esetében nő az importfüggőség. Az eredmények azt is mutatják, hogy az importarány csökkenésével – különösen 25%-os szint alatt – szűkül az erőművi portfólió mozgástere, vagyis csökken az elérhető kapacitások kombinációs lehetősége. Ezt a 1. ábrán a rövidebb szakaszok szemléltetik. Az alkalmazott módszer alkalmas mind a jelenlegi, mind a jövőbeli erőművi portfóliók sarokpontjainak meghatározására. A kutatás példaként szolgált a teljes életciklus alatti költségek és a szén-dioxid-kibocsátás minimum- és maximumértékeinek, valamint ezek egységnyi villamosenergia-mennyiségre vetített változatainak kiszámítására. A módszer más erőművi paraméterek esetén is alkalmazható. Ezek az értékek sarokpontokként szolgálnak, ezért az optimális erőművi mix valószínűleg e pontok között helyezkedik el. Hogy pontosan hol, az számos tényezőtől függ, elsősorban gazdasági, műszaki és energiabiztonsági szempontoktól. Az itt bemutatott eredmények megerősítik, hogy a villamosenergia-termelés szerkezeti átalakítása jelentős hatással van a rendszer szintű költség- és kibocsátási mutatókra.

Az optimalizációs scenáriók alapján kirajzolódó irányok szoros kapcsolatban állnak a decentralizált energiatermelési formák szerepének növekedésével, amely a következő fejezet középpontjába kerül.

2 Lakossági napelemes rendszerek fenntarthatósági és szabályozási aspektusai

Az előző fejezetben bemutatott makroszintű portfólióelemzés rávilágított a megújuló technológiák előtérbe kerülésének jelentőségére. Ennek fényében a következőkben a háztartási méretű napelemes rendszerek beruházási és működtetési kérdéseit vizsgálom, különös tekintettel a fenntarthatóságot befolyásoló szabályozási tényezőkre.

2.1 A lakossági napelemes rendszerek szerepe az energiaellátásban

Magyarországon a 2010-es évek közepétől jelentős növekedésnek indult a napelemes villamosenergia-termelés. A bővülés kezdetben a háztartási méretű kiserőművek (HMKE) körében jelentkezett, majd fokozatosan terjedt ki a közepes méretű és az erőművi léptékű napelemes rendszerekre is. A HMKE beépített teljesítménye 50 kW-nál kisebb. A közepes méretű naperőművek az 50 kVA-nál nagyobb, de az 500 kVA-nál kisebb teljesítménykategóriába tartoznak, míg a naperőműveknek az 500 kVA-nál nagyobb teljesítményű rendszereket nevezik. A saját célra termelő napelemes erőművek – ezek elsősorban HMKE – villamosenergia-termelése 2018-ban 456 GWh, 2022-ben pedig 2 135 GWh volt. Ugyanebben az időszakban a főtevékenységként termelő napelemes rendszerek 2018-ban 173 GWh, míg 2022-ben 2 597 GWh villamosenergiát állítottak elő [31].

A megújuló energiaforrások gyors növekedése következtében az időjárásfüggő termelők – különösen a napelemes rendszerek – jelentős kihívások elé állították a hálózatüzemeltetőt és a rendszerirányítót.

Míg 2022-ben körülbelül háromszáz alkalommal fordult elő 400 MW-ot meghaladó kiegyenlítetlenség a villamosenergia-hálózatban negyedórás időléptékben, addig 2023-ban ez már több mint ezer eset volt negyedórás intervallumban. Ezzel párhuzamosan egyre gyakoribbá váltak a nulla- vagy negatív árú órák is a hazai áramtőzsdén: 2023-ban összesen 96 ilyen óra fordult elő, több mint az azt megelőző tíz évben együttvéve [32].

Ennek kezelésére több lehetőség is kínálkozik. Az egyik legfontosabb a hálózat rugalmasságának fejlesztése, amely lehetővé teszi a napelemes energiatermelés ingadozásainak kiegyenlítését. Ez szabályozható termelők és fogyasztók, valamint nagy

kapacitású energiatárolók alkalmazását igényli. Ilyen szabályozható termelők például a gázerőművek vagy a korlátozható betáplálású kistermelők. A rugalmasság növelésében jelentős szerepet játszhatnak a szivattyús energiatárolók és az akkumulátortelepek is. Fontos szerep juthat az úgynevezett „smart” (okos) eszközöknek is, amelyek segítik a termelés és fogyasztás összehangolását. Ezek a berendezések különösen a termelési és fogyasztási csúcsok-völgyek kiegyenlítését szolgálják [33].

A kutatás során tizenkét olyan napelemes konstrukció került megvizsgálásra, amelyek megfelelnek a Magyar Állam napelemes támogatási rendszer feltételeinek. Az összehasonlító elemzés kiterjedt az egyes konstrukciók bekerülési költségeire, fajlagos szén-dioxid-kibocsátására, fajlagos energiaköltségeire, valamint a beruházások megtérülésére. A vizsgált támogatási forma a Napenergia Plusz Program nevet viseli. A program keretében legfeljebb 5 millió forint vissza nem térítendő támogatás igényelhető, amely a beruházás összköltségének maximum 66%-át fedezheti. A pályázóknak a költségek legalább 34%-át saját forrásból kell biztosítaniuk, és minden további költségnövekedést önerőből kell finanszírozniuk. A pályázat előírásai szerint a telepítendő napelemes rendszer inverterének teljesítménye 4–5 kW, a tárolókapacitás pedig 7,5–10 kWh közötti kell legyen. További feltétel, hogy a napelemek teljesítménye nem haladhatja meg az inverter teljesítményének 120%-át – például egy 4 kW-os inverter esetén ez 4,8 kW-os napelemkapacitást jelent [34].

2.2 Modellalkotás HOMER-rel és szabályozási keretek figyelembevételével

2.2.1 A háztartások átlagos villamosenergia-felhasználása

A Központi Statisztikai Hivatal (KSH) adatai szerint 2022-ben a villamosenergia-fogyasztó háztartások száma 5 266 498 volt, amelyeknek az áramszolgáltató összesen 11 677 653 000 kWh villamos energiát szolgáltatott. Ezek alapján az egy háztartásra jutó éves villamosenergia-fogyasztás 2 226 kWh volt, ami havonta 185,5 kWh-t, naponta pedig 6,18 kWh-t jelent [35]. Az MVM Next Energiakereskedelmi Zrt. egyetemes szolgáltatói ügyfelei esetében az éves átlagos fogyasztás 2022-ben 2 392 kWh/felhasználási hely volt, ami havi 199,3 kWh-t és napi 6,64 kWh-t jelent felhasználási helyenként (háztartásonként) [36]. Durkó és munkatársai becslése alapján az egy főre jutó éves villamosenergia-fogyasztás 3,65–4,04 GJ, amely átváltva évi 1 014–1 122 kWh-t jelent. Ez háztartási szinten 2 332,2–2 580,6 kWh/évnak felel meg, vagyis havi 194–215 kWh, illetve napi 6,47–7,17 kWh közötti értéket mutat háztartásonként [37]. A Magyar Állam a „rezsicsökkentés” program keretében az egy háztartásra jutó átlagos fogyasztást napi 7 kWh-ban, illetve havi szinten 210 kWh-ban határozza meg.

2.2.2 Hálózati tarifák és szabályozási keretek bemutatása

A hálózatba betermelt és a hálózatról vételezett villamos energia elszámolásának három alapvető módja van: az éves szaldó elszámolás, a havi szaldó elszámolás és a bruttó elszámolás. Az elsőt, az éves szaldó elszámolást nemrég megszüntették, helyét a bruttó elszámolási rendszer vette át. A havi szaldó elszámolás lényegében az éves szaldó elszámolás havi szintű változata.

- Az éves szaldó elszámolás lényege, hogy a fogyasztónak évente egyszer összesítik az általa a hálózatról vételezett és a hálózatba visszatáplált villamos energia mennyiségét. Az így kapott különbséget kell megtérítenie az áramszolgáltató felé, vagy jóváírást kap a szolgáltatótól, ha többletet termelt.
- A havi szaldó elszámolás célja az éves rendszer által kínált nagyobb kiegyenlítési lehetőségek csökkentése. Ebben a rendszerben a fogyasztó havonta rendezi a hálózatról vételezett villamos energia díját, és ugyanígy havonta kap ellentételezést a visszatáplált energiáért, amennyiben többlet keletkezik.

- A bruttó elszámolás legfőbb jellemzője, hogy a betáplált és a vételezett energia mennyiségét külön-külön számolják el, két külön mérőórán keresztül, eltérő árakon. A szolgáltató alacsonyabb árat fizet a betáplált energiáért, míg a fogyasztónak a vételezett energiát magasabb áron kell megvásárolnia. Ebben az elszámolási rendszerben nincs lehetőség a vételezés és a betáplálás közötti különbség havi szintű kiegyenlítésére sem. A bruttó elszámolást további részletszabályok egészítik majd ki [38].

2.2.3 Villamosenergia-díjszabás és támogatási rendszerek

A rezsicsökkentett villamosenergia-ár szolgáltatókként eltérő. Az MVM DÉMÁSZ Áramhálózati Kft. 36,386 forintot, az E.ON Dél-dunántúli, az E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt.-k és az OPUS TITÁSZ Zrt. 35,293 forintot, az ELMŰ Hálózati Kft. 36,208 forintot, míg az MVM ÉMÁSZ Áramhálózati Kft. 35,992 forintot számít fel kilowattóránként [39]. Ezzel szemben a lakossági piaci ár minden szolgáltató területén egységesen 70,104 forint/kWh.

A lakossági fogyasztók számára a hálózatba betáplált villamos energia átvételi ára a területileg illetékes egyetemes szolgáltatótól függ. Az MVM DÉMÁSZ Áramhálózati Kft. 5,25 forintot fizet kilowattóránként, az ELMŰ Hálózati Kft. 5,11 forintot, az MVM ÉMÁSZ Hálózati Kft. 4,94 forintot, míg az E.ON DÉDÁSZ, az E.ON ÉDÁSZ és az OPUS TITÁSZ szolgáltatók mindössze 4,39 forintot térítenek meg kilowattóránként a betáplált villamos energiáért [40].

2.2.4 Rendszerelemek, inverterek és akkumulátorok költség szerkezete

A szimuláció során tizenkét különböző összetételű napelemes rendszer vizsgálata valósult meg. Az összeállított rendszerek különféle típusú napelem (PV) modulokat, invertereket és akkumulátorokat tartalmaztak. (13. táblázat)

A napelem modulok két típusa szerepelt a vizsgálatban: a Spolar PV-415HM6-54L és a Jollywood HD108N-415, mindkettő 415 W névleges teljesítménnyel rendelkezik. A különböző konstrukciókban eltérő számú modul alkalmaztak: a darabszám 10 és 14 között változott, ennek megfelelően a teljes beépített kapacitás 4,2 kWp és 5,8 kWp közötti tartományba esett. A kWp – kilowatt peak, azaz csúcsteljesítmény – azt jelöli, hogy a napelem ideális körülmények között mekkora teljesítmény leadására képes.

A napelem modulok egységára a Spolar típus esetében 36 703 Ft, a Jolywood típus esetében pedig 40 513 Ft volt, ezek az értékek szolgálták az elszámolási alapként [41], [42].

A rendszerek különböző típusú invertereket tartalmaztak, többek között a Deye SUN-5K-SG04LP3-EU (5 kW), a Huawei SUN2000-4KTL-M1 (4 kW), a Huawei SUN2000-5KTL-M1-HC (5 kW), a Fronius Symo GEN24 4.0 Plus (4 kW), valamint a Fronius Symo GEN24 5.0 Plus (5 kW) típusokat. Az inverterek névleges teljesítménye 4 és 5 kW között változik. Az eszközök beszerzési költsége jelentősen eltért egymástól. Az 5 kW-os Deye inverter ára 788 604 Ft, a 4 kW-os Huawei modellé 408 990 Ft, míg az 5 kW-os Huawei típus 474 999 Ft-ba került. A Fronius típusok közül a 4 kW-os változat 801 724 Ft-os áron szerepelt, az 5 kW-os modell ára pedig 844 042 Ft volt [43], [44], [45], [46], [47].

Az energiatárolásért különböző típusú akkumulátorok feleltek. A vizsgált rendszerekben az alábbi modellek szerepeltek: LVFU LFRX51200-01 típusú 10,24 kWh kapacitású; Huawei LUNA2000-5-E0, amelyből két darabot vettek figyelembe, egyenként 5 kWh tárolókapacitással; valamint a BYD Energy Storage BATTERY-BOX HVM 8,28 kWh és a BYD Energy Storage BATTERY-BOX HVS 10,24 kWh kapacitású típusai. Az akkumulátorok névleges kapacitása körülbelül 8 és 10 kWh között változik, míg beszerzési költségük 1 165 250 Ft és 2 340 185 Ft közötti tartományban mozog. A legrágább megoldást az LVFU típus képviseli, míg az egyik legköltséghatékonyabb – 1 kWh-ra vetített költség alapján – a BYD 8,28 kWh-s HVM modell [48], [49], [50], [51].

13. táblázat A rendszer konstrukciók költségei

sorrend	PV			inverter			akkumulátor			egyéb ktg. eFt	munka- díj (30%) eFt	beruhá- zási ktg. eFt
	típus	kWp	ktg. eFt	típus	kW	ktg. eFt	típus	kWh	ktg. eFt			
1.	Spo	4,15	367,0	Deye	5	788,6	LVFU	10	1187,1	678,2	1294,7	4315,6
2.	Spo	4,98	440,4	Deye	5	788,6	LVFU	10	1187,1	694,6	1333,2	4443,9
3.	Spo	5,81	513,8	Deye	5	788,6	LVFU	10	1187,1	711,0	1371,7	4572,2
4.	Joly	5,81	567,2	Deye	5	788,6	LVFU	10	1187,1	1031,0	1531,7	5105,6
5.	Spo	4,57	403,7	Huawei	4	409,0	Huawei	10	2021,0	800,0	1557,3	5191,0
6.	Joly	4,57	445,6	Huawei	4	409,0	Huawei	10	2021,0	1095,9	1702,1	5673,6
7.	Spo	5,81	513,8	Huawei	5	475,0	Huawei	10	2021,0	819,7	1641,3	5470,8
8.	Joly	5,81	567,2	Huawei	5	475,0	Huawei	10	2021,0	1228,7	1839,4	6131,2
9.	Spo	4,57	403,7	Fronius	4	801,7	BYD	8	1658,3	1103,2	1700,1	5667,0
10.	Joly	4,57	445,6	Fronius	4	801,7	BYD	8	1658,3	1461,3	1871,5	6238,5
11.	Spo	5,81	513,8	Fronius	5	844,0	BYD	10	2340,2	1144,9	2075,6	6918,5
12.	Joly	5,81	567,2	Fronius	5	844,0	BYD	10	2340,2	1549,4	2271,8	7572,6

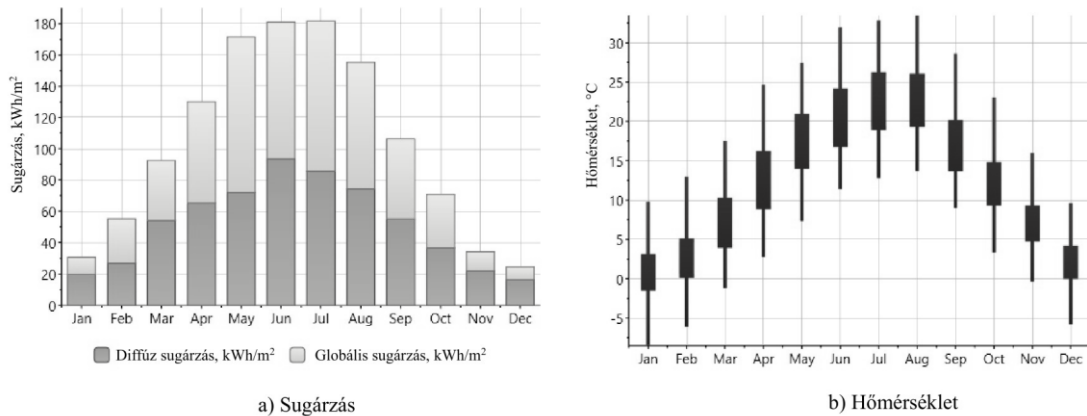
Spo: Spolar, Joly: Jolywood

A napelem modulok, az inverterek és az akkumulátorok mellett két további fő költségcsoporthoz tartoznak: az „egyéb” és a „munkadíj” oszlopban megjelenő összegek. Az „egyéb” oszlop tartalmazza a segédanyagok – például a szerelési eszközök, tűzvédelmi elemek, tartószerkezetek, villamos védelmek, informatikai segédeszközök és a projektábra – költségeit. A munkadíj a beruházási költség legfeljebb 30%-át teheti ki, amely magában foglalja a telepítéssel járó valamennyi költséget [52].

2.2.5 Meteorológiai adatsorok felhasználása a modellezésben

A Meteonorm egy meteorológiai szoftver (Meteonorm V8.2.0.24079), amely globális meteorológiai adatokat biztosít a Föld különböző helyszíneire vonatkozóan. A program lehetővé teszi, hogy pontos és megbízható meteorológiai adatokat generáljanak a napenergia-, szélenergia- és más megújuló energiaforrások modellezéséhez és tervezéséhez. A Meteonorm képes közép- és hosszú távú éghajlati adatok szintetizálására, valamint helyi és globális adatok alapján éghajlati scénáriók készítésére. Az adatok több mint 8000 meteorológiai állomásról, műholdas megfigyelésekből és globális éghajlati modellekből származnak. A program időben és térben nagy felbontású adatokat generál,

például hőmérsékletre, globálsugárzásra, szélességre, páratartalomra, csapadékra, valamint számos egyéb meteorológiai paraméterre vonatkozóan. (3. ábra) Amennyiben egyéni helyszínen nincs rendelkezésre álló mérési adat, a program interpolációs módszerrel állít elő közelítő adatokat.



3. ábra Havi bontású sugárzási átlag és hőmérsékleti intervallum értékek

A Meteonorm által biztosított meteorológiai adatokat gyakran alkalmazzák energiarendszerek modellezésére szolgáló szoftverekben, mint például a jelen fejezetben ismertetett HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) programban. A HOMER célja az energiatermelő rendszerek optimalizálása, amely során a pontos meteorológiai adatok kulcsszerepet játszanak. A Meteonorm lehetővé teszi az adatok közvetlen importálását energetikai szimulációs szoftverekbe. Az így átvett meteorológiai és éghajlati paraméterek biztosítják azokat a feltételeket, amelyek alapján a nap-, szélenergia- és más megújuló energiaforrások teljesítménye szimulálható. A Meteonorm helyspecifikus, pontos adatai hozzájárulnak ahhoz, hogy az energetikai szoftverek megbízhatóbb és realisztikusabb eredményeket szolgáltatassanak az energiatermelés modellezése során [53], [54].

2.2.6 HOMER szoftver és HOMER Grid alapkonceptiói

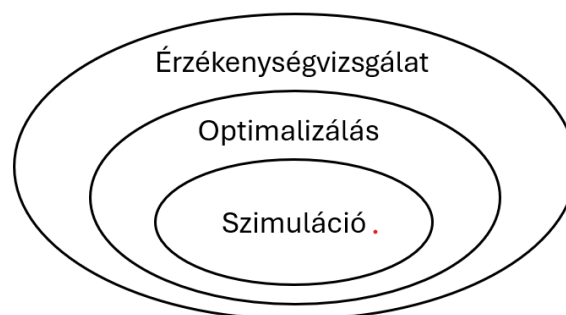
A HOMER programot energiarendszerek tervezésére és optimalizálására fejlesztették ki. Elsősorban hibrid villamos- és hőenergia-termelő rendszerek – például napenergia-, szélenergia-, dízelgenerátor- és akkumulátoralapú rendszerek – modellezésére alkalmazzák annak érdekében, hogy meghatározzák az adott energiaigényekhez legköltséghatékonyabb és legmegbízhatóbb konstrukciót.

A HOMER Grid a HOMER program hálózatspecifikus változata, amelyet olyan rendszerek tervezésére fejlesztettek ki, amelyek hálózatra kapcsolódnak, de egyben saját energiatermeléssel is rendelkeznek. A HOMER Grid különösen hasznos ipari, közszolgáltatói és magánfelhasználási környezetben, ahol a fogyasztók a hálózati kapcsolat mellett önálló energiatermeléssel is rendelkeznek. A szoftver segítséget nyújt a tervezők számára különböző konstrukciók összehasonlításában. Lehetővé teszi az energiaellátási rendszerek optimalizálását, a költségek minimalizálását és a megújuló energiaforrások arányának maximalizálását [55], [56].

2.2.7 A decentralizált energiarendszerek szimulációs és optimalizációs kerete HOMER környezetben

A fent említett HOMER Grid – a továbbiakban egyszerűen HOMER – úgy fejlesztették ki, hogy lehetővé tegye a decentralizált energiatermelési (Distributed Generation, DG) rendszerek tervezését, függetlenül attól, hogy hálózatra kapcsolt vagy hálózaton kívüli rendszerről van szó. A decentralizált energiatermelés egyre gyakoribb megoldássá válik a fenntartható energiarendszerek körében, mivel általa lehetőség nyílik arra, hogy a felhasználók – saját fogyasztásuk és termelésük révén – aktív módon járuljanak hozzá energiaellátásuk költségeinek csökkentéséhez [57].

A HOMER három fő egységből áll össze: a szimulációból, az optimalizációból és az érzékenységvizsgálatból. (4. ábra) Ez a három elem összehangoltan működik, és lehetővé teszi, hogy a felhasználó gazdasági és műszaki szempontból is életképes energiarendszert tervezzen [58].

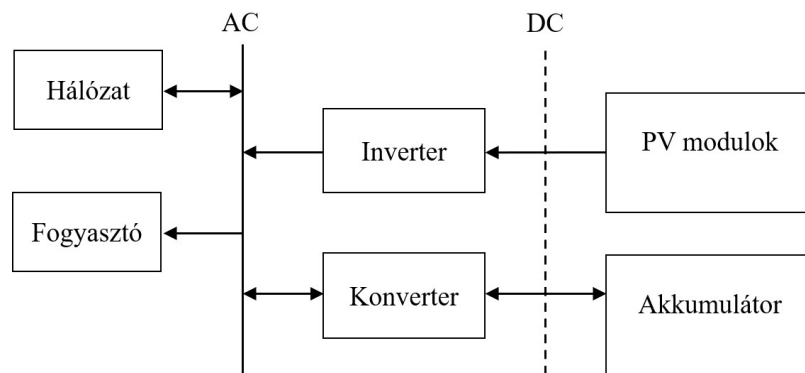


4. ábra Problémamegoldás HOMER-ben

2.2.8 Szimulációs eljárás különböző rendszerkonfigurációkra

A HOMER program elsődleges funkciója a szimuláció, amely lehetőséget biztosít különböző rendszerkonstrukciók vizsgálatára eltérő környezeti és működési feltételek mellett. A szimulációs modul képes az összes szóba jöhető rendszerkombinációt létrehozni és azok teljesítményét kiértékelni.

A program kezelni tudja a megújuló energiaforrásokat, energiatárolókat, valamint a kiegészítő energiatermelő elemeket, mint például a dízelgenerátorokat vagy a hálózatra kapcsolódó egységeket. (5. ábra) Ezek alapján a program számos rendszerváltozatot hoz létre, amelyeket az előre definiált szempontok alapján rangsorol, és segíti a felhasználót a minél kedvezőbb konstrukció kiválasztásában [59].



5. ábra Rendszer séma

2.2.9 Rendszeroptimalizálás gazdasági és környezeti szempontok szerint

A HOMER programban a szimulációt követően az optimalizációs lépés következik. A szoftver a létrehozott rendszerváltozatok eredményeit kiértékeli, szűri, majd rangsorolja a felhasználó által megadott kritériumok alapján. Az optimalizáció célja, hogy a kijelölt paraméterek figyelembevételével meghatározza a leggazdaságosabb rendszerkonstrukciót. Emellett azonban egyéb szempontokat is lehet érvényesíteni, például a károsanyag-kibocsátás csökkentését, az üzemanyag-felhasználás minimalizálását vagy más környezeti és fenntarthatósági célkitűzéseket [60].

2.2.10 Érzékenységvizsgálat külső paraméterek változékonysága mentén

Az érzékenységvizsgálat nem kötelező, de sok esetben fontos lépés lehet, mivel lehetővé teszi a különböző külső változók – például a globálsugárzás, a szélesebbesség vagy az

energiahordozók árai – hatásainak modellezését. Az érzékenységvizsgálat segíti a felhasználót abban, hogy megértse, miként módosulnak a rendszer teljesítménymutatói a környezeti paraméterek és egyéb külső tényezők változásának függvényében. Az ilyen típusú elemzés azt is feltárja, melyek a rendszer legérzékenyebb bemeneti paraméterei [61].

A HOMER program előbb ismertetett három fő funkciója – a szimuláció, az optimalizáció és az érzékenységvizsgálat – lehetővé teszi, hogy az energiarendszereket műszaki, gazdasági és környezeti szempontok figyelembevételével kerüljenek megtervezésre (2-5. mellékletek). Ez különösen hasznos lehet a megújuló energiaforrások elterjedésében, mivel támogatja az energiaforrások és -igények hatékony összehangolását, ezáltal hozzájárulva a globális klíma- és környezetvédelmi célok eléréséhez [57].

2.3 Gazdasági és környezeti indikátorok alakulása különböző rendszerkonstrukciókra

2.3.1 A kiegyenlített villamosenergia-költség (LCOE) eredményei

A szimulációs adatok ismeretében már elemezhető a napelemes rendszerek gazdaságossága a különböző fogyasztási szinteken (7, 10, 15 és 20 kWh), valamint az eltérő visszatáplálási árak mellett (5 Ft/kWh és 15 Ft/kWh).

A visszatáplálási ár növekedése csökkenti az LCOE értékét, így a 15 Ft/kWh visszatáplálási ár minden vizsgált konstrukció esetében kedvezőbb LCOE-értékeket eredményez, mint az 5 Ft/kWh ár mellett.

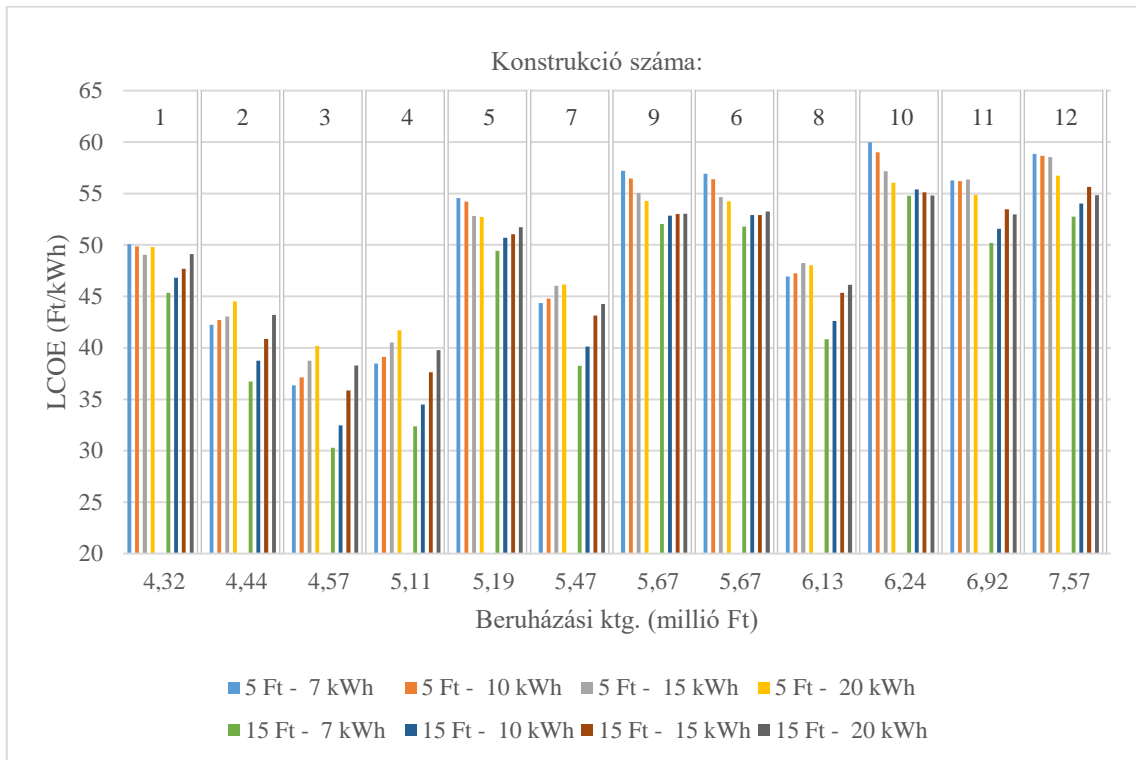
Példaként a 2. konstrukció esetében, 7 kWh napi átlagfogyasztás mellett, 5 Ft/kWh visszatáplálási árnál az LCOE értéke 52,44 Ft/kWh, míg 15 Ft/kWh visszatáplálási ár esetén ez 36,71 Ft/kWh. Ez jól szemlélteti, hogy a magasabb visszatáplálási ár jelentősen javítja a napelemes rendszerek gazdaságosságát.

A magasabb napi átlagfogyasztás az LCOE értékét eltérően befolyásolhatja: bizonyos konstrukciók esetében kedvező, más esetekben viszont kedvezőtlen hatással jár. Kedvező példa a 9-es konstrukció, ahol 7 kWh napi fogyasztás mellett az LCOE értéke 57,21 Ft/kWh, míg 20 kWh napi fogyasztásnál 54,29 Ft/kWh-ra csökken – mindkét esetben 5 Ft/kWh visszatáplálási ár mellett. Ugyanakkor a 4-es konstrukció esetében a magasabb fogyasztás kedvezőtlen hatást gyakorol: 7 kWh napi fogyasztásnál az LCOE 38,45 Ft/kWh, míg 20 kWh fogyasztás esetén ez 41,69 Ft/kWh-ra emelkedik (szintén 5 Ft/kWh visszatáplálási ár mellett).

Az egyes napelemes rendszerek bekerülési költsége jelentős eltéréseket mutat, ami közvetlenül befolyásolja az LCOE érték alakulását. Általánosságban elmondható, hogy az alacsonyabb teljesítményű, kisebb bekerülési költséggel rendelkező rendszerek – mint például az 1–4. konstrukciók – gazdaságosabbnak tekinthetők. Ez a különbség különösen magasabb visszatáplálási ár esetén válik hangsúlyossá. Ezzel szemben a nagyobb beruházási igényű rendszerek, mint a 10., 11. és 12. konstrukció, magasabb LCOE értékekkel rendelkeznek, ami kevésbé kedvező megtérülést jelez.

Gazdaságossági szempontból a 3. konstrukció tűnik a legkedvezőbb választásnak, mivel mind az 5 Ft/kWh, mind a 15 Ft/kWh visszatáplálási ár esetén viszonylag alacsony LCOE értékeket mutat. Emellett ez a rendszer kisebb napi fogyasztási szintek mellett is

optimálisnak bizonyul, mivel a rendszer bekerülési költsége viszonylag alacsony, mindössze 4,57 millió forint. (6. ábra)



6. ábra Az LCOE alakulása – különböző átvételi árak és napi átlagfogyasztások mellett – a beruházási költségek függvényében

Összességében elmondható, hogy a magasabb visszatáplálási ár és a nagyobb napi fogyasztás kedvezőbb LCOE-értékeket eredményez, ami gazdaságosabb működést tesz lehetővé. Az elemzés alapján a 3. konstrukció tekinthető az optimális választásnak, különösen 15 Ft/kWh visszatáplálási ár mellett. Ezzel szemben a magasabb bekerülési költségű rendszerek kevésbé bizonyulnak gazdaságosnak, különösen alacsony visszatáplálási ár esetén.

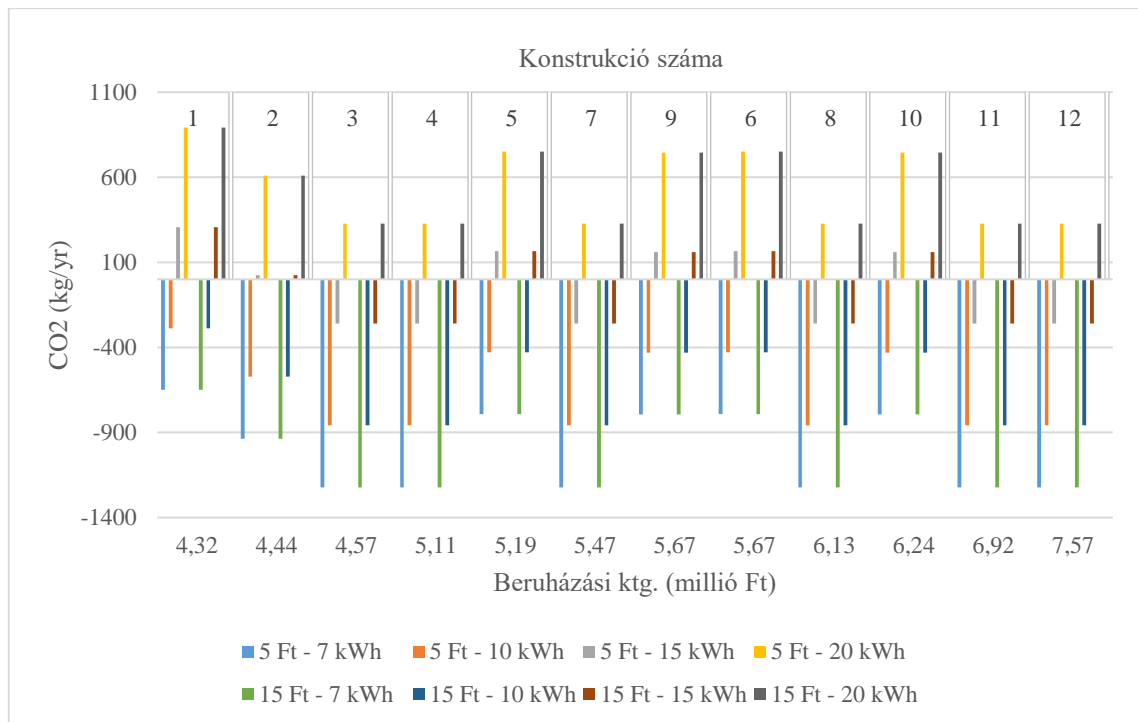
2.3.2 Életciklusra vetített szén-dioxid-kibocsátás

Az egyes napelemes konstrukciók szén-dioxid-kibocsátása különböző fogyasztási szinteken (7, 10, 15, és 20 kWh) és két visszatáplálási áron (5 Ft és 15 Ft) kerültek elemzésre. (7. ábra) A szén-dioxid-értékekből – ami lehet negatív előjelű is – lehet következtetni, hogy a rendszer mennyi szén-dioxid-kibocsátással terheli, illetve mentesíti a környezetét.

A szén-dioxid-megtakarítás mértéke nagyban függ a napi átlagfogyasztástól. Az alacsonyabb napi átlagfogyasztásnál a legtöbb konstrukció jelentős szén-dioxid csökkentést ér el, míg a magasabb fogyasztási szint mellett a kibocsátási érték nő. Például a 3. és 4. konstrukció esetében 7 kWh napi átlagfogyasztásnál -1222,35 kg/év szén-dioxid megtakarítás érhető el, addig ez 20 kWh napi átlagfogyasztásnál 328,09 kg/év kibocsátást eredményez.

Az visszatáplálási ár nem befolyásolja a szén-dioxid megtakarítást, mivel a szén-dioxid-kibocsátás értéke mindkét visszatáplálási ár mellett azonos, ez mindegyik rendszer konstrukcióra igaz. Ez azt jelzi, hogy a visszatáplálási ár változása a gazdasági mutatót érinti, a környezeti mutatókra nincs hatással.

A legkedvezőbb szén-dioxid-kibocsátás csökkentést a 3., 4., 7., 8., 11., és 12. konstrukciók érik el, amelyek minden fogyasztási szinten azonos szén-dioxid megtakarítást érhetnek el. Ezek a rendszerek -1222,35 kg/év szén-dioxid megtakarítást biztosítanak 7 kWh napi átlagfogyasztás mellett, és -259,57 kg/év kibocsátást 15 kWh napi átlagfogyasztásnál. A kevésbé hatékony rendszerekkel, mint például az 1., 2., 5., és 6. konstrukciókkal, alacsonyabb szén-dioxid-megtakarítás érhető el, de még mindig kedvezőbb, mint ha a villamosenergia teljes mennyisége a hálózatból származna.



7. ábra Az szén-dioxid-kibocsátás alakulása – különböző átvételi árakon és különböző napi átlagfogyasztásokon – a beruházási költségek függvényében

Összegezve a szén-dioxid-kibocsátás szempontjából a legkedvezőbb eredményeket az alacsonyabb napi átlagfogyasztású 3., 4., 7., 8., 11., és 12. konstrukciók érik el. Ezek a rendszerek biztosítják a legnagyobb mértékű szén-dioxid megtakarítást. A visszatáplálási ár nem befolyásolja a szén-dioxid megtakarítás, kibocsátás mértékét.

2.3.3 A beruházások pénzügyi megtérülése és hatékonysága

A 14. táblázat a különböző rendszerkonstrukciók nominális és diszkontált megtérülési idejét mutatja, eltérő napi átlagfogyasztási szintek (10, 15 és 20 kWh), valamint visszatáplálási árak (5 Ft/kWh és 15 Ft/kWh) mellett. A 14. táblázatban a sötétebb szín a rövidebb megtérülési időt jelöli.

Az elemzés során megállapításra került, hogy 15 Ft/kWh visszatáplálási ár mellett a megtérülési idők rövidebbek, mint az 5 Ft/kWh esetén. Ez azt jelzi, hogy a magasabb visszatáplálási ár javítja a napelemes rendszerek gazdaságosságát, és felgyorsítja a befektetés megtérülését.

Emellett a napi átlagfogyasztás szintje is jelentős hatással van a megtérülésre: alacsonyabb fogyasztás (például 10 kWh/nap) esetén a megtérülési idő hosszabb, míg magasabb fogyasztásnál (például 20 kWh/nap) a megtérülési idő rövidebb. Ez arra utal,

hogy a nagyobb energiaigény mellett a napelemes rendszerek hatékonyabban kihasználhatók, ami gyorsabb megtérülést eredményez. Fontos, hogy 7 kWh napi átlagfogyasztás mellett a beruházás nem tekinthető belátható időn belül megtérülőnek.

A megtérülés vizsgálata során különbséget kell tenni a nominális megtérülési idő és az – általában hosszabb – diszkontált megtérülési idő között. A diszkontált megtérülési idő figyelembe veszi a pénz időértékét, így realisabb, de hosszabb időtartamot mutat a beruházás megtérülésére.

A rendszerkonstrukciók és a bekerülési költségek szintén jelentős hatással vannak a megtérülési idő hosszára: az alacsonyabb beruházási igényű rendszerek (például az 1–4. konstrukciók) gyorsabb megtérülést eredményeznek, míg a magasabb bekerülési költséggel járó rendszerek (például a 10–12. konstrukciók) esetében a megtérülés hosszabb időt vesz igénybe. A legrövidebb megtérülést az alacsony vagy közepes bekerülési költségű rendszerek biztosítják, különösen akkor, ha magas a napi átlagfogyasztás és kedvező a visszatáplálási ár.

14. táblázat A rendszerkonstrukció megtérülésülése években

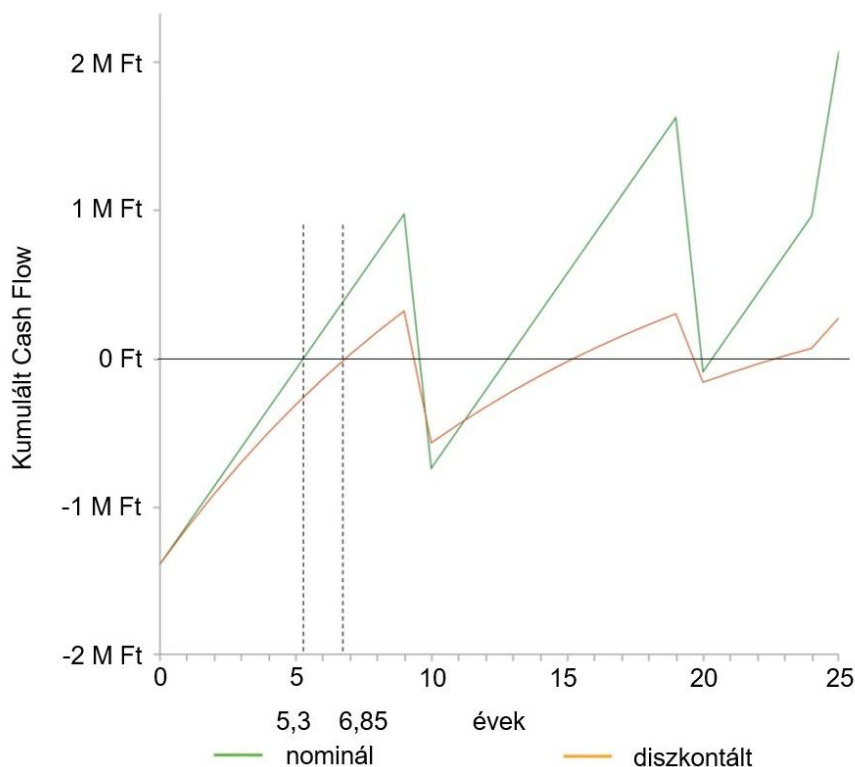
visszatáplálási ár		5 Ft				15 Ft					
		nominál		diszkontált		nominál		diszkontált			
napi átlagfogyasztás		15 kWh	20 kWh	15 kWh	20 kWh	10 kWh	15 kWh	20 kWh	15 kWh	20 kWh	
rendszerkonstrukció sorszáma	1.	4,32	6,09	4,98	8,21	6,34 !	8,57	5,85	4,88	7,80	6,18 !
	2.	4,44	5,90	4,76	7,88	5,99 !	8,01	5,54	4,58	7,25 !	5,72 !
	3.	4,57	5,79	4,62	7,68 !	5,78 !	7,56	5,30	4,37	6,85 !	5,41 !
	4.	5,11	6,45	5,15	8,88	6,62 !	8,43	5,90	4,87	7,88 !	6,17 !
	5.	5,19	7,00	5,68		7,49 !		6,65	5,52		7,22 !
	7.	5,47	6,86	5,48		7,15 !	8,96	6,28	5,18	8,56	6,67 !
	9.	5,67	8,00	6,51		8,98		7,50	6,26		8,53
	6.	5,67	7,65	6,20		8,42		7,27	6,03		8,10
	8.	6,13	7,67	6,13		8,30		7,03	5,80		7,71 !
	10.	6,24	8,79	7,15				8,24	6,88		
	11.	6,92	8,70	6,95				7,97	6,58		
	12.	7,57		7,60				8,71	7,19		

!: NPV>0; nettó jelenérték pozitív

A megtérülési idő akkor a legkedvezőbb, ha magas visszatáplálási árral, nagyobb napi energiafogyasztással és alacsony vagy közepes bekerülési költségű a rendszer.

Fontos azonban szem előtt tartani, hogy ezek a napelemes rendszerek olyan, jellemzően nagy értékű elemeket is tartalmaznak, amelyek az igénybevételtől függően 10–12 évente cserére szorulnak. Ezért a 14. táblázat kizárólag az úgynevezett első megtérülés időtartamát mutatja. Ezek azok a pontok a 9. ábrán, ahol a nominális és a diszkontált megtérülés görbéi először metszenek egy meghatározott küszöbértéket, nevezetesen a „kumulált cash flow = 0” egyenest. A görbék letörései az említett szerelemek cseréjének hatására alakulnak ki. A 14. táblázatban a „!” jelzi, hogy a beruházás a projekt végéig megtérül, azaz a konstrukciónak megfelelő 8. ábra diszkont görbéje a projekt időtartama végén pozitív tartományba esik.

Ezek a letörések újra meghosszabbítják a megtérülés időtávját, így kedvezőtlenül befolyásolják a gazdaságosságot. A letörések mértéke nagyban függ a jövőbeni cserealkatrészek – különösen az akkumulátorok – árától, valamint az esetlegesen elérhető állami támogatásoktól. A jelenlegi állami támogatás kizárólag a beruházás kezdetére vonatkozik; a későbbi szerelem-cserékre nem terjed ki, így ezek költségét a felhasználóknak piaci áron kell viselniük.



8. ábra A 3. rendszerkonstrukció nominál- és diszkontált megtérülés görbéi

Bizonyos rendszerkonstrukciók esetében előfordul, hogy adott napi átlagfogyasztás és visszatáplálási ár mellett sem a nominális, sem a diszkontált megtérülési görbe nem

metszi a „kumulált cash flow = 0” egyenest. Ez azt jelenti, hogy a rendszer a tervezett 25 éves élettartam alatt egyáltalán nem tekinthető megtérülőnek, vagyis a beruházás sosem válik nyereségessé. Számos esetben a drágább rendszerelemek – különösen az inverter és az akkumulátor – időszakos cseréje hátrányosan befolyásolja a megtérülést. Az ilyen hosszú távú beruházások gazdaságosságát jelentősen befolyásolja a diszkontráta és az infláció alakulása is. Ez utóbbi kettő által kerül meghatározásra a reál diszkontráta értéke, amelyet a szimulációs programban 7 százalékos értéken rögzítettek a Regionális Energiagazdasági Kutatóközpont (REKK) tanulmánya alapján [62].

2.3.4 A megújulóenergia-részarány várható alakulása

A 15. táblázat különböző napelemes rendszerek megújulóenergia-részarányát (System/RenFrac, %) mutatja eltérő napi fogyasztási szinteken (7, 10, 15 és 20 kWh). Az értékek azt jelzik, hogy a teljes villamosenergia-fogyasztás mekkora hányadát fedezi a napelemes rendszer által megtermelt villamos energia.

Fontos szem előtt tartani, hogy a fogyasztás és a termelés időbeli lefutása nem mindig esik egybe. Emiatt fordulhat elő, hogy a rendszer egyes időszakokban villamos energiát vesz fel a hálózatról, míg máskor többletermelés esetén visszatáplál a hálózatba.

Az elemzés alapján egyértelműen megfigyelhető, hogy a megújulóenergia-részarány csökken a napi fogyasztás növekedésével. A legkedvezőbb konstrukciók – a 3., 4., 7., 8., 11. és 12. rendszerek – 7 kWh napi átlagfogyasztás mellett 97,07%-os megújulóenergia-részarányt mutatnak, míg 20 kWh napi fogyasztás esetén ez az arány már csak 69,66%-ra csökken.

Ezzel szemben az 1. konstrukció alacsonyabb megújulóenergia-részarányt produkál, különösen a magasabb fogyasztási szinteken. Például 20 kWh napi fogyasztás esetén az 1. konstrukció csupán 57,91%-os részarányt ér el, ami a legalacsonyabb érték a vizsgált rendszerek közül. Ennek fő oka, hogy ebben a konstrukcióban található a legkisebb napelemkapacitás – mindössze 4,15 kWp összteljesítménnyel.

15. táblázat A megújulóenergia-résarány alakulása százalékban

napi átlagfogyasztás		7 kWh	10 kWh	15 kWh	20 kWh	
rendszerkonstrukció száma	3.	1.	97,07	92,52	81,63	69,66
	4.		97,07	92,52	81,63	69,66
	7.		97,07	92,52	81,63	69,66
	8.		97,07	92,52	81,63	69,66
	11.		97,07	92,52	81,63	69,66
	12.		97,07	92,52	81,63	69,66
	2.	2.	96,02	90,16	77,35	64,48
	5.	3.	95,27	88,58	74,63	61,41
	6.		95,27	88,58	74,63	61,41
	9.	4.	94,54	87,29	72,17	59,82
10.	94,54		87,29	72,17	59,82	
1.	5.	94,31	86,60	71,45	57,91	

Összességében elmondható, hogy minden vizsgált konstrukció esetében jelentős csökkenés figyelhető meg a megújulóenergia-résarányban a napi átlagfogyasztás növekedésével. Alacsonyabb fogyasztás esetén a 3., 4., 7., 8., 11. és 12. konstrukciók mutatják a legmagasabb megújulóenergia-résarányt. Nagyobb energiaigényű háztartások esetén azonban ez az arány csökken, ezért érdemes energiatakarékos megoldásokat alkalmazni annak érdekében, hogy a megújuló energia résaránya kedvező szinten maradjon.

2.4 A háztartási napelemes rendszerek fenntarthatóságával kapcsolatos következtetések

A kiegyenlített energiaköltség (LCOE) szempontjából kedvezőbb eredmények érhetők el magasabb napi energiafogyasztás és magasabb visszatáplálási ár mellett. Ennek oka, hogy a fix költségek nagyobb fogyasztás esetén hatékonyabban oszlanak el, míg a magasabb visszatáplálási ár csökkenti az egy egység energiára jutó költséget.

A szén-dioxid-kibocsátás szoros összefüggésben áll a fogyasztási szinttel és a választott rendszerkonstrukcióval. Alacsony fogyasztású háztartások esetén jelentős szén-dioxid-megtakarítás érhető el, míg magasabb fogyasztás esetén már megjelenik a kibocsátás. A kibocsátás mértéke még mindig alacsonyabb annál, mintha a háztartás kizárólag a hálózatról vételezne a villamosenergiát. Amennyiben egy magasabb fogyasztású háztartás számára fontos a környezetvédelem, akkor érdemes az energiahatékony és az energiatakarékos megoldások alkalmazása. Fontos megjegyezni, hogy a visszatáplálási ár nem befolyásolja a szén-dioxid-kibocsátást, mivel az kizárólag gazdasági tényezőkre hat.

Az elemzések alapján az állapítható meg, hogy a megtérülési idő gyorsabban csökken magasabb visszatáplálási ár mellett, különösen a nagyobb energiaigényű háztartások esetében. Az egyszerű megtérülési idő rövidebb, mint a diszkontált megtérülési idő, mivel utóbbi a pénz időértékét is figyelembe veszi. A kisebb bekerülési költségű rendszerek esetén gyorsabb megtérülés biztosított, főként akkor, ha magasabb energiafogyasztással és kedvező visszatáplálási árral párosulnak.

Kiemelendő, hogy az elemzések a beruházások első megtérülési szakaszára korlátozódnak, így nem számolnak azokkal a jövőbeli kiadásokkal, amelyek a nagy értékű szerelemek – elsősorban az inverter és az akkumulátor – élettartam alatti cseréjéből adódnak. Ezek a pótlólagos költségek érdemben módosíthatják a teljes megtérülési időtávot, különösen abban az esetben, ha a reál diszkontráta vagy az infláció mértéke eltér a jelenlegi feltételezésektől.

A megújulóenergia-résarány jelentősen csökken a napi fogyasztás növekedésével. Kisebb energiaigényű háztartások esetén a rendszerek magasabb megújuló részarányt képesek biztosítani, míg nagyobb fogyasztásnál ez az arány visszaesik. Ennek ellensúlyozására energiatakarékos intézkedések bevezetése szükséges a fenntarthatóság

megőrzése érdekében. A megújulóenergia-résarány és a szén-dioxid-kibocsátás között erős korreláció figyelhető meg: minél nagyobb a megújuló részarány, annál alacsonyabb a szén-dioxid-kibocsátás.

A napelemes rendszerek kiválasztásánál fontos szempontként kell figyelembe venni a bekerülési költséget, az energiafogyasztás mértékét, a visszatáplálási árat, valamint a környezeti hatásokat és a megtérülési időt. Optimális választásnak olyan rendszer tekinthető, amelyben egyensúly teremthető a gazdaságosság és a környezeti előnyök között, és amely méretezésében igazodik a háztartás energiaigényéhez.

A háztartási rendszerek gazdasági és szabályozási kockázatelemzése alapján kijelenthető, hogy a decentralizált energiatermelés elterjedése hosszú távon csak a klímakitetés integrált figyelembevételével valósítható meg. A következő fejezet ezen jövőbeli éghajlati tényezők hatásainak elemzésére fókuszál.

3 A megújuló energiaforrások teljesítményének modellezése különböző klímaforgatókönyvek mentén

A háztartási napelemes rendszerek vizsgálata során megállapítást nyert, hogy a beruházási megtérülés és a rendszerhatékonyság erőteljesen függ a környezeti feltételek alakulásától. Ennek megfelelően a következő elemzés célja annak feltárása, hogy a különböző RCP klímaforgatókönyvek milyen hatással lehetnek a megújuló energiaforrások jövőbeli teljesítményére.

3.1 A megújulók térbeli eloszlásának és szerepének háttere

A villamosenergia-rendszereket érő éghajlatváltozás és geopolitikai kockázatok világszerte gyors intézkedéseket tesznek szükségessé; ez különösen igaz Európára. Ebben nyújthat nagy segítséget a megújuló energiaforrások használata, különösen a nap- és szélenergia. Ez a két energiaforrás a legalacsonyabb kockázatú, és a legkisebb károsanyag-kibocsátással járó technológiának számít. A különböző energiaforrások és technológiák együttes üzeme által csökkenthetők a kiegyenlítő energiák és az integráció költségei. [63].

A globális energiaipar arra készül, hogy a 2023–2028 közötti időszakban több megújuló kapacitás épül ki, mint amennyi az előző száz évben összesen megvalósult. Ez a világ 130 országának támogató politikájának köszönhető, és mintegy 3700 GW megújulóenergia-kapacitást jelent.

A 2028-ig terjedő időszakban számos, megújuló energiával kapcsolatos célkitűzés elérése várható, többek között:

- 2024-től a nap- és szél erőművek több villamos energiát fognak termelni, mint a vízenergia;
- 2025-től a megújulókból termelt villamos energia mennyisége meghaladja a szénből előállított villamos energiát;
- 2025 és 2026 között a nap- és szélenergia-termelés túlszárnyalja a nukleáris energiából származó villamosenergia-termelést;
- 2028-ra várhatóan a megújuló energiaforrások a világ villamosenergia-igényének 42%-át fogják fedezni, ebből a nap- és szélenergia együttesen 25%-ot tesz ki [64].

A megújuló energiaforrások közül jelenleg egyedül a napelemes technológia halad a 2050-re tervezett nettó nulla kibocsátású (NZE) forgatókönyv szerint. A többi megújuló – így a szél-, víz-, geotermikus-, napkollektoros és óceáni energia – jelentősen elmarad ettől a pályától. Ahhoz, hogy ezek is megközelítsék a napelemek fejlődési ütemét, a jelenlegi 5%-os részesedésüket 17%-ra kell növelniük a globális villamosenergia-termelésen belül. E cél eléréséhez a megújuló energiaforrásoknak évente átlagosan 13%-kal kellene növekedniük [64].

Az NZE forgatókönyv szerint a szén-dioxid-kibocsátás csökkentésének egyik legfontosabb tényezője a megújuló energiaforrások bővítése. Ennek megvalósításában kiemelkedő szerepet kap a nap- és a szélenergia alkalmazása. Ez az a technológia, amely a legnagyobb mértékben járulhat hozzá a fosszilis alapú energiaforrások kiszorításához – különösen a legszennyezőbb, szénalapú erőművek kiváltásához. A végfelhasználói szektorban a megújuló energia közvetlen módon villamos energiaként, közvetetten pedig például „zöld hidrogénként” kerülhet felhasználásra. A végfelhasználói szektorban használt fosszilis tüzelőanyagok jelentős része ezekkel a megoldásokkal váltható ki, különösen az ipar és a közlekedés ágazataiban. Jelentős potenciállal rendelkeznek a megújuló hőforrások is, amelyek alkalmazása nagy mennyiségű fosszilis tüzelőanyag megtakarítását eredményezheti.

A megújuló villamosenergia-termelési kapacitások rohamléptékű növekedése a támogatásoknak, pályázati lehetőségeknek, valamint a napelemes és szélenergia-technológiák jelentős költségcsökkenésének volt köszönhető. Az energiaszektor, a hőszolgáltatás és a közlekedés területén a megújuló energiaforrások alkalmazása kulcsfontosságú tényező annak érdekében, hogy a globális átlaghőmérséklet emelkedése ne haladja meg az 1,5 °C-ot. A nettó nulla kibocsátású forgatókönyv szerint a megújuló energiaforrások révén válhat a villamosenergia-termelés 2050-re teljes mértékben szén-dioxid-kibocsátás-mentessé [64].

3.1.1 A napelemes rendszerek jellemzői és elterjedése

A napelemes (fotovoltaikus, PV) energiatermelők egyik nagy előnye a moduláris technológia. A modulok néhány wattos teljesítménytől több száz wattig terjedő teljesítménytartományban érhetők el. Ezek felhasználásával a háztartási méretű kiserőművektől (HMKE, 0–50 kW), a közepes méretű erőműveken (>50 kW, <500 kW) át egészen a naperőművekig (>500 kW) széles körű energiatermelő igények elégíthetők

ki. A szabványos moduloknak köszönhetően gyártásuk és tesztelésük könnyen automatizálható [65].

Bár a napelemek gyártása drága nyersanyagokat igényel, mégis – különösen közepes nagyságú teljesítményszinten – a legtöbb országban ez a legköltséghatékonyabb megoldás a villamosenergia-termelésre. A növekvő energiaárak mellett a háztartási alkalmazásuk is egyre elterjedtebb. A napelemes energiatermelő rendszerek ma már az elosztott villamosenergia-termelés egyik alappillérévé váltak. Telepítésük rendkívül sokféle helyszínen történik: háztetőkön, épületfalakon, sőt akár bányák meddőhányóin is elhelyezhetők. Sok esetben másodlagos funkciót is betöltenek, például árnyékolásra is felhasználhatók [65].

Fontos, hogy a napelemes rendszerek elmúlt években tapasztalt jelentős növekedése a jövőben is fenntartható legyen. Ez elengedhetetlen ahhoz, hogy teljesülhessen a 2050-re kitűzött nettó nulla kibocsátású forgatókönyv, ehhez azonban folyamatos szakpolitikai támogatás is szükséges. A napelemek önmagukban a megújuló kapacitásbővülés mintegy háromnegyedét tették ki 2023-ban. Az elkövetkező években a megújuló energiaforrások bővülésében a nap- és szélenergia együttesen a növekedés több mint 95%-át fogja adni. Ennek fő oka, hogy termelési költségük alacsonyabb, mint a fosszilis energiaforrásoké, amelyhez hozzájárul az egyre emelkedő szén-dioxid-kvóta ára is. Az előrejelzések szerint 2028-ra a nap- és szélenergia-termelés a 2022-es szinthez képest akár kétszeresére is nőhet [65].

3.1.2 A szélenergia-potenciál elméleti alapjai

A szárazföldi szélenergia (onshore) már igen hosszú múltra tekint vissza. Az utóbbi időszak fejlesztéseinek célja az, hogy maximalizálják a beépített kapacitások villamosenergia-termelő képességét. A cél a szélerőművek kapacitásfaktor növelése. A technológia jelentős ütemben fejlődik: a szélturbinák nagyobbá váltak, nőtt az agymagasságuk, és megnőtt a rotorátmérő is.

A tengeri szélenergia (offshore) nagy valószínűséggel gyorsabb ütemben fog növekedni az elkövetkező években, mivel a turbinák tengeri telepítése egyre hatékonyabban képes kihasználni a szárazföldinél erősebb, állandóbb szelet.

A nettó nulla kibocsátású forgatókönyv szerint 2050-re a napenergia mellett a szélenergia válik a villamosenergia-termelés egyik meghatározó forrásává. Ennek érdekében a 2030-

ig tartó időszakban a szélkapacitás bővítését jelentősen fel kell gyorsítani, hogy a 2050-re kitűzött célok teljesülhessenek. Ezért mind a szárazföldi, mind a tengeri szélerőművek fokozott állami támogatást igényelnek. A támogatásokon túl kiemelten fontos a kapcsolódó engedélyeztetési eljárások egyszerűsítése és az elbírálási határidők csökkentése [66].

3.1.3 A hazai megújuló energiaforrások

A magyar bruttó villamosenergia-termelés több mint 73%-át 2023-ban továbbra is nem megújuló energiaforrások adták. A teljes villamosenergia-termelés 45,6%-át nukleáris, 20,6%-át földgáz, míg 7,2%-át széntüzelésű erőművek biztosították. A megújuló energiaforrások között a napelemes termelés 18,7%-os részesedést ért el, a szélenergia 1,9%-kal, a biomassza 3,2%-kal járult hozzá a villamosenergia-termeléshez, míg a többi forrás együttesen 2,8%-ot tett ki [67]. (16. táblázat)

16. táblázat Az magyar éves bruttó villamosenergia-termelés gigawattórában 2018-2023

Energiahordozó	2018	2019	2020	2021	2022	2023e*
Nukleáris	15 733	16 288	16 055	15 990	15 812	15 918
Szén és széntermékek	4 834	4 184	3 826	3 105	3 064	2 505
Földgáz	7 282	8 700	9 091	9 653	8 846	7 170
Kőolajtermékek	91	71	45	59	59	37
Biomassza	1 798	1 769	1 664	1 775	1 693	1 123
Biogáz	336	321	324	295	315	259
Kommunális megújuló	162	137	167	161	130	116
Víz	222	219	244	212	178	222
Szél	607	729	655	664	610	644
Nap	629	1 497	2 459	3 796	4 732	6 537
ebből 50 kW alatti**	372	576	851	1 398	1 613	2 130
Geotermikus	12	18	16	12	4	15
Egyéb	361	358	384	398	327	349
Összesen	32 067	34 291	34 930	36 120	35 770	34 895

Forrás: szerkesztés [67] alapján

Szembetűnő, hogy míg a napenergia termelése 2018 és 2023 között több mint tízszeresére nőtt, addig a szélenergia-termelés gyakorlatilag változatlan maradt. Ennek oka a 2016 óta hatályos „szélenergia-stop” szabályozás, amely jelentősen korlátozza az új szélerőművek létesítését. A napelemes és szélenergia-termelés összehasonlításakor kiemelendő, hogy 2018-ban a termelésük aránya 1:1 volt, míg 2023-ra ez az arány 11:1-re változott a

napenergia javára. Szintén figyelemre méltó, hogy 2018-ban a nagyüzemi (közép- és nagyteljesítményű termelők) és a háztartási méretű napelemes erőművek 1:1 arányt képviseltek, addig 2023-ra ez az arány 2:1-re módosult a nagyüzemi termelés javára.

3.1.4 A RePowerEU stratégia

A 2023-as magyarországi RePowerEU terv legfontosabb célja az orosz gáztól való függetlenség elérése. Ennek érdekében határozták meg az energiapolitikai irányokat és célkitűzéseket. A leválás érdekében két fő területre helyeztek hangsúlyt: az egyik az energiafogyasztás csökkentése, a másik a megújuló energiaforrások minél nagyobb arányú kihasználása. Lényeges, hogy az energiatermelésben a megújulók irányába történjen az elmozdulás, ne pedig a fosszilis tüzelőanyagok használata felé [68], [69].

Annak érdekében, hogy a jövőben a megújuló energiák nagyobb súllyal jelenjenek meg a bruttó végső energiafogyasztásban, a Nemzeti Energia- és Klímaterv (NEKT, angolul NECP) szoroson specifikált célokat dolgozott ki. A dokumentum elkészítését és időszakos felülvizsgálatát az Európai Unió 2018/1999-es rendelete („az energiaunió és az éghajlat-politika irányításáról”) írja elő [70].

A célkitűzések szerint 2030-ra 13 GW időjárásfüggő megújulóenergia-kapacitást kell beépíteni, amelyből 12 GW-ot a napenergia, 1 GW-ot pedig a szélenergia képvisel. Rendszerüzemeltetési szempontból ez az arány nem ideális, mégis jelenleg ebbe az irányba mutatnak a fejlesztési tervek. A NEKT hangsúlyozza, hogy az időjárásfüggő megújuló technológiáknak támogatniuk kell a többi termelővel való együttműködést. Emellett a technológiának képesnek kell lennie – amennyire lehetséges – követni a nap- és szélenergia-termelésből eredő ingadozásokat, és tudnia kell azokat rugalmasan kezelnie. [69], [71].

A célok között szerepel a megújuló energián alapuló erőművek csatlakozási engedélyeinek elősegítése is, amely elengedhetetlen a közeljövőben megvalósuló, mintegy 12 GW-ra bővülő napenergia-kapacitás hálózati integrálásához. A fő kihívást várhatóan a szélerőművek korlátozott támogatása fogja jelenteni. Előreláthatóan a csatlakozási lehetőségek nem fogják az ország teljes területét lefedni, és a hálózatra kapcsolható szélerőművek száma is korlátozott lesz. Ez különösen hátrányos, mert az orosz gázimportról való leválás egyik leghatékonyabb eszköze a szélenergia alkalmazása lehetne [71]. A másik igen hatékony eszköz ezen a téren a földhő nagyobb arányú hasznosítása lenne.

3.2 A megújuló energiatermelés jövőbeli alakulása RCP forgatókönyvek alapján: módszertani keret és modellezés

3.2.1 A Copernicus éghajlati adatbázis és idősorainak bemutatása

A számításokhoz felhasznált adatsorok a Copernicus Climate Change Service (C3S) Energy adatbázisából származnak [72]. A Copernicus az Európai Unió Űrprogramjának (EU Space) Föld-megfigyelési komponense, amely széles körű környezeti információkat szolgáltat műholdas és nem műholdas mérések alapján. A programot az Európai Bizottság irányítja, míg a végrehajtásban a tagállamok, az Európai Űrügynökség (ESA), a Meteorológiai Műholdak Európai Szervezete (EUMETSAT), az Európai Környezetvédelmi Ügynökség (EEA), valamint különböző időjárás-központok és kutatóintézetek vesznek részt, és felügyelik azt. A program során nagy mennyiségű adat keletkezik műholdas, földi, légi, valamint tengeri mérőrendszerekből. Ezeket az adatokat feldolgozás és elemzés után többek között az ipar, a mezőgazdaság és a környezetvédelem rendelkezésére bocsátják [73].

A C3S adatkészletei éghajlati- és energiamutatókat tartalmaznak. Az energiaszektor számára különösen fontos környezeti paramétereket biztosítanak, mint például a napsugárzás, a szélesebbesség (10 és 100 méteres magasságban), a levegőhőmérséklet, a csapadék és a légnyomás. Az energiamutatók között szerepel a villamosenergia-igény, valamint a különböző energiaforrásokhoz kapcsolódó előrejelzések és történelmi adatsorok. A megújuló energiaforrásokra – mint a szél-, nap- és vízenergia – vonatkozóan számított kapacitásértékeket is tartalmaznak. Ezek a mutatók különböző földrajzi felbontásban érhetőek el, melynek mértéke az adat típusától függ. A felbontások lehetnek országos, regionális vagy rácsalapúak – utóbbi esetben a rácsok kb. 30×30 kilométeres területeket fednek le, de eltérő rácsfelbontások is elérhetőek. Különösen fontosak a gazdasági elemzések szempontjából a NUTS0 és NUTS2 regionális összesítések (Nomenclature des unités territoriales statistiques), amelyeket az Eurostat (Európai Statisztikai Hivatal) definiál. (17. táblázat) Hasonló célból kerültek bevezetésre a MAR0 és MAR1 osztályok is, amelyek tengeri területeket határoznak meg [74].

17. táblázat A magyarországi NUTS 0, 1 és 2-es osztályok

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 9. ábrán láthatóak.



9. ábra Magyarország NUTS2 szerinti felosztása

Forrás: szerkesztés [74] alapján

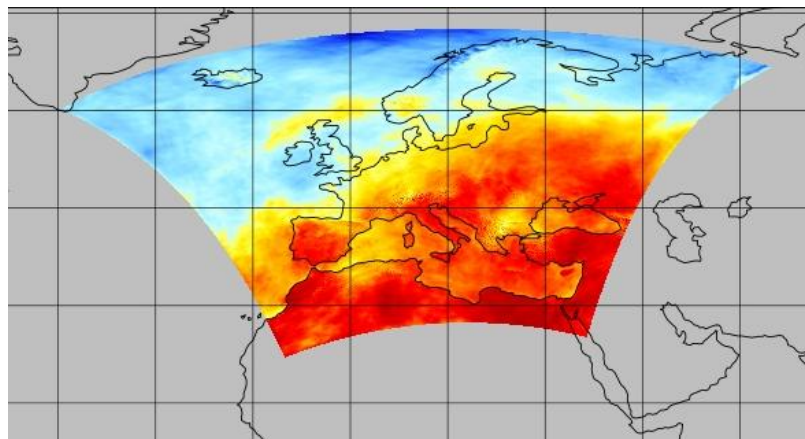
Az éghajlati- és energiarendszerre vonatkozó adatok térbeli és időbeli bontásban érhetők el. Számos változó esetében különböző forgatókönyveket is tartalmaznak, mint például az RCP (Representative Concentration Pathways) forgatókönyveket. Az RCP-k célja elsősorban az, hogy leírják a légkörben található üvegházhatású gázok koncentrációjának időbeli változását, valamint az ehhez szorosan kapcsolódó környezeti, gazdasági és energetikai tendenciák modellezését. Ezek a forgatókönyvek lehetőséget nyújtanak rövid-, közép- és hosszú távú energetikai rendszertervezésre és gazdasági előrejelzések készítésére. Különösen fontos az, hogy a hőmérséklet-emelkedés miként hat a villamosenergia-igény alakulására. Ugyanígy kiemelt jelentőségű az is, hogy a hőmérsékletváltozás milyen hatással van a megújulóenergia-termelésre.

A már említett C3S Energy szolgáltatás három fő időszakra tagolható:

- történelmi adatbázis (1979-től napjainkig),

- szezonális előrejelzések,
- hosszú távú előrejelzések (2005–2100).

Ezek közül a hosszú távú előrejelzés adatkészlet referenciaként szolgáló éghajlati változókat biztosít. Ezek az európai regionális klímamodell-kísérlet, a CORDEX alapján generáltak [72]. A CORDEX-et (COordinated Regional climate Downscaling EXperiment) a World Climate Research Programme hozta létre 2009-ben azzal a céllal, hogy kontinensméretű tartományokra készítsen éghajlati modellszimulációkat [75]. (10. ábra) Európa esetén ez a nyugati hosszúság -22 foktól keleti hosszúság 45 fokig, valamint az északi szélesség 27 foktól 72 fokig terjedő területet fedi le. Az elemzésben a CORDEX program Euro-CORDEX nevű, európai szimulációkat végző ágának adatai szolgáltak alapul. (A CORDEX, az Euro-CORDEX-en túl kiterjed Európa mellett Észak-Afrikára is.) [76].



10. ábra CORDEX földrajzi lefedettsége

Forrás: szerkesztés [75] alapján

A klímaváltozás okozta hőmérséklet-emelkedés negatív hatással van a villamosenergia-termelésre. A megújulók esetében a napelemes rendszerek hatásfokát csökkenti a magas hőmérséklet, mivel ezek a rendszerek félvezető-technológián alapulnak, amelyek hatásfoka a hőmérséklet-emelkedéssel csökken. A hőerőművek működését szintén hátrányosan érinti a magasabb hőmérséklet, mivel a hűtővíz vissza hűtéséhez több energiára van szükség. Ennek következtében nő az erőművek önfogyasztása, ami csökkenti azok hatásfokát. A fogyasztási oldalon is kedvezőtlen hatás figyelhető meg: mind az ipari, mind a lakossági szektorban megnő a hűtési igény, ami növeli a villamosenergia-felhasználást. A klímaváltozás következtében megváltozó szélirány- és

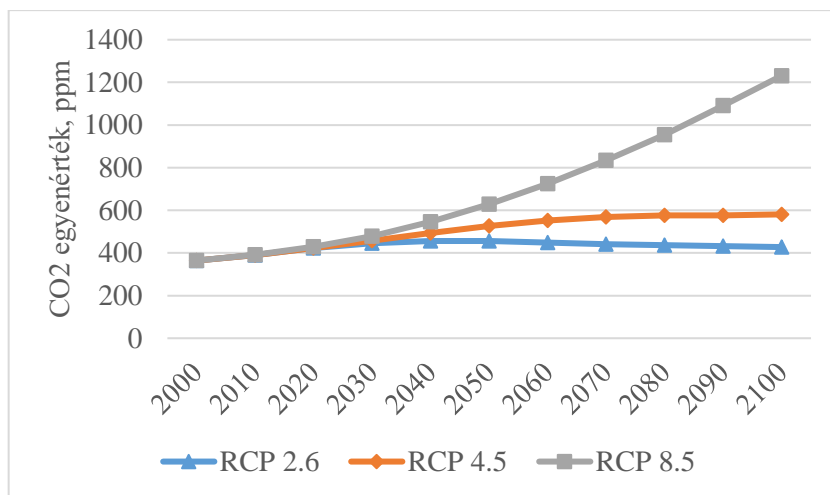
szélesség-változások is hatással vannak a villamosenergia-termelésre. A szél erőssége csak meghatározott szélesség-tartományban képes gazdaságosan működni. Ezek a paraméterek hosszú távon térben (földrajzilag) és függőlegesen (talaj feletti magasságban) is változhatnak, ami lehetőséget biztosít új szél erőssége-telepítési helyszínek kijelölésére olyan területeken, ahol korábban ez gazdaságosan nem valósulhatott volna meg. A szél erőssége gondolái napjainkban már jellemzően 80–100 méter, vagy annál is nagyobb magasságban helyezkednek el, a lapáttechnológiák pedig folyamatosan fejlődnek, tovább javítva a szélenergia-átalakítás hatékonyságát.

3.2.2 Energia-idősorok képzése statisztikai és fizikai modellek alapján

Az energia-idősorok értékeinek kiszámításához az éghajlati változók statisztikai modelljeit, valamint az energiatermelő berendezések fizikai modelljeinek kombinációját alkalmazzák. Ezek az adatok szolgálnak alapul az éghajlatváltozás és az energiaváltozók közötti kapcsolat robusztusságának értékeléséhez [77].

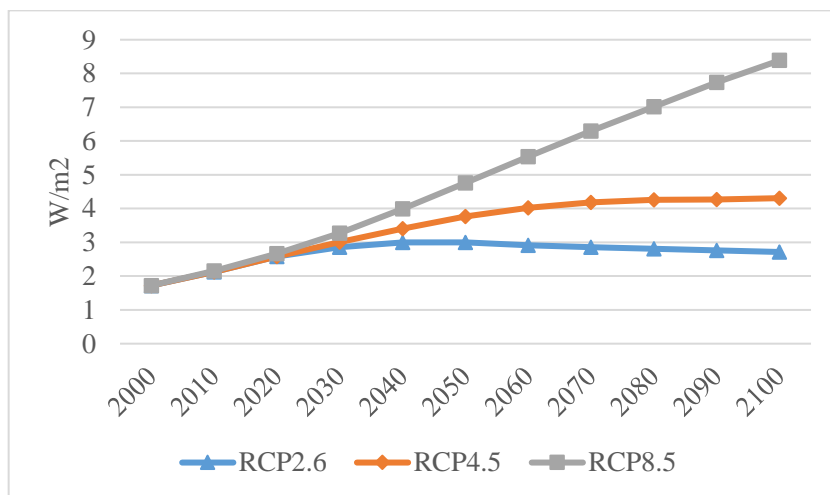
3.2.3 RCP forgatókönyvek és éghajlati feltételek jövőbeli változásai

Az üvegházhatású gázok (ÜHG) jövőbeli kibocsátását és légköri koncentrációját nehéz pontosan előre jelezni, mivel ezek számos tényezőtől függenek. Ilyenek például a népesség- és gazdasági növekedés, az energiafelhasználás – különösen a megújulóké –, a technológiai fejlődés, valamint a földhasználati változások. A klíma modellezéshez három fő koncentrációs útvonalat határoztak meg: RCP2.6, RCP4.5 és RCP8.5 (használatos még az RCP6.0, illetve egyéb RCP-k közötti átmenetet jelentő forgatókönyvek). Az RCP-k térben és időben szimulálják az emberi tevékenység által kibocsátott üvegházhatású gázok és más szennyezőanyagok koncentrációját. Ezek az útvonalak számszerűsítik az üvegházhatású gázok légköri koncentrációját, valamint meghatározzák az ezekhez kapcsolódó sugárzási kényszer mértékét. (11-12. ábra) A sugárzási kényszer az éghajlati rendszer energiaegyensúlyának változását jellemzi. Ezt olyan légköri „kényszerítő” anyagok – például gázok, aeroszolok vagy por – jelenléte okozza, amelyek módosítják a globális sugárzási viszonyokat, és ezáltal hozzájárulnak az éghajlatváltozáshoz [78].



11. ábra Az RCP-k szén-dioxid-kibocsátás alakulása

Forrás: szerkesztés [79-86] alapján



12. ábra Az RCP-k sugárzási kényszer alakulása

Forrás: szerkesztés [79-86] alapján

Az alábbiakban három RCP forgatókönyv került elemzés tárgyává, ezek fő jellemzői:

- **RCP2.6:** Az üvegházhatású gázok, különösen a szén-dioxid-kibocsátás a század elejéig nem változik, ezt követően csökken. A forgatókönyv feltételezi, hogy a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása jelentősen csökkenni fog, a megújuló energiaforrások használata meredeken nő, a termőföldek egy része bioüzemanyag-termelésre áll át, és a metánkibocsátás mintegy 40%-kal mérséklődik [79], [80].
- **RCP4.5:** A szén-dioxid-kibocsátás a század közepéig enyhén emelkedik, majd csökkenni kezd. Az energiafelhasználás csökken, nagy léptékű erdősítések

valósulnak meg. Az új agrártechnológiák következtében javul a terméshozam, az alacsonyabb húsfogyasztás miatt csökken a mezőgazdasági területek igénybevétele. Átfogó klímapolitikai intézkedések kerülnek bevezetésre, és a metánkibocsátás változatlan szinten marad [81], [82], [83].

- **RCP8.5:** Az évszázad végére a szén-dioxid-kibocsátás várhatóan eléri a jelenlegi érték háromszorosát, miközben a metánkibocsátás is jelentősen nő. Az energiafelhasználás, valamint a fosszilis tüzelőanyagok iránti kereslet tovább emelkedik. A megújuló energiaforrásokon alapuló beruházások csak korlátozott mértékben valósulnak meg, és az éghajlat-politikai célkitűzések többsége nem teljesül [86].

A jövőben az üvegházhatású gázok eltérő légköri koncentrációja miatt az RCP2.6 forgatókönyv esetén várható a legkisebb mértékű klímaváltozás és ezen belül globális felmelegedés. Ezzel szemben az RCP8.5 forgatókönyv esetén a felmelegedés üteme lesz a leggyorsabb, és a klímaváltozás hatása is ebben az esetben lesz a legerőteljesebb. Fontos megjegyezni, hogy az RCP forgatókönyvek lefutása az évszázad közepéig csak kis mértékben térnek el egymástól. Ennek oka az, hogy az éghajlati rendszerek viszonylag lassan reagálnak az üvegházhatású gázok koncentrációjának változására – másképpen fogalmazva, az éghajlati rendszerek tehetetlensége nagy. Ez azt is jelenti, hogy a beavatkozások után az egyensúly is csak lassan áll helyre. Az RCP8.5 forgatókönyv jelentős felmelegedést, valamint fokozott változékonyságot eredményez a vízhozamokban, a felszíni vizek hőmérsékletében és a csapadékmennyiségben. Az RCP2.6 és az RCP4.5 forgatókönyvek közötti különbségek várhatóan kisebbek lesznek, mint az RCP4.5 és az RCP8.5 közötti eltérések [84], [85], [87].

3.2.4 Energiakínálati és -keresleti adatok forrásai és jellemzői

Az energiakínálati és -keresleti adatok több forrásból származnak, ezek közül az egyik legfontosabb az ENTSO-E. Az ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity – az Európai Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányítók Hálózata) az európai átviteli rendszerüzemeltetők (TSO-k) együttműködésének szövetsége. A szervezet 36 országot képvisel, és 40 tagvállalata felelős Európa villamosenergia-rendszerének biztonságos és összehangolt működtetéséért [86].

3.2.5 A napenergia-termelés regionális adatkészletei és kapacitásfaktorai

A fotovoltaikus energia (SPV) adatbázis értékeit fizikai jellemzők és statisztikai modellek kombinációjával számítják ki. A fotovoltaikus rendszerek kapacitásfaktora (Capacity Factor – CFR) a valós villamosenergia-termelés és a névleges beépített kapacitás arányát fejezi ki. Ez a mutató dimenziómentes (MWh/MWh), értéke 0 és 1 között mozog, ami százalékos formában 0%–100%-nak felel meg. (13. ábra)

Fontos megjegyezni, hogy ez az érték nem egyetlen napelemes rendszer termelésére utal. A számítás lényege, hogy minden rácspont (vagy régió) esetében az adott érték az ott telepített napelemes rendszerek együttes villamosenergia-termelését reprezentálja. Ehhez egy referencia-erőműmodellt alkalmaznak, amely figyelembe veszi:

- a meteorológiai adatokat, például a teljes horizontális sugárzást és a levegő hőmérsékletét,
- a napelem-modulok tájolását és dőlésszögét,
- valamint a napelemes rendszermodell paramétereit, például az optikai veszteségeket, a modulok és inverterek technikai jellemzőit.

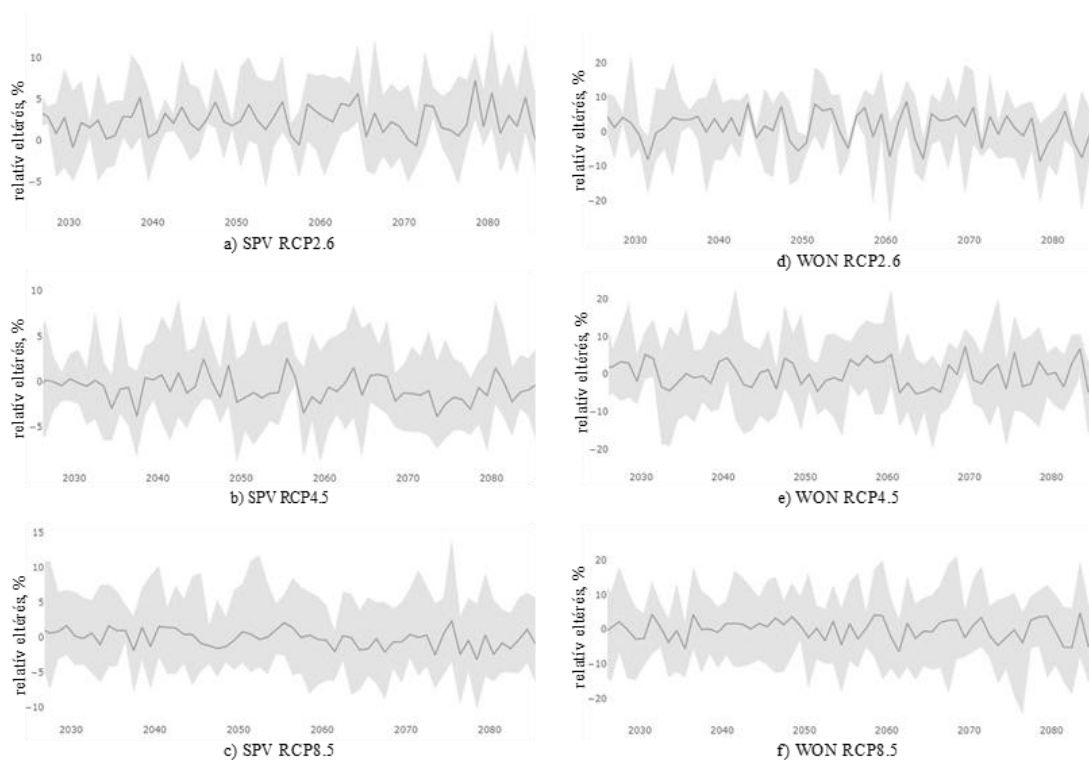
3.2.6 A szárazföldi szélenergia-termelés regionális adatkészletei és kapacitásfaktorai

Alapvetően kétféle szélenergia-típust különböztetünk meg: a szárazföldi szélenergiát (WON) és a tengeri szélenergiát (WOF). Az alábbiak kizárólag a szárazföldi szélenergiával foglalkoznak. A szélenergia kapacitásfaktor, hasonlóan a napenergia kapacitásfaktorhoz, a tényleges termelés és a beépített kapacitás hányadosaként határozzák meg. Ebben az esetben is a mutató dimenziómentes (MWh/MWh), amely értéke 0-1, illetve 0%–100% közötti értéket vesz fel.

A szélenergia-termeléshez kapcsolódó adatkészletek egy egyszerű fizikai modell alapján kerülnek meghatározásra. A kapacitásfaktor értékeit régiós – azaz rácsponti – szinten számítják ki. A modell minden rácspontban egyetlen, azonos típusú szélturbinát feltételez, amelynek agymagassága 100 méter.

Az elemzés célja nem a szélturbinák jellemzőinek pontos előrejelzése, hanem összehasonlítható alap biztosítása az egyes régiók szélenergia-potenciáljának vizsgálatához. Fontos megjegyezni, hogy a számított kapacitásfaktor sok esetben túlbecsült a tapasztalati adatokhoz képest, mivel nem a ténylegesen beépített turbinák műszaki paramétereivel dolgoznak. Az eltérést okozhatja például az agymagasság, a

beépített kapacitás, valamint a karbantartásból vagy meghibásodásból eredő időszakos kiesések figyelmen kívül hagyása. (13. ábra)



13. ábra A nap és szélenergia kapacitásfaktor relatív értékeinek alakulása RCP forgatókönyvek alapján

3.2.7 Portfólióelemzés: nap- és szélenergia szórásának és hozamának meghatározása

Minden egyes régióra, időszakra és RCP forgatókönyvre kiszámításra került a nap- és szélenergia-portfólió közös szórása, valamint az ezekhez tartozó kapacitásfaktor. A földrajzi felbontás a NUTS2 régiók szerint történt. A vizsgált két időszak a 2026–2055 és az 2056–2085 közötti évekre terjedt ki. Az elemzés során a három fő forgatókönyv (RCP2.6, RCP4.5 és RCP8.5) került összehasonlításra.

A számításokhoz szükséges kiinduló adatok a Climate Data Store [89] szolgáltatásából származnak. Egy-egy NUTS2 régió portfóliójának meghatározásához az adott időszak éves kapacitásfaktor kerül letöltésre mind nap-, mind szélenergia esetén. Így minden régióhoz két, harminc elemből álló éves idősor állt rendelkezésre. Ezek alapján meghatározásra kerül az adott időszakok szórása, várható értéke, valamint a nap- és

szélerő-idősorok kovarianciája. A portfólió-összetétel tízs százalékos lépésközökkel változik, ahol a w_{spv} és w_{won} a nap- és szélerő súlyát jelöli a portfólión belül.

Ezek ismeretében minden w_{spv} és w_{won} értékpárra kiszámításra kerül az együttes szórásnégyzet:

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

ebből kerül meghatározásra az együttes szórás, ami nem más, mint a portfólió kockázata az adott w_{spv} és w_{won} értékpárnál:

$$\sigma_{spv,won} = \sqrt{\sigma_{spv,won}^2}$$

, ahol

- CFR_{spv} : a napelemes erőmű éves kapacitásfaktora,
- CFR_{won} : a szélerőmű éves kapacitásfaktora,
- w_{spv} : a CFR_{spv} súlya, 0 ... 1, illetve 0 ... 100%,
- w_{won} : a CFR_{won} súlya, 0 ... 1, illetve 0 ... 100%,
- $w_{spv} + w_{won} = 1$, illetve 100%,
- σ_{spv} : 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 tartozó hozamérték az idősorok átlaga és a portfólió pontjához tartozó w_{spv} és w_{won} súlyok függvényében kerül kiszámításra az alábbiak szerint:

$$CFR_{spv,won} = w_{spv}\mu_{spv} + w_{won}\mu_{won}$$

, ahol

- μ_{spv} : az időszak CFR_{spv} átlaga,
- μ_{won} : az időszak CFR_{won} átlaga.

Példaként a Nyugat-Dunántúl NUTS2-es régiója kerül kiválasztásra a 2026–2055 közötti időszakra, az RCP2.6 forgatókönyv alapján. (14. ábra) A szükséges adatok a napelemes erőmű és a szélenergia kapacitásfaktor éves értékeinek idősorából kerül felhasználásra. Mindkét idősor 30 év adatait tartalmazza, azaz két, egyenként 30 elemű idősor áll rendelkezésre. A napelemes erőmű kapacitásfaktor szórása: $\sigma_{spv}=0,003533$, a szélenergia kapacitásfaktor szórása: $\sigma_{won}=0,021118$. A két idősor kovarianciája:

$$\text{cov}(\text{CFR}_{spv}, \text{CFR}_{won})=-1,60277*10^{(-5)}.$$

Amennyiben 30% napelem és 70% szélenergia részesedés kerül figyelembevételre, a súlyok értékei a következők: $w_{spv} = 0,3$ és $w_{won} = 0,7$.

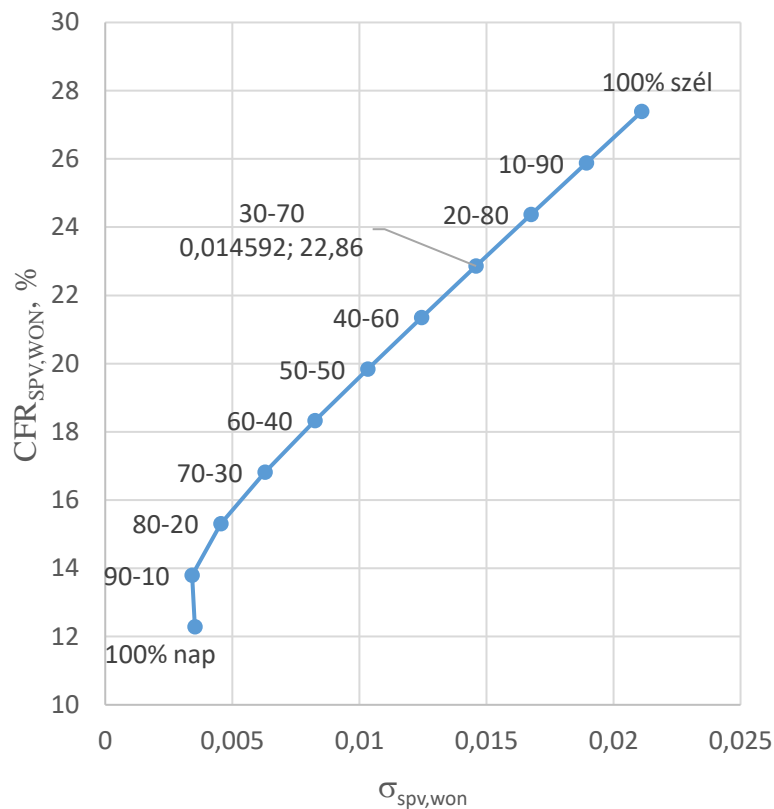
Ebben az esetben az együttes szórásnégyzet, illetve szórás:

$$(\sigma_{spv,won})^2=0,3^2*0,003533^2+0,7*0,021118^2+2*0,3*0,7*(-1,60277*10^{(-5)})=0,000213$$

$$\sigma_{spv,won}=\mathbf{0,014592}$$

Az idősor kapacitásfaktorának a várható értéke: napenergia esetén $\mu_{spv}=0,122867$, szélenergia esetén pedig $\mu_{won}=0,273905$. A nap- és szélenergiás portfólióhoz tartozó kapacitásfaktor – a korábban megadott súlyok ($w_{spv} = 0,3$ és $w_{won} = 0,7$) alapján – százalékban az alábbi:

$$\text{CFR}(\%)= (0,3*0,122867+0,7*0,273905)*100%=\mathbf{22,86\%}$$

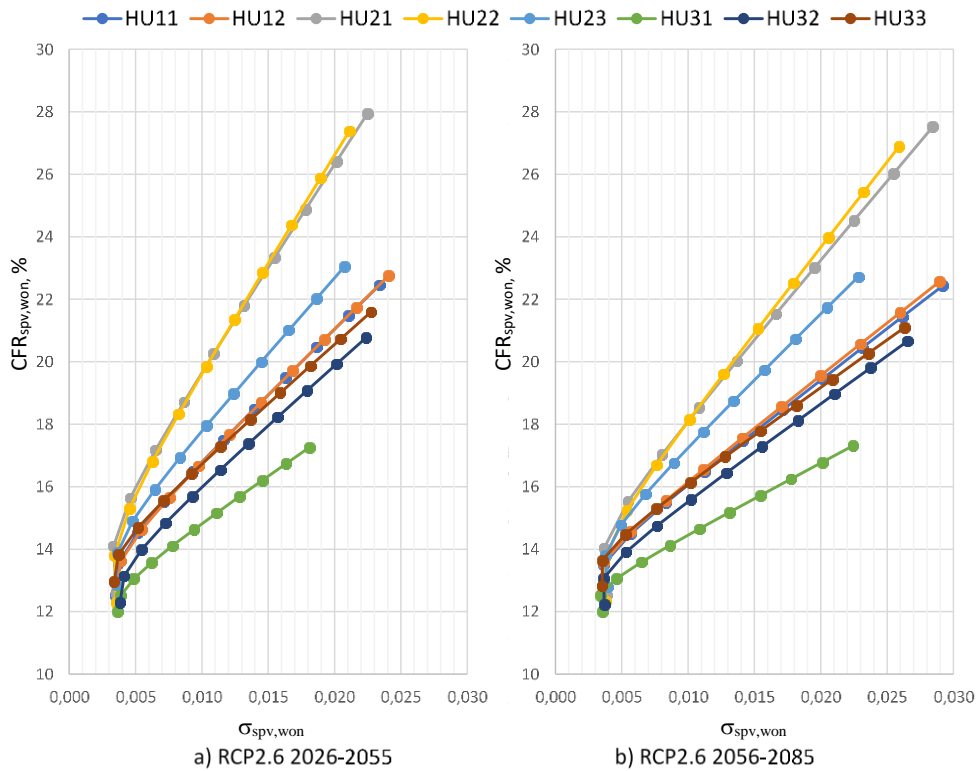


14. ábra Az együttes szórás és együttes kapacitásfaktor alakulása

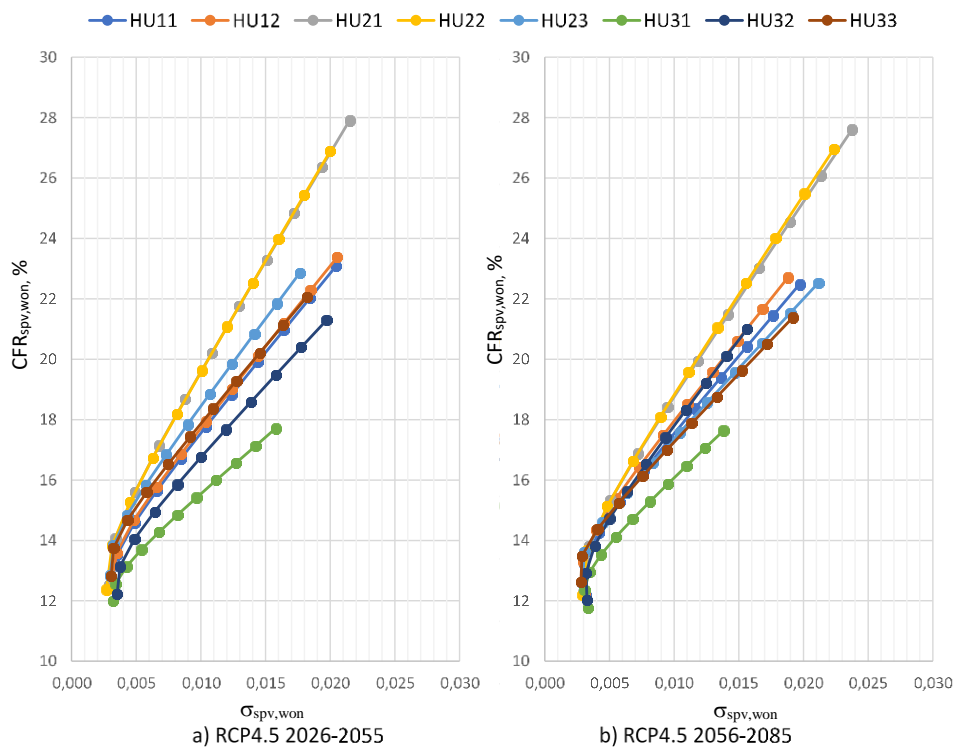
Tízszázalékos felbontás esetén a különböző súlypárokhoz tartozó tizenegy pont került kiszámításra, amelyek a 14. ábrán látható görbét határozzák meg. A számítás nyolc régióra, két időszakra és három forgatókönyvre vonatkozóan került elvégzésre. (6-8. melléklet) Ezek kombinációja összesen 48 darab görbét eredményez, amelyek a 15-17. ábrákon láthatók.

3.3 Kapacitásfaktor-eredmények és klaszteranalízis értékelése

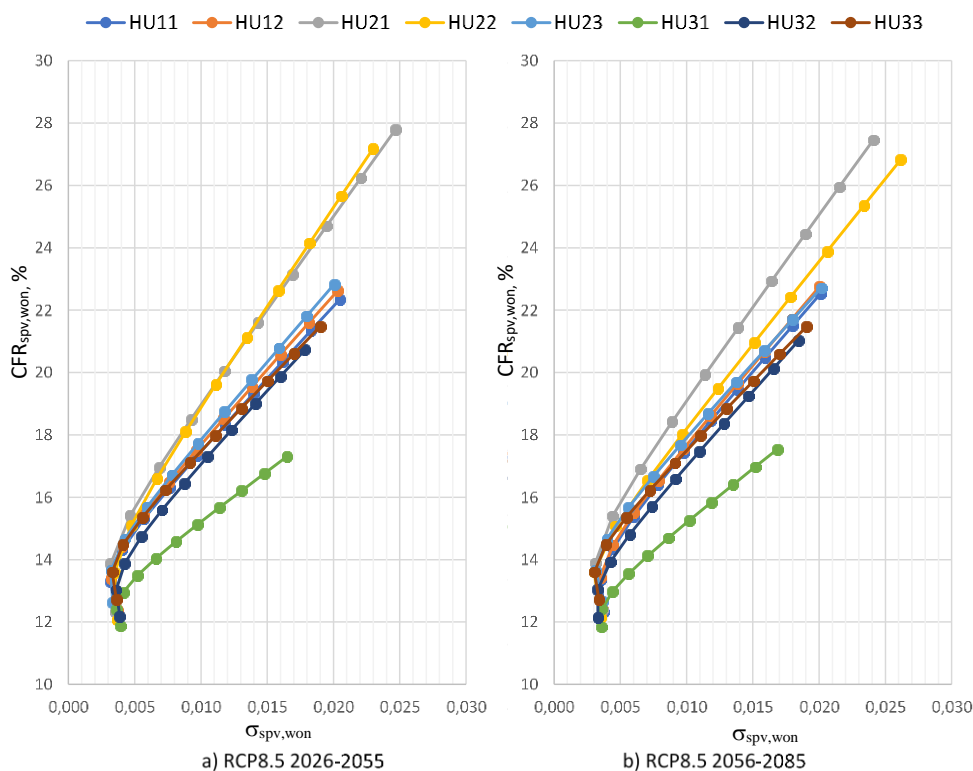
3.3.1 A magyarországi NUTS2 régiók portfólió diagramja



15. ábra Az együttes szórás és a kapacitásfaktor az RCP2.6 forgatókönyv esetén



16. ábra Az együttes szórás és a kapacitásfaktor az RCP4.5 forgatókönyv esetén



17. ábra Az együttes szórás és a kapacitásfaktor az RCP8.5 forgatókönyv esetén

A 18. táblázat alapján megállapítható, hogy a forgatókönyvek eltérő hatással vannak a nap- és szélerőművek kapacitásfaktorára Magyarország régióiban.

18. táblázat A két időszak közötti kapacitásfaktor változása százalékpontban, 100%-os nap- és 100%-os szélerőmű-portfólió esetén

portfólió súly	RCP	HU11	HU12	HU21	HU22	HU23	HU31	HU32	HU33
nap 100%	RCP2.6	-0,014	-0,056	-0,029	0,042	-0,071	0,000	-0,079	-0,148
	RCP4.5	-0,256	-0,248	-0,249	-0,190	-0,226	-0,219	-0,198	-0,212
	RCP8.5	0,025	0,022	0,067	0,070	0,018	-0,023	-0,021	0,000
szél 100%	RCP2.6	-0,033	-0,185	-0,429	-0,498	-0,333	0,045	-0,114	-0,495
	RCP4.5	-0,608	-0,673	-0,292	0,081	-0,315	-0,070	-0,293	-0,673
	RCP8.5	0,169	0,132	-0,322	-0,346	-0,112	0,240	0,298	-0,014

A naperőművek teljesítménye az RCP4.5 esetén általánosan csökken, míg az RCP8.5 forgatókönyv több térségben enyhe javulást mutat. A szélerőművek kapacitásfaktora a mérsékelt forgatókönyvek (RCP2.6 és 4.5) esetén gyakran visszaesik, viszont az RCP8.5 több régióban is teljesítménynövekedést eredményez.

19. táblázat A két időszak közötti kapacitásfaktor szórásának változása, 100%-os nap- és 100%-os szélenergia-portfólió esetén

portfólió súly	RCP	HU11	HU12	HU21	HU22	HU23	HU31	HU32	HU33
nap 100%	RCP2.6	2,28%	-2,19%	8,45%	7,87%	9,77%	-1,78%	-3,65%	3,98%
	RCP4.5	1,97%	-0,21%	3,04%	8,13%	-2,92%	4,76%	-6,98%	-8,73%
	RCP8.5	3,44%	-1,85%	4,09%	-3,82%	9,95%	-8,89%	-14,80%	-6,56%
szél 100%	RCP2.6	24,62%	20,36%	26,45%	22,71%	9,89%	23,87%	18,58%	15,68%
	RCP4.5	-3,66%	-8,40%	10,55%	11,86%	20,08%	-12,40%	-20,64%	5,42%
	RCP8.5	-2,03%	-1,40%	-2,28%	13,83%	0,57%	2,29%	3,47%	0,13%

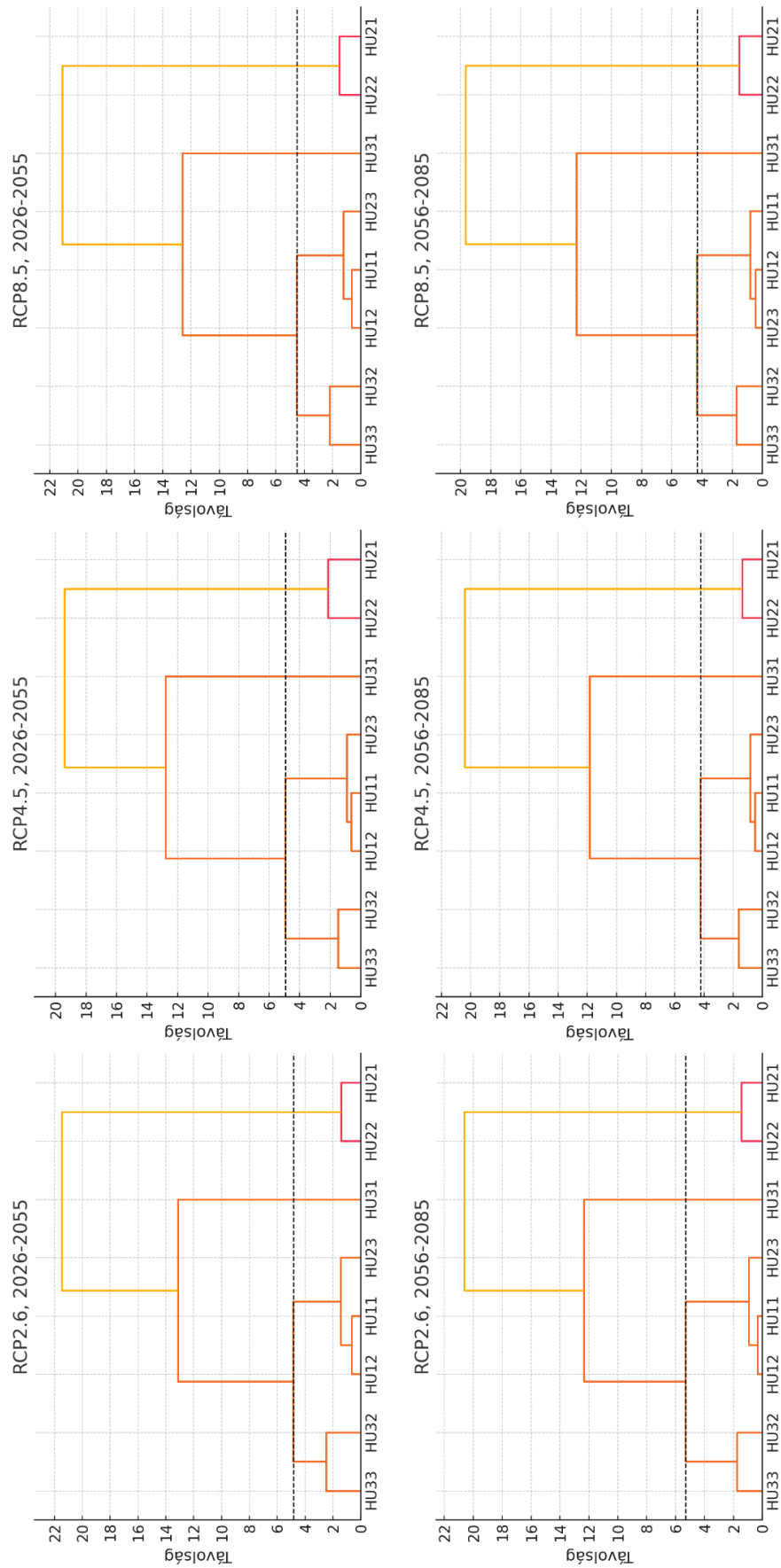
A 19. táblázat alapján elmondható, hogy a szélenergia esetében nagyobb ingadozási kockázat várható, különösen az RCP2.6 forgatókönyv alatt. Ez azt jelenti, hogy a termelés időbeli egyenletessége romolhat, ami kihívást jelenthet az energiarendszer stabilitása szempontjából. A napenergia esetében a szórásváltozás erősen régiófüggő, de jellemzően kevésbé szélsőséges, mint a szélenergia esetén. Néhány térségben a változékonyság csökken, ami előnyös lehet a jövőbeni energiatervezésnél.

3.3.2 Klaszterek azonosítása hierarchikus módszerrel

A magyarországi NUTS2 régiók klaszterezése a nap–szél portfóliókra jellemző kapacitásfaktor és termelési szórás alapján történt, három RCP forgatókönyv és két időszak figyelembevételével. A hierarchikus klaszteranalízis célja az volt, hogy azonosítsa az egymáshoz hasonló termelési karakterisztikájú régiócsoportokat. (20. táblázat) Az eredményeket dendrogram formájában jelenítettük meg, amelyek jól szemléltetik a régiók közötti strukturális hasonlóságokat. (18. ábra) Az elemzés során három klaszter azonosítására került sor, melyeket szaggatott vonal jelez a fa metszésénél.

20. táblázat A magyarországi NUTS2 régiók hierarchikus klaszterbesorolása

	2026-2055			2056-2085		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
HU11	2	2	2	2	2	2
HU12	2	2	2	2	2	2
HU21	1	1	1	1	1	1
HU22	1	1	1	1	1	1
HU23	2	2	2	2	2	2
HU31	3	3	3	3	3	3
HU32	2	2	2	2	2	2
HU33	2	2	2	2	2	2

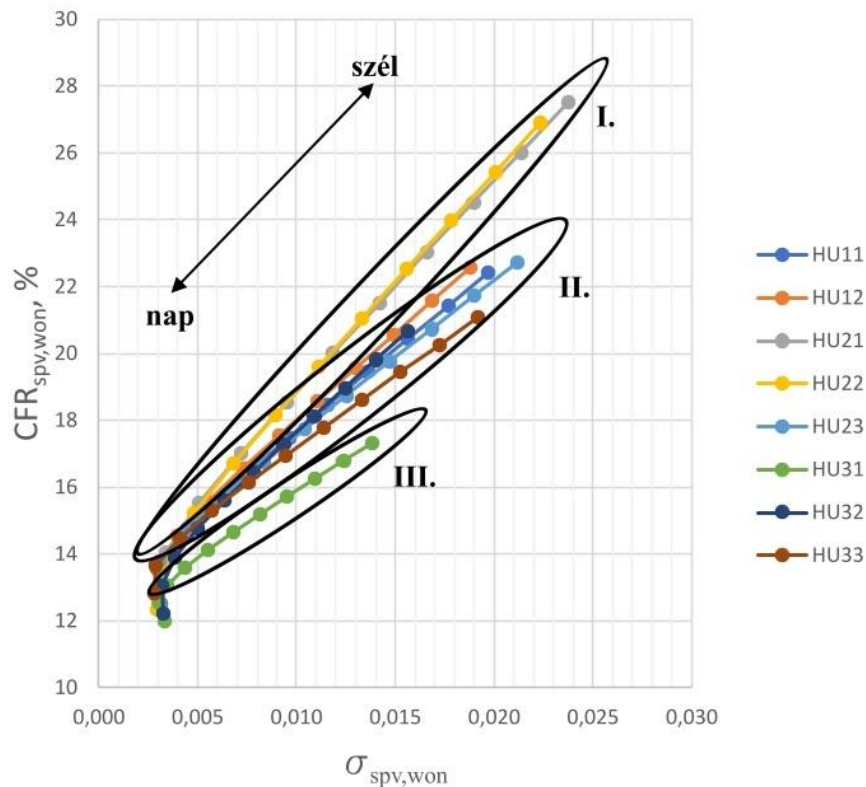


18. ábra Magyarországi NUTS2 régiók dendrogramjai kapacitásfaktor és szórás alapján

3.4 Területi különbségek következtetési az energiarendszer adaptációjára

A 15–17. ábrákon látható NUTS2-es régiók három klaszterbe (20. táblázat) sorolhatók jól elkülöníthető módon:

- **1. klaszter:** Közép-Dunántúl (HU21), Nyugat-Dunántúl (HU22);
- **2. klaszter:** Budapest (HU11), Pest (HU12), Dél-Dunántúl (HU23), Észak-Alföld (HU32), Dél-Alföld (HU33);
- **3. klaszter:** Észak-Magyarország (HU31). (18-19. ábra)



19. ábra A régiók három fő csoportja

Ami első ránézésre is jól látható, hogy minden egyes portfóliógörbén a nagy súlyarányú szereplő naperőművek alacsony kapacitásfaktorról és kis szórásról rendelkeznek, ami a görbék bal alsó tartományában jelenik meg. Ezzel szemben a nagy súlyarányú szereplő szélerőművek magas kapacitásfaktorról és nagy szórásról bírnak, ami a görbék jobb felső tartományát jellemzi.

A 15–17. ábrák jól szemléltetik, hogy mindhárom forgatókönyv esetén a napelemes erőművek CFR- és szórásértékei viszonylag szűk tartományba esnek. A szélerőművek esetében azonban három jól elkülöníthető klaszter jelenik meg, a CFR és a szórás alapján.

Az első klaszterbe a magas kapacitásfaktossal és nagy szórással rendelkező régiók tartoznak, a második klaszterbe a közepes kapacitásfaktossal és szórással rendelkező területek, míg a harmadik klaszterbe az alacsony kapacitásfaktort és kis szórást mutató régiók sorolhatók. (19. ábra) A 18–19. táblázatokban bemutatásra kerülnek az egyes portfóliógörbék két szélső pontjának – vagyis a 100%-os naperőmű- és 100%-os szélerőmű-portfólióknak – a két vizsgált időszak közötti változásai. A 18. táblázat a kapacitásfaktor százalékpontos változását, míg a 19. táblázat a kapacitásfaktor szórásának százalékos változását tartalmazza, forgatókönyvenként és régiókra lebontva.

A kapacitásfaktor alakulását vizsgálva mind a naperőművek, mind a szélerőművek esetében csökkenés figyelhető meg az RCP4.5-ös forgatókönyv esetén. Hasonló, de ennél mérsékeltebb csökkenés tapasztalható a szélerőművek kapacitásfaktor értékeiben az RCP2.6-os forgatókönyv mellett. Csökkenés jelentkezik továbbá az Észak- és Nyugat-Dunántúl régiókban az RCP8.5-ös forgatókönyv esetén is. Ezzel szemben enyhe emelkedés figyelhető meg az Észak-Magyarország és az Észak-Alföld térségek szélerőműveinek kapacitásfaktor értékeiben, szintén az RCP8.5-ös forgatókönyv alapján.

A kapacitásfaktor szórását tekintve a szélerőművek pozitív irányú elmozdulást mutatnak az RCP2.6-os forgatókönyv szerint. Az RCP4.5-ös forgatókönyv esetén regionális különbségek rajzolódnak ki: míg a nyugati országrészben a kapacitásfaktor szórás emelkedést mutat, addig a keleti régiókban csökkenés figyelhető meg.

Az eredmények ugyan nem elegendők közvetlen, konkrét beruházási vagy technikai tervezéshez, azonban hasznos kiindulópontként szolgálhatnak a jövőbeni optimális arányok meghatározásához. A számítások révén feltárhatók a földrajzi mintázatok és az időbeli trendek, amelyek megalapozhatják a hosszú távú energetikai stratégiák kidolgozását. A bemutatott módszer továbbfejlesztése indokolt más megújuló energiaforrások – például biomassza és geotermikus energia – bevonásával. A vizsgálat nemcsak a villamosenergia-termelésre terjeszthető ki, hanem a hőtermelési és közlekedési szektorokra is. Mindezekén túl, a nem megújuló, de egy ideig még elkerülhetetlenül jelen lévő fosszilis energiahordozók is bevonhatók a jövőbeni vizsgálatokba.

Fontos megjegyezni, hogy Magyarország jelentős részén a nap- és szélenergia potenciálja kedvezőbb, mint például Németország számos területén, ahol már több kisváros önálló módon működik ezen források kombinációjára építve. A szélerőművek telepítésének

újraelőengedélyezése és fejlesztése jelentős lépést jelenthetne a napelemes rendszerek időjárásfüggő termelésének kiegyenlítésében. Minden 1000 MW napelem mellé indokoltnak tekinthető legalább 500 MW szélenergia-kapacitás telepítése. Ez nemcsak az energiarendszer szabályozási költségeinek csökkentését segítené elő, hanem hozzájárulna a megújuló energia részarányának növeléséhez is, támogatva ezzel a 2050-re kitűzött nettó nulla kibocsátású (NZE) klímacélok elérését [90].

Az RCP scenáriók mentén végzett szimulációk azt mutatják, hogy a megújuló kapacitásfaktora és termelési biztonsága hosszú távon érzékenyen reagál az éghajlati változásokra. A következő fejezet a napsugárzás és hőmérsékletváltozás régiós elemzésén keresztül részletesen vizsgálja, hogyan hat ez a napelemes rendszerek tényleges termelési potenciáljára.

4 A klímaváltozás hatása a napelemes energiatermelés jövőbeli potenciáljára

Az előző fejezetben feltárt klímaforgatókönyv-érzékenységek alapján indokoltá vált a napelemes energiatermelésre gyakorolt közvetlen hatások mélyebb vizsgálata. A következő elemzés célja a hőmérséklet és sugárzási viszonyok régiós különbségeinek feltérképezése, és azok hatása a technológiai teljesítmény hosszú távú alakulására

4.1 A kutatás szakirodalmi háttere és koncepcionális áttekintése

. A magyarországi napenergia-termelés az utóbbi időszakban folyamatosan növekedett. A népszerűségének köszönhetően a jövőben is további bővülés várható. Ezekkel a beruházásokkal és a velük járó hálózati fejlesztésekkel járul hozzá az energiaátmenethez. Az átmenet, valamint a megújuló energiaforrások használatának ösztönzése érdekében a napelemes erőművek telepítése és az ehhez kapcsolódó beruházások többféle módon kerülnek támogatásra a Magyar Kormány által [91], [92].

Magyarország éghajlata jellemzően kontinentális, amely forró, száraz nyarakkal és enyhe, havas telekkel jár együtt. Az utóbbi időben a tél és a nyár közötti tavaszi, illetve a nyár és a tél közötti őszi időszakok egyre rövidebbé váltak. Az évi átlaghőmérséklet $9,7\text{ °C}$. A nyári átlaghőmérséklet $23\text{ és }28\text{ °C}$ között alakul, de előfordulhat napközben 35 °C feletti hőmérséklet is – ez egyre gyakoribbá válik. A téli átlaghőmérséklet $-3\text{ és }-7\text{ °C}$ között van, a hidegebb napokon ez akár -10 °C alá is süllyedhet a hőmérséklet [93].

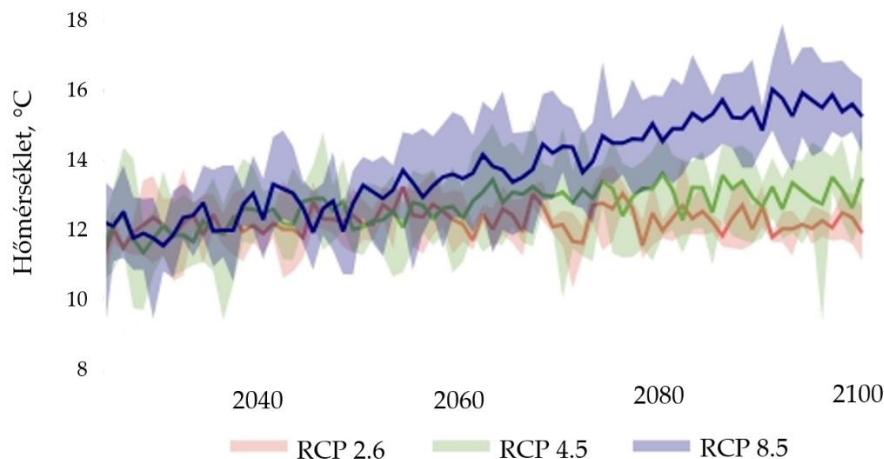
A fő európai éghajlati rendszerek közelsége miatt a régió érzékeny az éghajlattal összefüggő hatásokra. Északról a sarki hideg, nyugatról az óceáni- és nedves kontinentális éghajlat, délről a mediterrán éghajlat és keletről a száraz kontinentális éghajlat van befolyásoló hatással [94].

Jellemzően a forróbb nyarak és az enyhébb telek is egyre gyakoribbá válnak, ami jelentős változásokat idéz elő az ökoszisztémában. Egyre többször fordulnak elő kánikulák és aszályos időszakok, amelyek komoly kihívásokat jelentenek a megújuló energiaforrások számára. Az átlaghőmérséklet-emelkedés rontja a napelemes rendszerek hatékonyságát, miközben az extrém hőhullámok is gyakoribbá válnak. Ezek fokozott környezeti kitérttséget jelentenek a napelemes rendszerek számára, ami csökkenti az eszközök

élettartamát. A hőmérséklet emelkedése mellett a csapadék szezonális eloszlása is megváltozik. További jelentős időjárási szélsőségek, amelyek kihatnak az energiaágazatra: a szélviharok növekvő gyakorisága és a heves esőzések megjelenése [95], [96], [97].

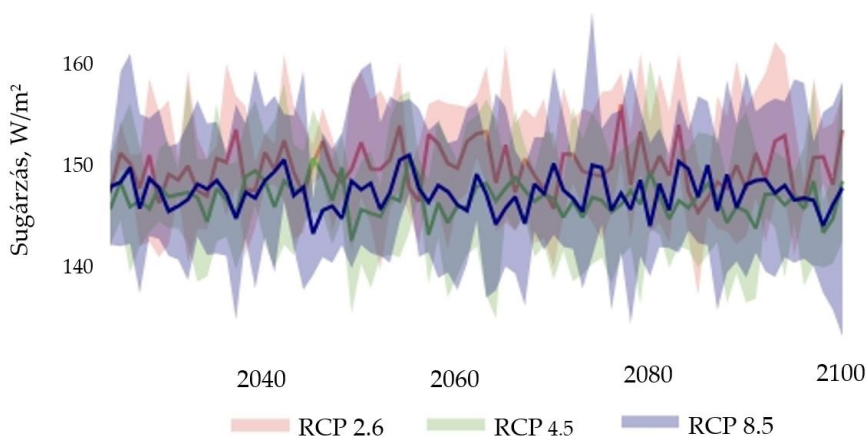
Ezért a jövő szempontjából kiemelten fontos az alternatív energiatermelés, különösen a megújuló energiaforrások hatékony kiaknázása. Ezen belül a napelemes villamosenergia-termelés kulcsszerepet játszhat. A megújuló energiaforrások hasznosítása nemcsak a környezeti fenntarthatóság előmozdítását szolgálja, hanem jelentős gazdasági előnyöket is kínál. A napelemes energiatermelés így a jövő egyik meghatározó megoldásává válhat. A napelemes rendszerek alkalmazása számos előnnyel járhat a klímaváltozásra adott válasz részeként. Főképpen a vidéki térségekben megvalósuló, közepes méretű napelemes rendszerek gyakorolnak kedvezőbb hatást a környezetre más energiarendszerekhez – beleértve más megújulókat is – képest. Emellett ez azon kevés megújuló energiaforrások egyike, amely kis- és közepes léptékben akár településeken belül is könnyen telepíthető [98].

A napelemes villamosenergia-termelés szempontjából az egyik legfontosabb tényező a hőmérséklet alakulása. A már korábban említett hőmérséklet-emelkedés kedvezőtlen hatással van a napelemes rendszerek hatásfokára. Az alacsonyabb hatásfok értelemszerűen kevesebb megtermelt villamosenergia-mennyiséget eredményez. A 20. ábrán a Magyarországra készített Copernicus klíma-előrejelzési adatbázis éves középhőmérsékletének eredményei kerültek bemutatásra. A grafikon alapján az RCP2.6, RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek által előrevetített éves középhőmérséklet-emelkedés került szemléltetésre az évszázad végéig.



20. ábra Az RCP forgatókönyvek szerint éves középhőmérséklet alakulása 2100-ig
 Forrás: szerkesztés [99] alapján

A klímaváltozás egy másik, a napelemes energia-termelés szempontjából fontos tényezője a napsugárzás mennyisége. Ez nem azt jelenti, hogy a Nap sugárzása változik meg, hanem azt, hogy a klímaváltozás hatására módosulhat a napsütéses órák száma, illetve a légkör áttetszősége. A 21. ábrán a Magyarországra készített Copernicus klíma-előrejelzési adatbázis sugárzási eredményei kerültek bemutatásra. A grafikonon az is bemutatásra kerül, hogy az RCP4.5 és az RCP8.5 forgatókönyvek közel azonos éves átlagos besugárzási értéket adnak 2100-ig. Ezzel szemben az RCP2.6 forgatókönyv esetén a sugárzás némileg magasabb éves átlagos értéket mutat az évszázad végéig az előző forgatókönyvekhez képest.



21. ábra Az RCP forgatókönyvek szerint napsugárzás alakulása 2100-ig
 Forrás: szerkesztés [99] alapján

4.2 Alkalmazott módszertan, modellezési eszközök és szimulációs feltételek

4.2.1 A napelemek energiatermelésének elméleti alapjai és számítási keretei

Ahhoz, hogy egy napelemes rendszer energiatermelése meghatározható legyen, először meg kell érteni a napsugárzás különböző összetevőit. A DNI, DHI és GHI rövidítések a napenergia-elemzések során általánosan használt fogalmak. Mindegyik egy-egy konkrét értéket jelöl, amely a Föld felszínét érő napenergia mennyiségére vonatkozik [100].

A közvetlen normál besugárzás (DNI: Direct Normal Irradiance) a Nap irányából érkező napsugárzásra utal, amely nem szóródik vagy légköri akadály (például felhő) által nem nyelődik el. Tehát azt a napenergia-mennyiséget jelenti, amely közvetlenül, akadálytalanul éri el a Föld felszínét. A DNI-t általában watt per négyzetméterben (W/m^2) mérik, és különösen fontos a közvetlen napfényt hasznosító szoláris technológiák – például a koncentrált napenergia-rendszerek (CSP) vagy a napkövető technológiák – esetében. A DNI-értékek jellemzően magasabbak tiszta légkörű, felhőmentes napokon.

A diffúz vízszintes besugárzás (DHI: Diffuse Horizontal Irradiance) azt a napsugárzás-mennyiséget jelenti, amely a légkör általi szóródás és diffúzió után éri el a Föld felszínét. Ez annak köszönhető, hogy a napfény a légkör molekuláin, aeroszolokon, felhőkön és más légköri összetevőkön szóródik. A DHI-t watt per négyzetméterben (W/m^2) mérik. A DHI különösen fontos olyan napenergia-technológiák esetében, amelyek a közvetlen és a szórt napfényt egyaránt képesek hasznosítani – ilyenek például a napelemes (PV) rendszerek vagy a hőtermelésre használt napkollektorok.

A teljes vízszintes felületet érő napsugárzás (GHI: Global Horizontal Irradiance) azt a teljes napenergia-mennyiséget jelenti, amely a közvetlen és a diffúz összetevőket egyaránt tartalmazza. Ez az érték a közvetlen normál besugárzás (DNI), a Nap horizont feletti szögállása, valamint a diffúz horizontális besugárzás függvénye. A teljes vízszintes besugárzást általában watt per négyzetméterben (W/m^2) mérik, és átfogó képet ad az adott helyen rendelkezésre álló teljes napenergia mennyiségéről. A teljes vízszintes besugárzás értékét gyakran alkalmazzák a napenergia-erőforrások felmérésében, a napelemek várható teljesítményének becslésében, valamint a napenergia-rendszerek tervezésénél.

Összefoglalva, a DNI a szóródásmentes, közvetlen napsugárzást, a DHI a légköri szóródást követően érkező diffúz napsugárzást, míg a GHI a vízszintes felületet érő teljes napsugárzást jelenti. Ezek a paraméterek segítik a kutatókat, mérnököket és

napenergiával foglalkozó szakembereket a napsugárzás jellemzőinek és eloszlásának pontos meghatározásában egy adott helyszínen, ezáltal lehetővé téve a napenergia-rendszerek hatékony elemzését és tervezését. A GHI a legfontosabb paraméter a fotovoltaikus rendszerek villamosenergia-hozamának meghatározásához. Fontos megjegyezni, hogy mind a DHI, mind a DNI a GHI összetevői, és matematikailag a következő összefüggés írja le őket:

$$GHI = DNI \cdot \cos(\varphi) + DHI$$

, ahol

- GHI: teljes vízszintes besugárzás,
- DNI: közvetlen normál besugárzás,
- DHI: szórt vízszintes besugárzás,
- φ : szoláris zenitszög.

Használatos még a ferde felületet érő besugárzási érték is (GTI: Global Tilted Irradiance). Ez – ellentétben a talajjal párhuzamos vízszintes felületre vonatkozó besugárzással – figyelembe veszi, hogy a megdőntött felület is kap bizonyos mennyiségű, a talajról visszaverődő napsugárzást (REF). A GTI egy hozzávetőleges érték, amelyet a fixen telepített PV panelek várható energiahozamának becslésére szolgál. Az optimális szög pedig azt a dőlésszöget jelöli, amelybe a napelemeket érdemes beállítani a maximális éves villamosenergia-termelés elérése érdekében [101].

4.2.2 Villamos áramkörre épülő fizikai modell és matematikai leírás

A napsütés során a napelemcellákat elérő fotonok vagy visszaverődnek, vagy áthatolnak, vagy elnyelődnek a cellában. Azok a fotonok, amelyek elnyelődnek, energiát adnak át a félvezető réteg elektronjainak – ezt nevezzük fotovoltaikus jelenségnek. Ez a kölcsönhatás elektronáramlást indít meg, ha a kivezetéseket áramkörhöz csatlakoztatjuk [102]. A SAM szimuláció az egydiódás Perez–Ineichen-modellt alkalmazza. Emellett gyakori még a Hay-modell alkalmazása is, főképp akkor, ha a diffúz besugárzási adatok nem állnak pontosan rendelkezésre [103].

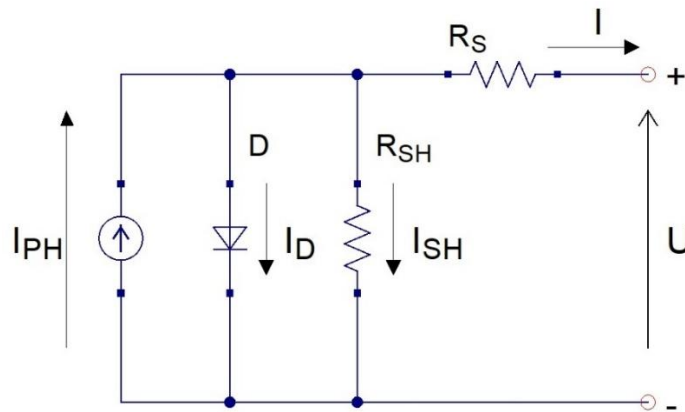
A napelem pillanatnyi teljesítményének egyenlete:

$$P(t) = U(t) \cdot I(t)$$

Az egydiódás napelem modell áramának egyenlete:

$$I = I_{PH} - I_D - I_{SH}$$

, ahol I a modul áram, I_{PH} a fotoáram, I_D a diódaáram és I_{SH} a párhuzamos ellenálláson folyó áram. (22. ábra)



22. ábra Egydiódás napelem modell

$$I_{PH} = \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \cdot \left(I_{PHref} + m u_{ISC} \cdot (T_C - T_{Cref}) \right)$$

, ahol G és G_{ref} az effektív, illetve a referencia sugárzást jelentik, míg a T_C és a T_{Cref} az effektív, illetve a referencia cellahőmérsékletet jelentik. A $m u_{ISC}$ a rövidzárási áram hőmérsékleti együtthatója. A G értékét a Meteorolog norm időjárás adatbázisból származó teljes horizontális sugárzás (G_h) és diffúz horizontális sugárzás (D_h) adatai alapján a SAM program számítja ki a telepítési paraméterek, a dátum és az idő figyelembevételével.

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{q \cdot (U + I \cdot R_S)}{N_{cs} \cdot \text{Gamma} \cdot k \cdot T_C}} - 1 \right)$$

, ahol I_0 a dióda rövidzárási árama, q az elektron töltése, N_{CS} a cellák száma, Γ a dióda minőségi tényezője (1 és 2 közé eső érték), k a Boltzmann állandó.

$$I_0 = I_{0ref} \cdot \left(\frac{T_C}{T_{Cref}} \right)^3 \cdot e^{\left(\frac{q \cdot E_{Gap}}{\Gamma \cdot k} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_{Cref}} - \frac{1}{T_C} \right)}$$

, ahol I_{0ref} a dióda rövidzárási referencia árama, E_{Gap} a tiltott sáv (gap) energiája (ha a foton energiája meghaladja a tiltott sáv szélességét, akkor az elektront a vegyértéksávból a vezetési sávba tudja gerjeszteni). Ez az érték Si-kristály esetén $\sim 1,12$ eV.

$$I_{SH} = \frac{U + I \cdot R_S}{R_{SH}}$$

, ahol R_S a soros, R_{SH} a párhuzamos (sönt) ellenállás értéke.

A T_C értékének meghatározása:

$$T_c = T_a + G \frac{\alpha(1 - \eta_{a_m})}{H_0 + H_1 \cdot WS}$$

, ahol η_{a_m} a napelem modul hatékonysága (0...1), α a modul abszorpciós együtthatója (ez SAM programban alapértelmezettként: 0,9), H_0 a hőátadó komponens, H_1 a konvektív hőátadó komponens, WS a szél sebessége.

A G értékét, a levegő hőmérsékletét (T_a) és szél adatokat (WS) a Meteonorm időjárási adatbázis szolgáltatja a SAM program számára. A napelem referencia értékei az STC alapján vannak megadva. Az STC egy nemzetközileg elfogadott referenciafeltétel, amely mellett a gyártók megadják a napelemek működési paramétereit..

A napelem modul árama számos tényezőtől függ, A tényezők egy része nem lineáris tagként szerepelnek az egyenletekben. Ezt tovább nehezíti, hogy az áram-feszültség értékpárok hőmérséklettől függő görbesereget alkotnak, ráadásul ezek nem egy egyenesre eső eltolás transzformáció eredményei [104].

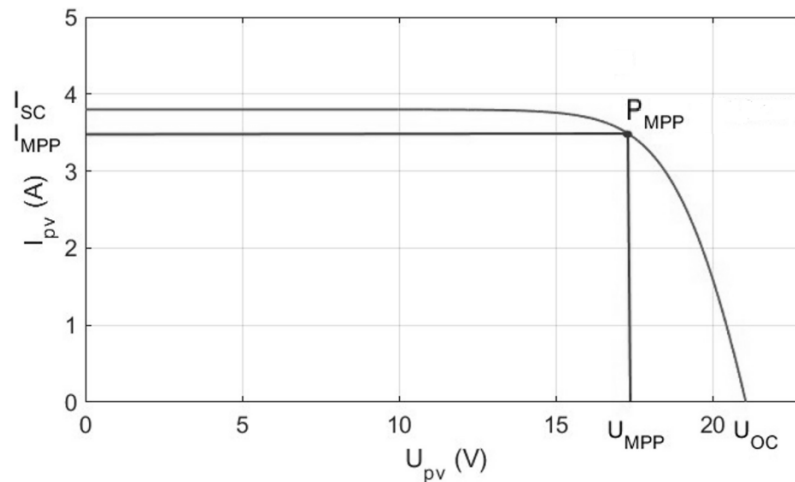
Egy modulban számos cellát sorosan és párhuzamosan kapcsolnak össze. A cellák soros kapcsolása növeli a feszültséget, míg a párhuzamos kapcsolás növeli az áramerősséget, így:

$$I = N_p I_{Cell}$$

$$U = N_s U_{Cell}$$

A napelem karakterisztikáját leíró nemlineáris U–I egyenlet analitikus (zárt alakban történő) megoldása nem lehetséges, ezért a teljesítménypontok meghatározása numerikus, iteratív módszerekkel történik. A 23. ábra egy tipikus feszültség-áram görbén elhelyezkedő teljesítmény maximum pontját mutatja.

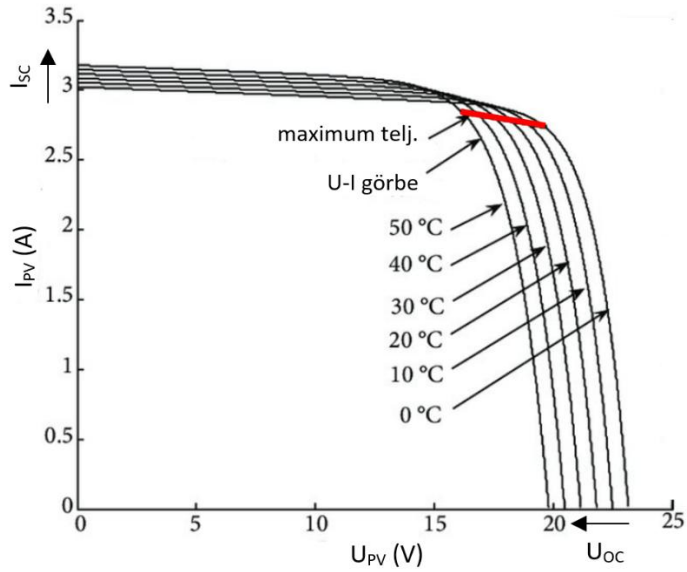
$$P_{max} = P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP}$$



23. ábra Az U-I görbe

A görbe különösen érzékenyen reagál a következő változók módosulására:

- átalakítási hatékonyság, (eltolás nagyobb áramerősségre),
- magasabb hőmérséklet alacsonyabb üresjárási feszültséget és nagyobb rövidzárási áramot okoz, azaz MPP alacsonyabb teljesítményre való eltolódását okozza, (27. ábra)
- fordított telítési áramnál a nagyobb szivárgási áram laposabb görbét eredményez, (24. ábra)
- soros ellenállás növekedése nagyobb veszteséget, illetve kisebb feszültséget eredményez. [105], [106]

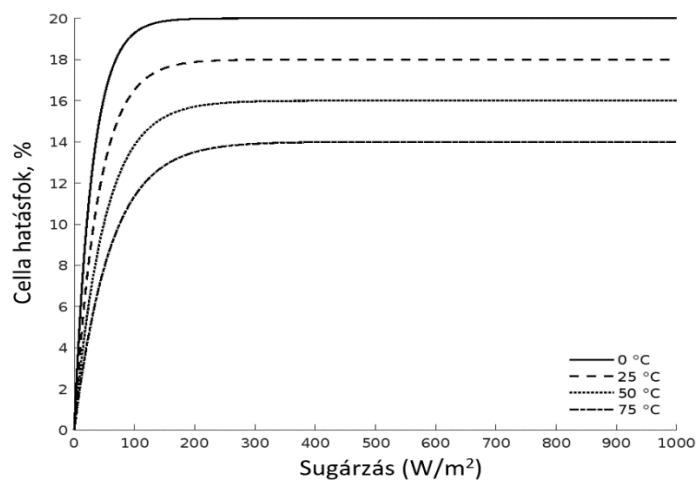


24. ábra Feszültség-áram görbe

Forrás: szerkesztés [107] alapján

4.2.3 A modulok hőmérsékletfüggő hatékonyságváltozása

A 25. ábra a relatív hatékonyságot mutatja a bejövő fény intenzitásának függvényében különböző hőmérsékleteken. Ezeket standard (STC) vizsgálati feltételek mellett ábrázolja, azaz 25 °C-on és 1000 W/m²-en. Látható, hogy az átalakítási hatásfok szinte állandó a teljes tartományban, a meredek csökkenés csak 100 W/m² alatt jelentkezik. A hidegben a görbe felfelé, melegben lefelé tolódik el a modul hőmérsékletváltozása következtében [106].

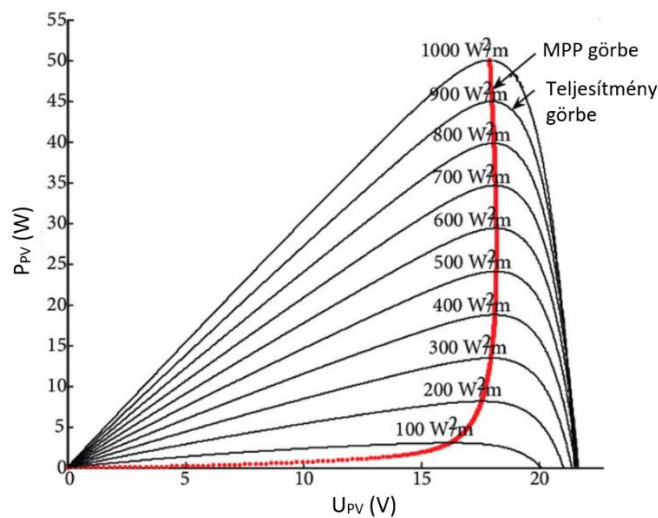


25. ábra A sugárzás és a cella hatásfok kapcsolata a hőmérséklet függvényében

Forrás: szerkesztés [106], [108] alapján

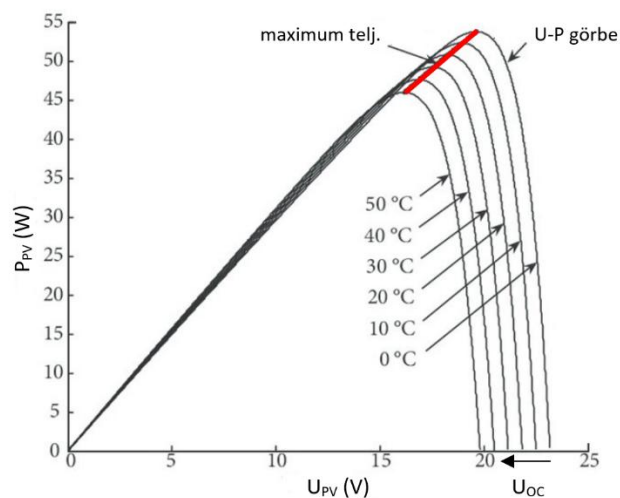
4.2.4 A teljesítménymaximum követés (MPPT) technikai megközelítése

A nap folyamán változó intenzitású fény és hőmérséklet hatására a maximális teljesítménypont változik, ezekhez a pontokhoz különböző feszültség- és áram érték tartozik (26-27. ábra). Abban az esetben, ha a feszültséget állandóra értékre kényszerítik, akkor a napelemes modul nagy valószínűséggel nem működik az optimális teljesítményen. A gyakorlatban az optimális működés érdekében egy Maximum Power Point Tracker (MPPT) modult építettek be az áramkörbe [106].



26. ábra A munkapont követés azonos hőmérsékleten, különböző sugárzás mellett

Forrás: szerkesztés [107] alapján



27. ábra A munkapont követés azonos sugárzáson, különböző hőmérséklet mellett

Forrás: szerkesztés [107] alapján

4.2.5 Az éves szinten várható villamosenergia-termelés számítása

A naperőművek éves teljesítményszámítása lehetővé teszi a kivitelezők, az üzemeltetők és a tulajdonosok számára, hogy reális képet kapjanak létesítményeik hatékonyságáról és azok jövedelmezőségéről. A szimulációk előrejelzést nyújtanak a naperőmű energiatermelésére és hatásfokára egy meghatározott időszakra. Az éves teljesítményelemzéssel azonosíthatók a fejlesztésre szoruló területek, és optimalizálható a rendszer teljesítménye.

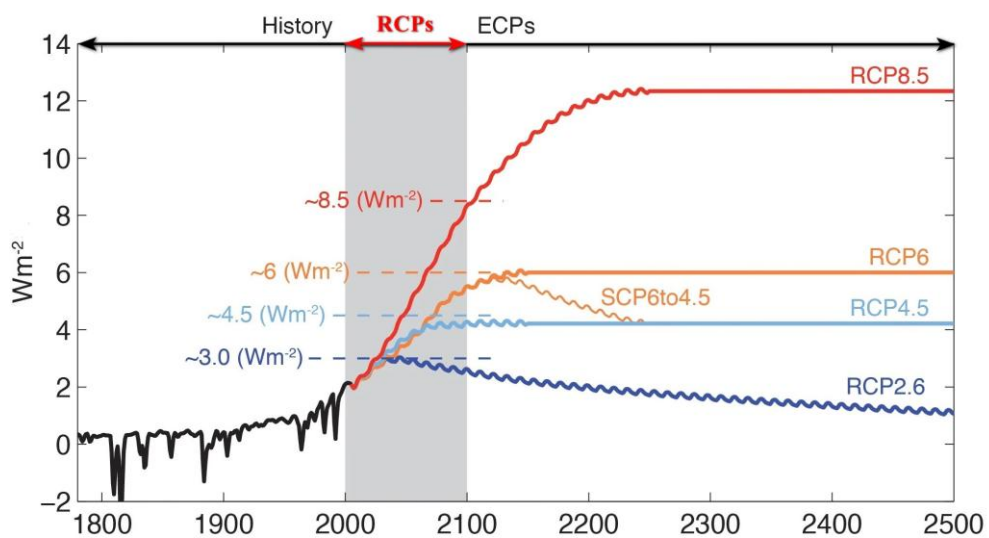
Az éves teljesítmény sokban függ a napsugárzás mennyiségétől, a hőmérséklettől és az időjárás egyéb paramétereitől is. Ezek az adatok a helyszíni meteorológiai állomásokról vagy nemzetközi meteorológiai és kutatóintézeti adatbázisokból szerezhetők be. Ezenkívül fontos a naperőműre jellemző adatok pontos ismerete: a napelemek, az inverterek és egyéb alkatrészek típusa és mérete. Tudni kell minden olyan árnyékolásról vagy akadályról, amely befolyásolhatja a teljesítményt. Jelentős segítséget nyújtanak a kalkulációkhoz a napelemes szoftverek és a matematikai modellek alkalmazása.

Az adatok kilowattórában (kWh) állnak rendelkezésre, és a rendszer által egy adott időszakban megtermelt villamosenergia mennyiségét jelentik, általában órás, napi vagy havi bontás szerint. Az egész éves energiatermelést összegezve meghatározható a naperőmű éves energiahozama. A naperőmű éves energiahozamának ismeretében meghatározható többek között a teljesítményarány (PR) vagy a kapacitásfaktor (CFR). A teljesítményarányt úgy számítjuk ki, hogy a tényleges energiatermelést elosztjuk az elméleti maximális energiatermeléssel, míg a kapacitásfaktor a tényleges energiatermelés és a rendszer maximális energiatermelési potenciáljának arányát jelenti [109].

Az energiatermelésen kívül más tényezőket is figyelembe kell venni, amelyek befolyásolják a naperőmű teljesítményét. Ilyen tényezők a rendszer karbantartási vagy hálózati problémák miatti leállásai, a napelemek felületén felhalmozódó szennyeződés, valamint a rendszerelemek idővel történő elhasználódása (degradáció). Ezek figyelembevételével a teljesítményszámítások pontosabb képet adnak a napelemes rendszer tényleges üzeméről. Az éves teljesítményszámítások betekintést nyújtanak a konkrét problémákba és anomáliákba. Az energiatermelés hozamanalízisével azonosíthatók egyes minták vagy eltérések, amelyek alapján célzott intézkedéseket lehet hozni. Ezek a számítások elősegítik a naperőművek hatékony üzemeltetését és karbantartását, ezáltal biztosítva hosszú távú üzemképességüket és hozzájárulva a fenntartható energiatermeléshez [110].

4.2.6 Az éghajlati forgatókönyvek (RCP2.6, 4.5 és 8.5) bemutatása

A harmadik kutatási témában már említett RCP forgatókönyvek az üvegházhatású gázkoncentrációk különböző alakulását leíró forgatókönyvek, amelyeket éghajlati modellekben alkalmaznak a lehetséges jövőbeli éghajlati eredmények előrejelzésére. Ezek a forgatókönyvek a jövőbeli kibocsátások különböző jövőbeli alakulásait és azok éghajlatváltozásra gyakorolt hatásait írják le. Az alacsony kibocsátással járó RCP2.6-tól a magas kibocsátású forgatókönyvet jelentő RCP8.5-ig terjednek. Az egyéb RCP forgatókönyvek, mint például az RCP4.5 és az RCP6.0, köztes kibocsátási útvonalakat képviselnek [111]. (28. ábra)



28. ábra A sugárzási pályák RCP forgatókönyvei

Forrás: szerkesztés [111] alapján

Az RCP2.6 reprezentatív koncentrációs útvonal feltételezi, hogy a szén-dioxid-kibocsátás 2100-ra eléri a nullát, ez 2100-ra $2,6 \text{ W/m}^2$ sugárzási kényszert eredményez. E forgatókönyv alapján 2100-ra a globális felmelegedés 2 °C alatt marad [112].

Az RCP4.5 reprezentatív koncentrációs útvonal szerint a szén-dioxid-kibocsátás körülbelül 2045-re csökkenni kezd, és 2100-ra körülbelül a 2050-es szint felére csökken. Ez 2100-ra $4,5 \text{ W/m}^2$ sugárzási kényszert eredményez. Az RCP4.5 esetén várhatóan a globális hőmérséklet-emelkedés 2 °C és 3 °C között alakul [113], [114], [115].

Az RCP6.0 reprezentatív koncentrációs útvonal feltételezi, hogy a globális kibocsátás 2080 körül tetőzik, majd csökkenni kezd, ami $6,0 \text{ W/m}^2$ sugárzási kényszert, és 2100-ra körülbelül $3\text{--}4 \text{ °C}$ -os globális hőmérséklet-emelkedést eredményez [116].

Az RCP8.5 reprezentatív koncentrációs útvonal szerint a globális kibocsátások a 21. század során tovább növekednek, ami 2100-ra a globális átlaghőmérséklet közel 4 °C-os emelkedését eredményezi [117].

4.2.7 Meteorológiai adatforrások és adatelőkészítés

A Meteororm szolgáltatóról is volt már szó a második kutatási témában, ami egy átfogó meteorológiai adatbázis és szoftvercsomag. A programban a felhasználók igényeiknek megfelelően testre szabhatják a komponenseket, formátumokat és egységeket. A felhasználóbarát felület pedig leegyszerűsíti az éghajlati adatok kezelésének és elemzésének folyamatát. A Meteororm adatbázis időjárás adatainak eléréséhez használható a Meteororm 8 szoftver vagy a Meteororm API. A szoftver felhasználóbarát felületet biztosít az adatok visszakereséséhez, megjelenítéséhez és exportálásához. A program lehetővé teszi a földrajzi helyek és az időszakok kiválasztását, valamint képes különböző formátumú időjárás fájlokat vagy grafikus ábrázolásokat létrehozni. A Meteororm API lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy integrálják a Meteororm funkcióit más szoftverekbe, emellett hálózati végpontokat biztosít, amelyek lehetővé teszik a Meteororm adatbázishoz való – akár valós idejű – hozzáférést. Az API-kérésekkel a fejlesztők lekérhetik az időjárás adatokat meghatározott helyekre, változókra és időtartományokra. Az API-válasz általában strukturált formátumban adja vissza a megkért adatokat, például JSON vagy XML formátumban.

A Meteororm program éghajlati előrejelzés adatsora hozzáférést biztosít a felhasználóknak a múltbeli és jelenlegi adatokhoz, valamint a jövőbeli éghajlati trendekhez. A Meteororm program Climate Forecast Data Series az RCP (Representative Concentration Pathway) forgatókönyvekkel kombinálva hatékony eszközt kínál a jövőbeli éghajlati viszonyok szimulálásához. Az RCP forgatókönyvek alapján a Meteororm előrejelzéseket ad a hőmérsékletre, csapadékra, szélsőségekre, napsugárzásra stb. Ezek az adatok természetesen csak irányt adóak, de jól előrejelzik a környezet jövőbeli alakulását. Ezek az információk nagy fontossággal bírnak az épülettervezésben, a mezőgazdasági döntéshozatalban és az éghajlatváltozáshoz kapcsolódó környezetvédelmi kutatásokban [118].

4.2.8 A System Advisor Model (SAM) szimulációs szoftver felépítése

A SAM – System Advisor Model – egy sokoldalú energetikai szimulációs program, amelyet széles körben használnak kutatók és a megújuló energiaipar szakemberei. A SAM egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy képes szimulálni a napelemes rendszerek teljesítményét különböző földrajzi helyeken és időjárási körülmények között. A program részletes időjárási adatbázist tartalmaz, amely hosszú távú, történelmi időjárási adatokat tartalmaz a világ több ezer pontjáról. Ezeknek az adatoknak a felhasználásával a SAM reális és pontos előrejelzéseket tud adni az energiatermelésről olyan tényezők alapján, mint a napsugárzás, a hőmérséklet, az árnyékolás, a rendszer veszteségei stb. [119].

A felhasználók személyre szabhatják szimulációikat a rendszerelemek megadásával, mint például a napelem-modul típusok, inverterek és tárolók. Ez a rugalmasság lehetővé teszi, hogy a felhasználó optimalizálja rendszerét a maximális energiatermelés, a költséghatékonyság és a károsanyag-kibocsátás minimalizálása érdekében. A pénzügyi elemzés a SAM másik fő képessége. A program olyan pénzügyi modelleket tartalmaz, amelyek figyelembe veszik a projekt költségeit, az ösztönző elemeket, az adójóváírásokat, a villamosenergia-díjakat, tarifákat stb. A pénzügyi paraméterek megadásával a SAM átfogó értékelést tud adni a napenergia-projektek gazdaságosságáról. Kiszámítja a fontos pénzügyi mutatókat, mint a nettó jelenértéket (NPV), a belső megtérülési rátát (IRR), a kiegyenlített energiaköltséget (LCOE), a megtérülési időszakot stb. Ezek segítik a felhasználót a projektfinanszírozással és a jövedelmezőséggel kapcsolatos döntések meghozatalában. Ezenkívül a SAM képes olyan hibrid rendszereket szimulálni, amelyek kombinálják a napenergiát más megújuló forrásokkal, például széllal vagy biomasszával, lehetővé téve az energiarendszer átfogó elemzését és optimalizálását [120].

4.2.9 A vizsgált napelemes rendszer telepítési paraméterei és konfigurációi

A SAM-ben beállított szimuláció egy 250 kWp teljesítményű napelemes mezőre vonatkozott. A napelemtáblák 400 Wp teljesítményű LG 400 N2W-A5 típusú monokristályos szilícium modulok voltak, míg az inverterek 20 kW-os AEG típusúak. A dőlésszög 37 fokra – Magyarországon az éves maximális villamosenergia-termelés szempontjából az ajánlott 35–40 fok közötti –, a tájolást 180 fokra (déli irányba) állították be a szimulációban.

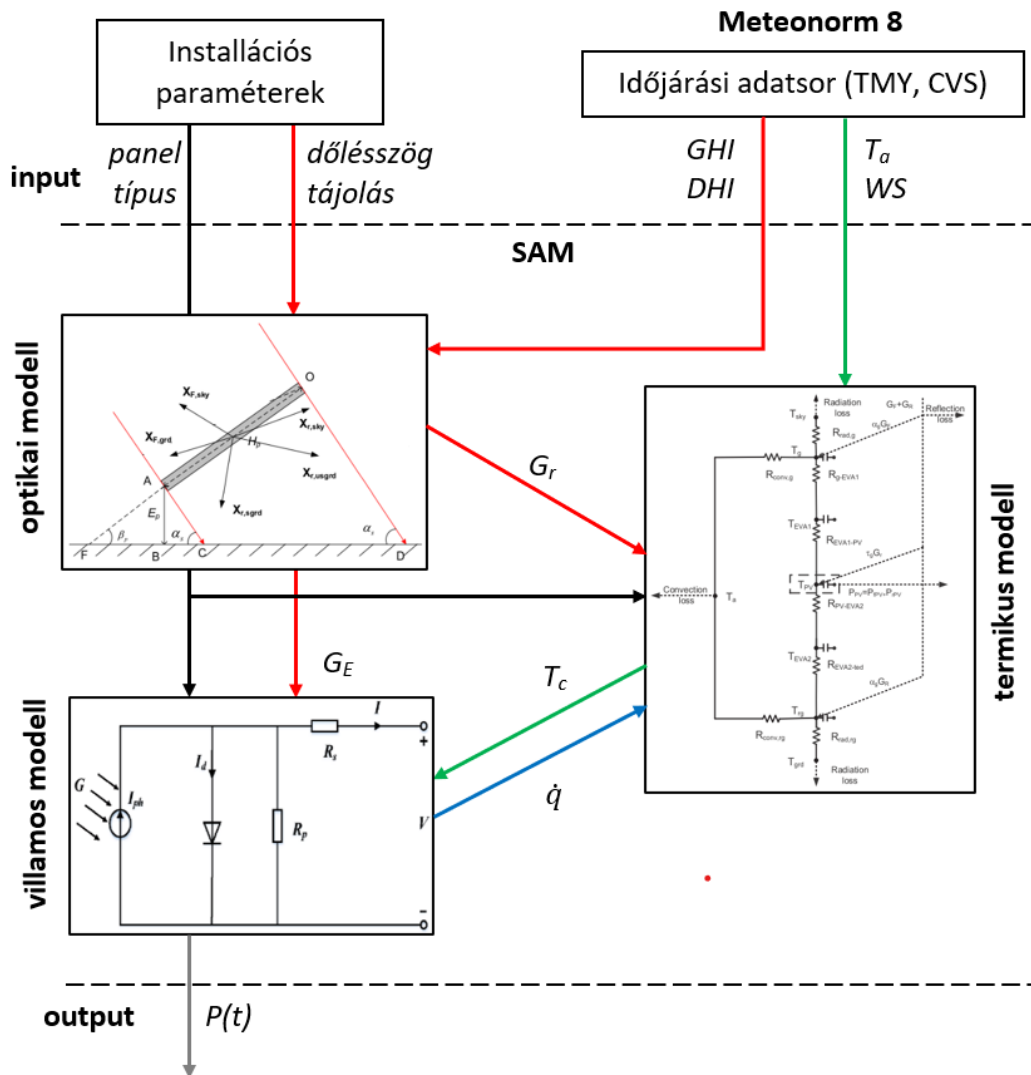
A napelemes mező 39 darab sztringet tartalmaz, sztringenként 16 darab napelemtáblából áll, így a rendszer összesen 624 darab napelemet jelent. Az inverterek száma 12 darab. A sztringek rövidzárási feszültsége 787,2 V, munkaponti feszültsége pedig 635,2 V. A napelemes mező egyenáramú teljesítménye 249,958 kW_{dc}, váltakozó áramú teljesítménye 242,724 kW_{ac}, a DC/AC ráta 1,02. A napelemtáblák összfelülete 1291,68 négyzetméter.

4.2.10 A sugárzási, hőtechnikai és villamos jellemzők integrált modellje

A 29. ábrán látható séma a SAM-en belüli három, egymással összekapcsolódó modell működését mutatja be.

- Az **optikai modell** bemeneti értéként veszi az időjárási paramétereket (például a teljes- és diffúz horizontális besugárzást – GHI és DHI), valamint a telepítési paramétereket (dőlésszög, azimut, magasság, albedó). A modell a sugárzás típusai (direkt, diffúz, visszavert) alapján meghatározza az ekvivalens besugárzást (GE) és a fogadott besugárzást (Gr).
- A **villamos modell** az optikai modell kimeneteit (GE, Gr) és a termikus modell által számított cella hőmérsékletét (T_c) használja bemenetként. Ezekből a paraméterekből számítja ki a villamos teljesítményt.
- A **termikus modell** az elnyelt napsugárzást és az egyéb hőhatásokat: a szélesebséget, a környezeti hőmérsékletet, a cellákban folyó áram melegítő hatását figyelembe véve számolja ki a belső hőtermelést és a cella hőmérsékletét.

A villamos és a termikus modellek zárt hurokban működnek együtt, vagyis iteratív módon – ciklusokon keresztül – finomítják egymás adatait a pontosabb számítás érdekében.



29. ábra A szimuláción belüli modellek sémája

Forrás: szerkesztés [121] alapján

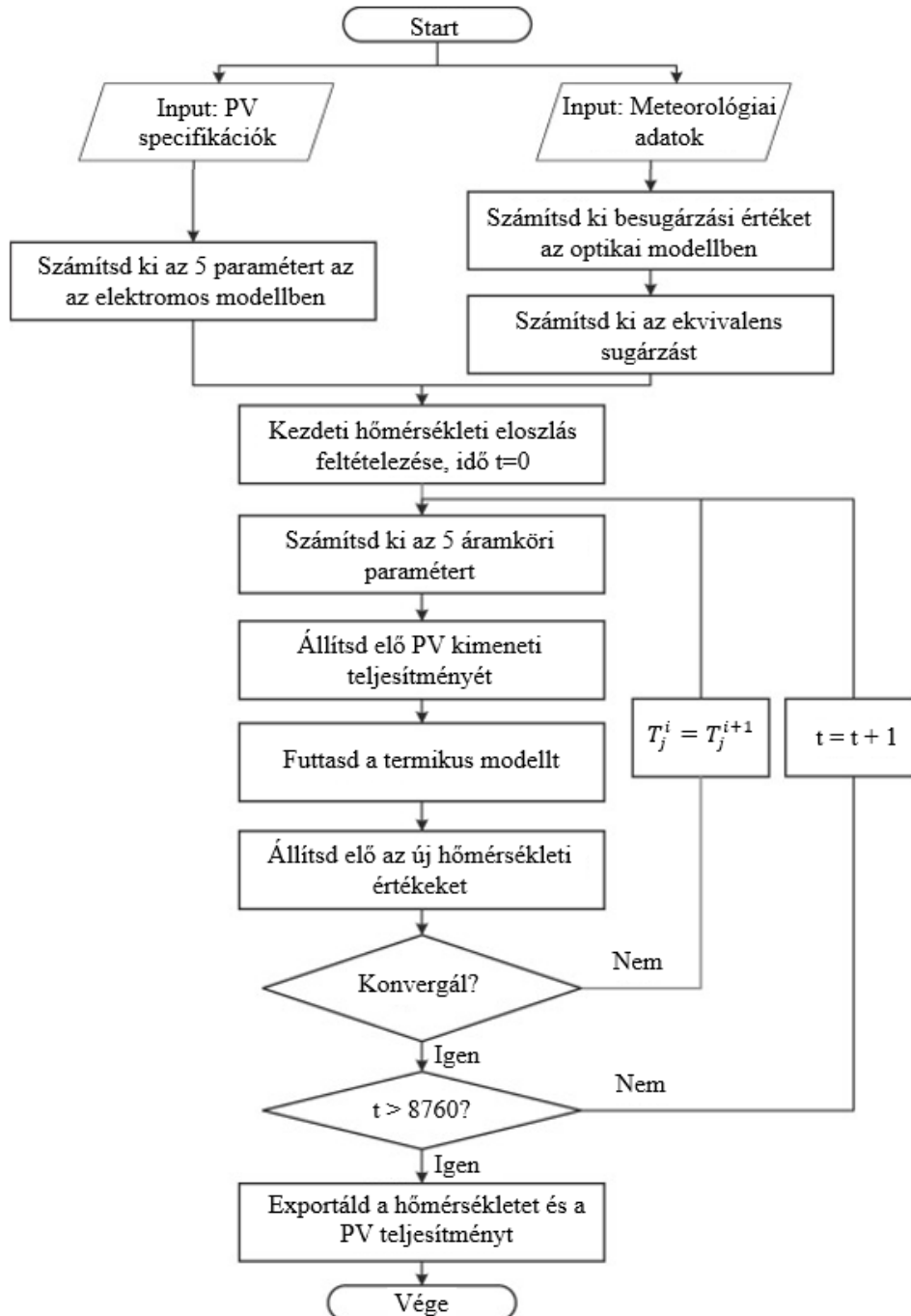
4.2.11 A szimuláció algoritmusának és számítási logikájának

A 29. ábrán felvázolt optikai, villamos és termikus modell számítási algoritmusának három fő lépésben zajlik:

- **Adatbevitel és kezdeti számítások** – Az időjárás adatok és a PV specifikációk alapján az optikai modell meghatározza az elektromos modell számára az ekvivalens besugárzást.
- **Iteratív hőmérsékletszámítás** – A cellahőmérséklet az áramköri áram visszahatását figyelembe véve, iterációval pontosításra kerül. Az iterációk addig folytatódnak, amíg a relatív hiba kisebb lesz, mint $1e-5$, és a külső iterációk száma eléri a 8760-at (az év óráinak számát).

- **Eredmények és kiértékelés** – A végleges hőmérsékleti érték és a napelemes rendszer teljesítmény meghatározása. (30. ábra)

Ez a folyamat biztosítja a pontos és hatékony modellezést a napelemes rendszerek teljesítményének és a hőmérséklet hatásának elemzésére.



30. ábra A SAM algoritmus

Forrás: szerkesztés [121] alapján

4.2.12 Pearson- és parciális korrelációs vizsgálatok alkalmazása

A Pearson-korreláció és a parciális korreláció elemzése az SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) szoftverrel készült. Ez a két módszer lehetővé teszi a változók közötti kapcsolatok vizsgálatát. A korrelációs elemzés két folytonos változó közötti lineáris kapcsolat erősségének és irányának mérésére szolgál. A parciális korreláció a korrelációs elemzés kiterjesztése, amely során két változó közötti kapcsolatot vizsgálunk, miközben egy vagy több változó hatását kiszűrjük. Ez segít abban, hogy milyen kapcsolat áll fenn két változó között a többi változó hatásának figyelembevétele nélkül.

A korrelációs együttható (r) értéke -1 és $+1$ között mozog. A -1 -hez vagy 1 -hez közeli érték erős lineáris kapcsolatot jelez, míg a 0 -hoz közeli érték gyenge vagy nem szignifikáns kapcsolatot mutat. Az előjel ($+/-$) a kapcsolat irányát jelöli. A p -érték a korrelációs együttható szignifikanciaszintjét mutatja. A kutatásunkban a választott szignifikanciaszint $p < 0,05$ volt, amely szignifikáns kapcsolatot jelez a vizsgált változók között.

A parciális korrelációs együttható értelmezése megegyezik a korrelációssal: az -1 -hez vagy 1 -hez közeli érték erős lineáris kapcsolatot jelez, míg a 0 -hoz közeli érték gyenge vagy nem szignifikáns összefüggésre utal. Az előjel itt is a kapcsolat irányát mutatja.

Fontos megjegyezni, hogy a korreláció nem jelent ok-okozati összefüggést. A módszer kizárólag a kapcsolat erősségét és irányát méri, de nem bizonyítja az egyik változó hatását a másikra [122].

4.2.13 Lineáris regresszió és grafikus illeszkedési modellek

A regresszióelemzés és a regressziódiagram megrajzolása a Minitab statisztikai programban készült. A regresszióelemzés egy statisztikai módszer, amely a változók közötti kapcsolatokat vizsgálja. Célja egy matematikai modell, azaz regressziós egyenlet létrehozása, amely egy vagy több független változó és egy függő változó közötti kapcsolatot ír le.

A leggyakrabban alkalmazott forma a lineáris regresszió, amelynek általános alakja a következő:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$$

, ahol:

- Y a függő változó,
- X a független változó,
- β_0 az Y tengelymetszete,
- β_1 a regressziós egyenes meredeksége,
- ε a hibatar.

A regresszióelemzés eredményeit gyakran grafikus formában is megjelenítik. A regressziódiagram egy szórásdiagram, amelyen a pontok az adatok eloszlását mutatják, míg az illesztett regresszióegyenes vizuálisan ábrázolja az adatok közötti kapcsolatot.

A regresszióegyenes meredeksége (β_1) azt mutatja meg, hogy a független változó (X) egységnyi változása milyen mértékben és irányban változtatja a függő változót (Y).

A regresszióegyenes értelmezése alapján három fő esetet különböztetünk meg.

- **Pozitív meredekség** esetén ($\beta_1 > 0$) a független változó (X) növekedésével a függő változó (Y) értéke is növekszik, vagyis pozitív kapcsolat áll fenn közöttük.
- **Negatív meredekség** esetén ($\beta_1 < 0$) X növekedésével Y csökken, ami negatív kapcsolatot jelez.
- **Semleges meredekség** esetén ($\beta_1 = 0$) a változók között nincs lineáris kapcsolat, az egyenes vízszintes vonalként jelenik meg.

A meredekség kiszámítása a legkisebb négyzetek módszerével a következő képlettel történik:

$$\beta_1 = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum(X_i - \bar{X})^2}$$

ahol:

- X_i, Y_i az egyes adatok,
- \bar{X}, \bar{Y} pedig az X és Y átlagai.

Ez a képlet azt méri, hogy az X értékek eltérése milyen hatással van az Y értékének változására [123].

4.3 Eredmények és statisztikai értékelés az RCP forgatókönyvek mentén

4.3.1 Szimulációs eredmények regionális és időbeli bontásban

A 9–18. mellékletek Magyarország tíz városának – Budapest, Debrecen, Győr, Kecskemét, Miskolc, Pécs, Sopron, Szeged, Szombathely és Veszprém – térségére vonatkozó éghajlati és energetikai szimulációs eredményeket tartalmazzák. A vizsgálat célja, hogy átfogó képet adjon arról, hogyan alakulhatnak a napenergia hasznosításának lehetőségei és a kapcsolódó energetikai mutatók a 21. század során, három eltérő forgatókönyv – RCP2.6, RCP4.5 és RCP8.5 – szerint.

A szimulációk során három kulcsfontosságú paraméter alakulása kerül nyomon követésre évtizedes bontásban, 2010 és 2100 között. A szimuláció két fő bemeneti paraméterre:

- Gh – teljes horizontális sugárzás: a napsugárzás elérhető napi átlagértékét (kWh/m²/nap) jelzi a vizsgált régióban,
- Ta – éves átlaghőmérséklet: Celsius-fokban kifejezve a vizsgált régió évi középhőmérséklete

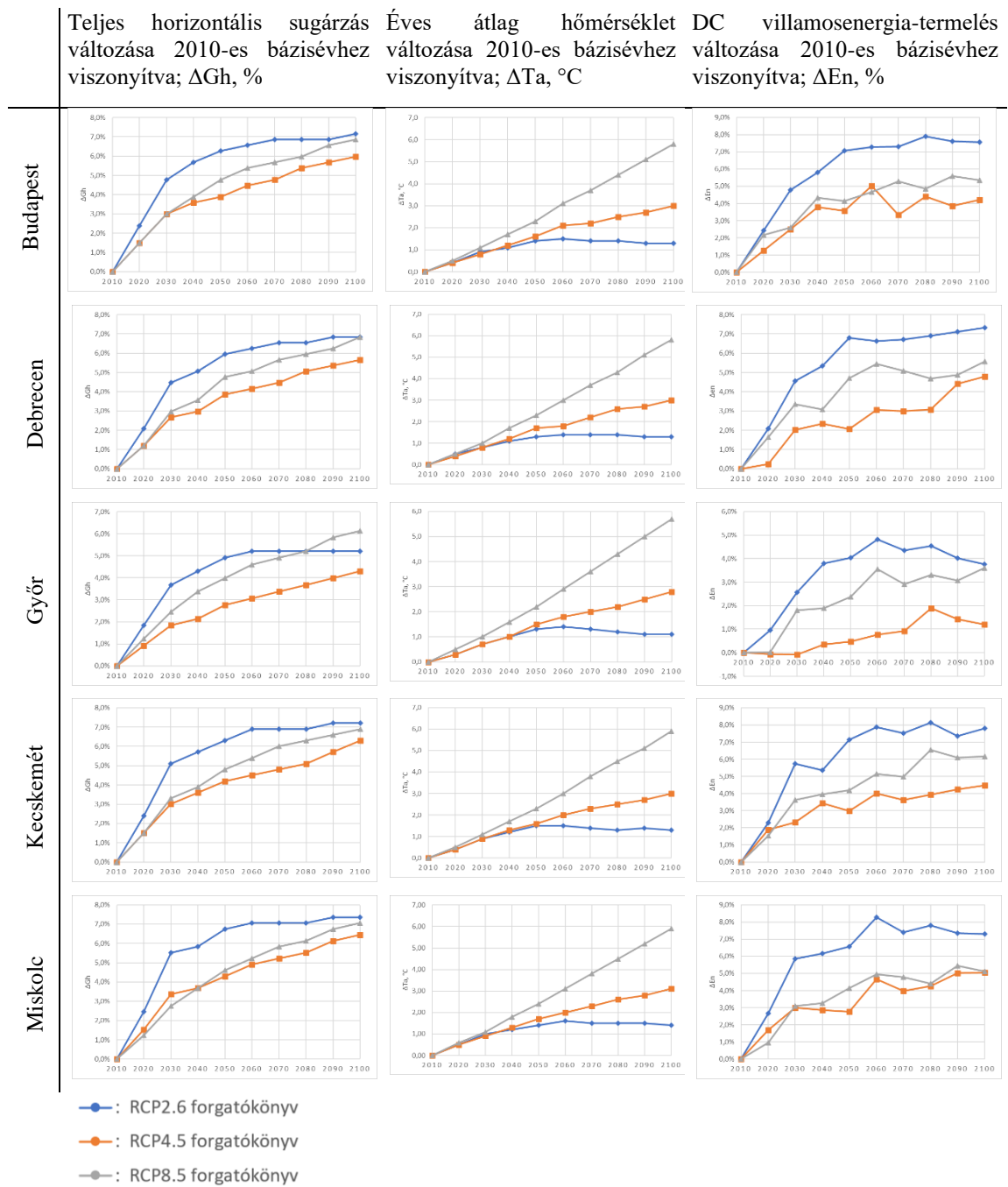
és egy kimeneti paraméterre fókuszál:

- En – éves villamosenergia-termelés (DC): a vizsgált város régiójában telepített napelemes rendszerből várható egyenáramú éves energiatermelés (kWh/év).

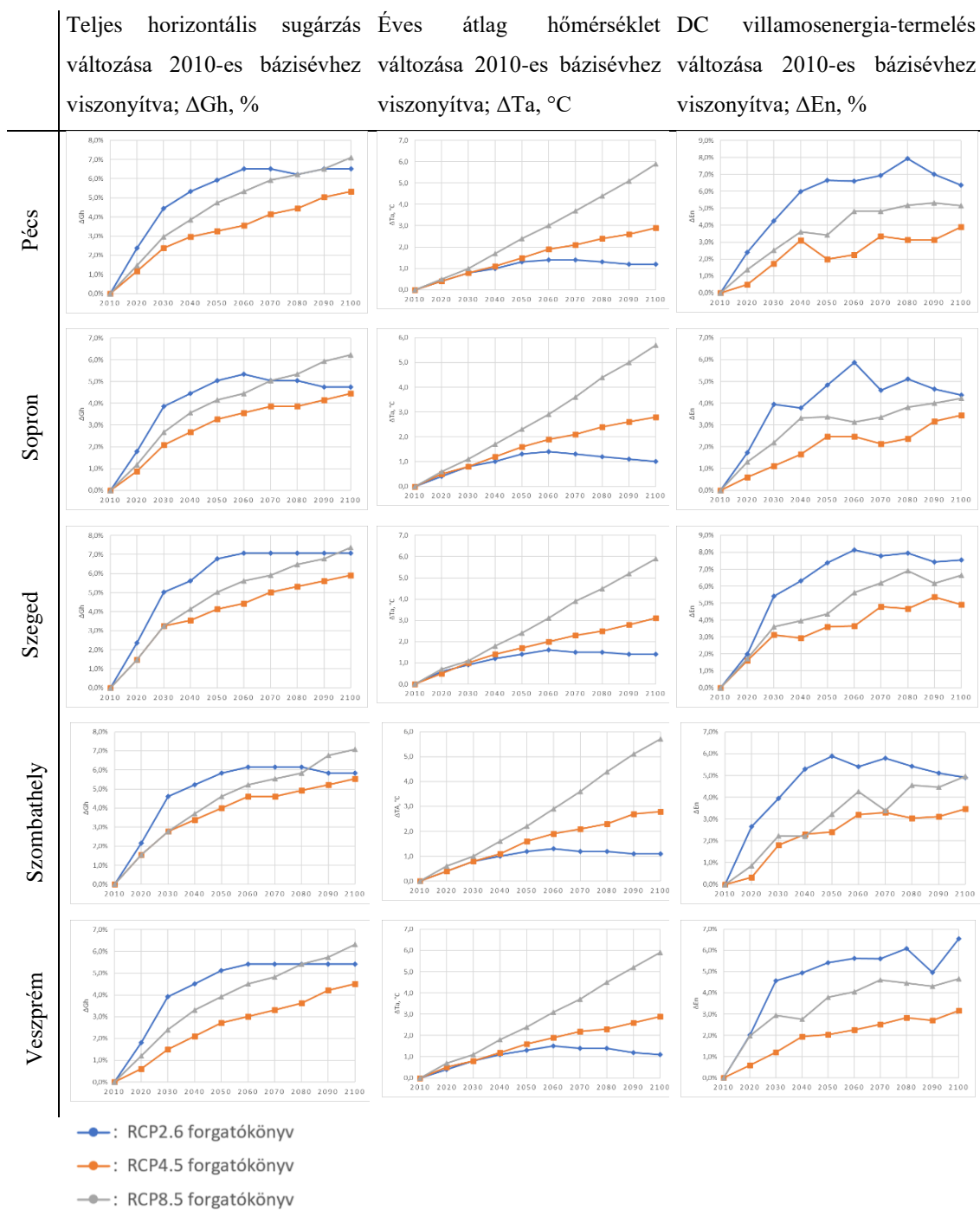
Ezek az eredmények fontos támpontot nyújtanak a regionális szintű klímaadaptációs és energiapolitikai döntéshozatalhoz, különösen a megújuló energiaforrásokra – elsősorban a napenergiára – alapozott fejlesztések tervezéséhez. A szimulációs adatok elősegítik a hosszú távú infrastruktúra-fejlesztés és energiaellátás tervezését, hozzájárulva a klímaváltozás hatásainak mérsékléséhez.

Az eredmények jól érzékeltetik az egyes forgatókönyvek közötti különbségeket: míg az RCP2.6 esetében mérsékeltbb változások figyelhetők meg, addig az RCP8.5 forgatókönyv már jelentős hőmérséklet-emelkedést vetít előre. A bemutatott tendenciák minden város esetében hasonló irányúak, ugyanakkor a lokális eltérések és sajátosságok is megfigyelhetők, ami alátámasztja a helyi szintű tervezés és adaptáció fontosságát. (31-32. ábra)

4.3.2 Idősoros elemzések és szezonális változások vizsgálata



31. ábra Budapest, Debrecen, Győr, Kecskemét és Miskolc teljes horizontális sugárzás, évi középhőmérséklet és DC villamosenergia-termelés változás, bázis: 2010



32. ábra Pécs, Sopron, Szeged, Szombathely és Veszprém teljes horizontális sugárzás, évi középhőmérséklet és DC villamosenergia-termelés változás, bázisév: 2010

Az idősorok vizsgálata több fontos eredményre világít rá. Az RCP2.6 adja a legnagyobb éves hozamot az elemzett időszak alatt. Ezt követi hozamban az RCP8.5, majd az RCP4.5. Ez meglepő, mert a legkedvezőtlenebb forgatókönyvnek számító RCP8.5-ről feltételezhető lenne, hogy a legkisebb villamosenergia-hozamot eredményezi. Ennek

hátterében az áll, hogy annak ellenére, hogy a legnagyobb átlaghőmérséklet növekedéssel járó RCP8.5 esetén a napelem hatásfokát a magas hőmérséklet negatívan befolyásolja, a nagyobb napsugárzási érték ezt annyira kompenzálja, hogy magasabb hozamot eredményez, mint az RCP4.5. Ez a kompenzáció viszont nem elég ahhoz, hogy az RCP8.5 hozama meghaladja az RCP2.6-ét. Azaz a legkedvezőbb forgatókönyv biztosítja a legmagasabb villamosenergia-hozamot. A másik fontos eredmény, hogy 2050–2060 körül kezd stabilizálódni, vagy legalábbis csökkenő meredekségbe váltani a villamosenergia-hozam növekedés mindhárom forgatókönyv szerint.

4.3.3 Középtávú és hosszú távú trendek összehasonlítása

A hatásfokváltozást jól érzékelteti, hogy egységnyi sugárzásváltozásra mekkora teljesítményváltozás jut. Ehhez meg kell vizsgálni a teljesítményváltozás és a teljes horizontális sugárzásváltozás hányadosát. (21. táblázat)

21. táblázat A teljesítmény változás és a teljes horizontális sugárzás változás aránya

		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Budapest	2050	1,12	0,92	0,86
	2100	1,05	0,70	0,78
Debrecen	2050	1,14	0,53	0,99
	2100	1,07	0,85	0,81
Győr	2050	0,82	0,17	0,60
	2100	0,72	0,28	0,59
Kecskemét	2050	1,13	0,71	0,87
	2100	1,08	0,71	0,89
Miskolc	2050	0,97	0,65	0,90
	2100	0,99	0,78	0,73
Pécs	2050	1,12	0,61	0,72
	2100	0,98	0,73	0,73
Sopron	2050	0,96	0,76	0,81
	2100	0,92	0,77	0,68
Szeged	2050	1,09	0,87	0,87
	2100	1,07	0,83	0,90
Szombathely	2050	1,01	0,61	0,70
	2100	0,84	0,63	0,70
Veszprém	2050	1,06	0,75	0,97
	2100	1,21	0,70	0,74
Átlag	2050	1,042	0,658	0,829
	2100	0,993	0,698	0,755

Az eredménycellákban lévő érték alapján meghatározható, hogy a 2010-es bázisához képest egy egységnyi sugárzásnövekedés mekkora változást idéz elő a teljesítményben.

4.3.4 Pearson-korrelációs mátrix és értelmezése

A 22. táblázatban bemutatott Pearson-korrelációs mátrix a változók lineáris korrelációját jeleníti meg területi és forgatókönyv szerinti bontásban.

22. táblázat Pearson-korreláció mátrix

		Gh_2.6	Ta_2.6			Gh_4.5	Ta_4.5			Gh_8.5	Ta_8.5
Budapest	Ta_2.6	0,980 (0,001)		Ta_4.5	0,974 (0,000)		Ta_8.5	0,947 (0,000)			
	En_2.6	0,995 (0,000)	0,986 (0,000)	En_4.5	0,906 (0,000)	0,851 (0,002)	En_8.5	0,971 (0,000)	0,878 (0,001)		
Debrecen	Ta_2.6	0,983 (0,000)		Ta_4.5	0,981 (0,000)		Ta_8.5	0,946 (0,000)			
	En_2.6	0,997 (0,000)	0,984 (0,000)	En_4.5	0,955 (0,000)	0,944 (0,000)	En_8.5	0,959 (0,000)	0,842 (0,002)		
Győr	Ta_2.6	0,968 (0,000)		Ta_4.5	0,986 (0,000)		Ta_8.5	0,953 (0,000)			
	En_2.6	0,975 (0,000)	0,988 (0,000)	En_4.5	0,852 (0,002)	0,884 (0,001)	En_8.5	0,954 (0,000)	0,876 (0,001)		
Kecskemét	Ta_2.6	0,973 (0,000)		Ta_4.5	0,978 (0,000)		Ta_8.5	0,939 (0,000)			
	En_2.6	0,988 (0,000)	0,964 (0,000)	En_4.5	0,967 (0,000)	0,930 (0,000)	En_8.5	0,983 (0,000)	0,911 (0,000)		
Miskolc	Ta_2.6	0,988 (0,000)		Ta_4.5	0,975 (0,000)		Ta_8.5	0,963 (0,000)			
	En_2.6	0,988 (0,000)	0,911 (0,000)	En_4.5	0,971 (0,000)	0,936 (0,000)	En_8.5	0,969 (0,000)	0,878 (0,001)		
Pécs	Ta_2.6	0,982 (0,000)		Ta_4.5	0,981 (0,000)		Ta_8.5	0,951 (0,000)			
	En_2.6	0,976 (0,000)	0,974 (0,000)	En_4.5	0,941 (0,000)	0,894 (0,000)	En_8.5	0,983 (0,000)	0,909 (0,000)		
Sopron	Ta_2.6	0,980 (0,000)		Ta_4.5	0,973 (0,000)		Ta_8.5	0,952 (0,000)			
	En_2.6	0,982 (0,000)	0,975 (0,000)	En_4.5	0,965 (0,000)	0,964 (0,000)	En_8.5	0,973 (0,000)	0,877 (0,001)		
Szeged	Ta_2.6	0,987 (0,000)		Ta_4.5	0,977 (0,000)		Ta_8.5	0,947 (0,000)			
	En_2.6	0,995 (0,000)	0,987 (0,000)	En_4.5	0,987 (0,000)	0,958 (0,000)	En_8.5	0,984 (0,000)	0,920 (0,000)		
Szombathely	Ta_2.6	0,992 (0,000)		Ta_4.5	0,968 (0,000)		Ta_8.5	0,955 (0,000)			
	En_2.6	0,978 (0,000)	0,977 (0,000)	En_4.5	0,976 (0,000)	0,932 (0,000)	En_8.5	0,977 (0,000)	0,929 (0,000)		
Veszprém	Ta_2.6	0,968 (0,000)		Ta_4.5	0,995 (0,000)		Ta_8.5	0,965 (0,000)			
	En_2.6	0,979 (0,000)	0,931 (0,000)	En_4.5	0,983 (0,000)	0,977 (0,000)	En_8.5	0,951 (0,000)	0,867 (0,001)		

A zárójelben lévő érték a szignifikancia szintet mutatja

A 22. táblázatban szereplő Pearson-korrelációs mátrix eredményei rendkívül magas korrelációs értékeket mutatnak a globális horizontális besugárzás (Gh), a levegő hőmérséklete (Ta), valamint a napelemes energiatermelés (En) között, mindhárom RCP forgatókönyv esetében. A korrelációs együtthatók 0,85 és 0,99 közötti tartományban mozognak, amely szignifikáns és erős pozitív kapcsolatot jelez a vizsgált változók között.

A szoros korreláció elsődleges okai:

- A besugárzás és az energiatermelés közvetlen kapcsolata: A napelemes rendszerek energiatermelése (En) közvetlenül arányos a beérkező globális horizontális besugárzással (Gh). A magas besugárzási értékek automatikusan magasabb energiatermelést eredményeznek, amely magyarázza a rendkívül szoros összefüggést ($r \approx 0,99$ több város és forgatókönyv esetében).
- A hőmérséklet hatása a teljesítményre: Bár a napelemek teljesítménye a hőmérséklet növekedésével enyhén csökken (negatív hőmérsékleti együttható miatt), a magasabb hőmérsékleti értékek általában magasabb napsütéses órással és kevesebb felhőzettel társulnak. Ez közvetve pozitív hatást gyakorol a besugárzásra, így erős pozitív korreláció figyelhető meg Gh és Ta között is ($r \approx 0,95-0,99$).
- A meteorológiai változók kölcsönös összefüggése: A vizsgált RCP forgatókönyvek szimulációi során a besugárzás és a hőmérséklet területi és időbeli változásai szorosan együtt mozognak, különösen a közép-európai (magyarországi) klimatikus viszonyok miatt, ahol a napsütéses órák számának és a napi középhőmérsékletnek szoros a kapcsolata.

Alapjaiban elmondható, hogy a rendkívül magas korrelációs értékek a besugárzás, hőmérséklet és energiatermelés közötti szoros fizikai és meteorológiai összefüggéseket tükrözik.

4.3.5 Parciális korreláció: kontrollált hatásvizsgálat

A 23. táblázat a parciális korrelációs értékeket tartalmazza, amelyek a vizsgált változók közötti kapcsolat szorosságát mutatják a kontrollváltozók hatásának kizárásával.

23. táblázat Parciális-korreláció

	Kontrol változó	Változó 1	Változó 2	Korreláció	Szign. szint
Budapest	Ta_2.6	Gh_2.6	En_2.6	0,863	0,003
	Gh_2.6	Ta_2.6	En_2.6	0,543	0,131
	Ta_4.5	Gh_4.5	En_4.5	0,648	0,059
	Gh_4.5	Ta_4.5	En_4.5	-0,328	0,388
	Ta_8.5	Gh_8.5	En_8.5	0,907	0,001
	Gh_8.5	Ta_8.5	En_8.5	-0,539	0,134
Debrecen	Ta_2.6	Gh_2.6	En_2.6	0,902	0,001
	Gh_2.6	Ta_2.6	En_2.6	0,299	0,434
	Ta_4.5	Gh_4.5	En_4.5	0,463	0,210
	Gh_4.5	Ta_4.5	En_4.5	0,114	0,771
	Ta_8.5	Gh_8.5	En_8.5	0,932	0,000
	Gh_8.5	Ta_8.5	En_8.5	-0,720	0,029
Győr	Ta_2.6	Gh_2.6	En_2.6	0,481	0,190
	Gh_2.6	Ta_2.6	En_2.6	0,793	0,011
	Ta_4.5	Gh_4.5	En_4.5	-0,249	0,518
	Gh_4.5	Ta_4.5	En_4.5	0,501	0,170
	Ta_8.5	Gh_8.5	En_8.5	0,818	0,007
	Gh_8.5	Ta_8.5	En_8.5	-0,372	0,324
Kecskemét	Ta_2.6	Gh_2.6	En_2.6	0,811	0,008
	Gh_2.6	Ta_2.6	En_2.6	0,075	0,849
	Ta_4.5	Gh_4.5	En_4.5	0,746	0,021
	Gh_4.5	Ta_4.5	En_4.5	-0,290	0,450
	Ta_8.5	Gh_8.5	En_8.5	0,902	0,001
	Gh_8.5	Ta_8.5	En_8.5	-0,202	0,603
Miskolc	Ta_2.6	Gh_2.6	En_2.6	0,393	0,295
	Gh_2.6	Ta_2.6	En_2.6	0,645	0,060
	Ta_4.5	Gh_4.5	En_4.5	0,747	0,021
	Gh_4.5	Ta_4.5	En_4.5	-0,202	0,602
	Ta_8.5	Gh_8.5	En_8.5	0,945	0,000
	Gh_8.5	Ta_8.5	En_8.5	-0,815	0,007
Pécs	Ta_2.6	Gh_2.6	En_2.6	0,468	0,204
	Gh_2.6	Ta_2.6	En_2.6	0,369	0,329
	Ta_4.5	Gh_4.5	En_4.5	0,742	0,022
	Gh_4.5	Ta_4.5	En_4.5	-0,457	0,216
	Ta_8.5	Gh_8.5	En_8.5	0,920	0,000
	Gh_8.5	Ta_8.5	En_8.5	-0,458	0,215
Sopron	Ta_2.6	Gh_2.6	En_2.6	0,592	0,093
	Gh_2.6	Ta_2.6	En_2.6	0,327	0,390
	Ta_4.5	Gh_4.5	En_4.5	0,439	0,238
	Gh_4.5	Ta_4.5	En_4.5	0,423	0,259
	Ta_8.5	Gh_8.5	En_8.5	0,939	0,000
	Gh_8.5	Ta_8.5	En_8.5	-0,695	0,038
Szeged	Ta_2.6	Gh_2.6	En_2.6	0,823	0,006
	Gh_2.6	Ta_2.6	En_2.6	0,285	0,457
	Ta_4.5	Gh_4.5	En_4.5	0,842	0,004
	Gh_4.5	Ta_4.5	En_4.5	-0,191	0,623
	Ta_8.5	Gh_8.5	En_8.5	0,897	0,001
	Gh_8.5	Ta_8.5	En_8.5	-0,213	0,582
Szombathely	Ta_2.6	Gh_2.6	En_2.6	0,315	0,408
	Gh_2.6	Ta_2.6	En_2.6	0,289	0,451

	Ta_4.5	Gh_4.5	En_4.5	0,806	0,009
	Gh_4.5	Ta_4.5	En_4.5	-0,216	0,576
	Ta_8.5	Gh_8.5	En_8.5	0,815	0,008
	Gh_8.5	Ta_8.5	En_8.5	-0,056	0,885
Veszprém	Ta_2.6	Gh_2.6	En_2.6	0,845	0,004
	Gh_2.6	Ta_2.6	En_2.6	-0,317	0,406
	Ta_4.5	Gh_4.5	En_4.5	0,527	0,145
	Gh_4.5	Ta_4.5	En_4.5	-0,081	0,835
	Ta_8.5	Gh_8.5	En_8.5	0,879	0,002
	Gh_8.5	Ta_8.5	En_8.5	-0,638	0,064

A parciális korrelációs vizsgálat alapján a napsugárzás kontrollváltozó mellett elemzett hőmérséklet–villamosenergia-termelés összefüggés többségében negatív előjelű korrelációs értékeket mutatott, különösen az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek esetében. Ugyanakkor statisztikailag szignifikáns negatív hatás jellemzően csak az RCP8.5 scenárióban jelentkezett néhány város esetében (például Miskolc, Debrecen, Sopron). Ez arra utal, hogy a magasabb hőmérséklet – noha nem minden esetben lineárisan és nem minden városban – kedvezőtlen hatással lehet a napelemes rendszerek villamosenergia-termelésére.

4.3.6 Lineáris regresszió: magyarázóváltozók és trendirányok

A 24. táblázat a 19–28. melléletek lineáris regresszióegyeneseinek együtthatóit tartalmazza. A regresszióvizsgálat célja a hőmérséklet és az egységnyi sugárzás – villamosenergia-termelés hányados közötti kapcsolat feltárása volt.

24. táblázat Lineáris regresszió egyenes együtthatói

$y=\beta_1x+\beta_0$	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5		Klaszt.
	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	
Budapest	465,73	88652,15	-481,16	100205,41	-260,96	97694,95	2.
Debrecen	303,96	90076,08	-298,20	96497,43	-269,36	97021,43	3.
Győr	-261,15	95895,05	-715,18	100762,93	-332,90	96698,41	1.
Kecskemét	482,07	87135,39	-539,08	99215,30	-109,01	94141,42	2.
Miskolc	240,64	91170,91	-421,09	98298,52	-298,81	97180,24	3.
Pécs	446,78	86967,66	-459,04	97678,44	-236,37	95113,29	2.
Sopron	-18,45	95148,57	-357,22	98678,50	-361,40	99112,34	1.
Szeged	570,41	85397,30	-221,10	94936,34	-81,31	93430,96	2.
Szombathely	-573,96	100243,33	-508,51	98892,80	-285,95	96541,55	1
Veszprém	109,60	91948,73	-457,95	98005,86	-307,20	96744,49	3.
Átlag	176,56	91263,52	-445,85	98317,15	-254,33	96367,91	

A lineáris regresszió vizsgálat eredményei alátámasztják a levegő hőmérsékletének a napelemes villamosenergia-termelésre gyakorolt negatív hatását. Ezt a kapcsolatot a lineáris egyenesek meredeksége (β_1) szemlélteti. Az eredmények alapján megfigyelhető, hogy az RCP4.5 forgatókönyv esetében a hőmérséklet hatása erőteljesebben csökkenti a villamosenergia-termelés hatékonyságát, mint a pesszimista forgatókönyv (RCP8.5) esetében. Az RCP2.6 és RCP8.5 forgatókönyvek közötti hasonlóság, valamint az RCP4.5-től való távolság jól látható a 29. mellékletben bemutatott dendrogramon.

4.3.7 Klaszteranalízis: a β_1 paraméterek alapján történő területi csoportosítás

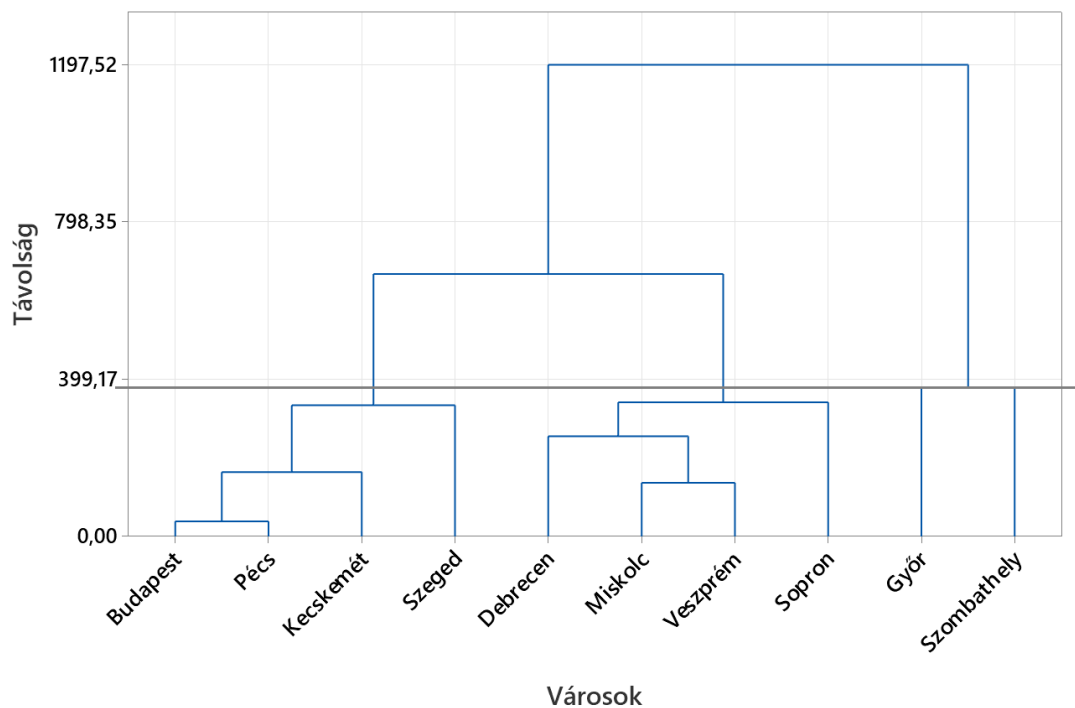
A β_1 meredekségi paraméterek alapján elvégzett hierarchikus klaszteranalízis egyértelműen bemutatja, hogy a magyar városok éghajlatváltozással kapcsolatos trendjei nem egyenletesek, hanem jellegzetes regionális mintázatot követnek. Az elemzésből kirajzolódik három fő csoport, amelyek nem csupán statisztikai hasonlóságot, hanem földrajzi összefüggéseket is tükröznek.

- Az **északnyugati (1) klaszter** (Győr, Szombathely, Sopron) mindhárom RCP forgatókönyv esetén konzisztensen negatív trendet mutat. Ez a csoport a leginkább tűnik érzékenynek az éghajlatváltozásra, különösen az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriók esetén, ahol a meredekségi együtthatók -300 és -700 között mozognak. Földrajzi elhelyezkedésük alapján feltételezhető, hogy az Alpokaljára jellemző mikroklíma és a nyugati légáramlások változása erőteljesebben befolyásolja ezeket a városokat.
- A **déli és középső (2) klaszter** (Szeged, Kecskemét, Pécs, Budapest) kettős viselkedést mutat. Az RCP2.6 scenárióban pozitív trendet mutatnak, ami az RCP4.5 és RCP8.5 esetén erős negatívumba fordul. Budapest különösen érdekes eset, hiszen a legnagyobb pozitívból a legnagyobb negatív trendbe csap át. Ez utalhat a városi, ipari hősziget-hatás és a regionális klímaváltozás komplex kölcsönhatására.
- Az **északkeleti átmeneti (3) klaszter** (Debrecen, Miskolc, Veszprém) közepes pozitív trenddel indul az RCP2.6-nál, de a többi scenárióban mérsékelten negatívvá válik. Ezek a városok a legkevésbé érzékenyek az éghajlatváltozásra, ami talán a kontinentálisabb éghajlatukkal magyarázható.

Megjegyzendő: Sopron közeli Győrhez és Szombathelyhez, de nem azonos klaszterbe kerül, mert:

- Az RCP2.6-ban Sopron β_1 (-18.45) kevésbé negatív, mint Győr (-261.15) vagy Szombathely (-573.96).
- Az RCP4.5/RCP8.5-ban Sopron trendjei közelítenek a másik két városhoz, de nem teljesen egyeznek.

Magyarázat: Az értelmezésben a földrajzi közelség miatt logikus volt egy csoportba sorolni Sopront, Győrt és Szombathelyt. A statisztikai klaszterezés azonban a numerikus hasonlóságot nézi, ami itt finoman eltér: Sopron "átmeneti" pozícióban van: nem annyira negatív, mint Szombathely, de nem is pozitív, mint Budapest. (33. ábra)



33. ábra Régiók hierarchikus klaszterezése RCP klímamodell-eredmények alapján

4.4 A klímaváltozás hatásai a napelemes energiatermelés jövőbeli trendjeire és regionális eltéréseire

A vizsgálatok során elvégzett szimulációk alapján megállapítást nyert, hogy a napelemes rendszerek jövőbeli energiatermelési potenciálját a globális klímaváltozás hatásai komplex módon befolyásolják. A három fő RCP forgatókönyv (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) modellezésével kimutatásra került, hogy az emelkedő hőmérséklet általánosságban negatív hatást gyakorol a napelemek hatásfokára, míg a növekvő napsugárzási intenzitás részben képes ellensúlyozni ezt a hatást – különösen az RCP8.5 esetében, ahol a besugárzási értékek ugrásszerű növekedése figyelhető meg. Ennek következtében az RCP8.5 forgatókönyv nem lineáris módon, de bizonyos esetekben mégis kedvezőbb energiatermelési eredményeket mutat, mint az RCP4.5, annak ellenére, hogy előbbinél a hőmérséklet-emelkedés mértéke a legnagyobb. (29. melléklet)

Az RCP2.6 forgatókönyv – amely a legalacsonyabb klímakockázatú jövőképet modellezi – egyértelműen a legstabilabb energiatermelési kimeneteket szolgáltatja, ezzel jelezve, hogy a globális emissziócsökkentés nem csupán környezeti, hanem energetikai szempontból is stratégiai jelentőséggel bír. Ezzel szemben az RCP4.5 esetén, ahol mérsékelt emissziócsökkentés mellett magasabb hőmérsékleti átlagokat prognosztizálnak, az energiahozam csökkenése markánsabban megjelenik, amit a napsugárzás növekedése sem tud megfelelően kiegyenlíteni.

Az idősor-alapú vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a napelemes rendszerek energiahozamának növekedése 2050–2060 környékén stabilizálódik, amely mögött a hőmérsékleti és sugárzási hatások közötti egyensúlyi állapot kialakulása állhat. Ez arra utal, hogy a hosszú távú tervezés során figyelembe kell venni a klímakomponensek nemlineáris hatását és azok időbeli hatásmechanizmusát is. A technológiai fejlesztéseknek – különösen a hőmérsékletérzékeny félvezetők adaptációs lehetőségeinek – ezen környezetfüggő hatásokhoz kell igazodniuk.

A regionális szintű elemzések során a legszembetűnőbb földrajzi mintázat a nyugatkeleti gradiensekben figyelhető meg. Az északnyugati városok minden forgatókönyvben negatív trendet mutatnak, míg a déliek kezdetben pozitív, majd erősen negatív irányba fordulnak. Ez a különbség valószínűleg a térségek eltérő éghajlati érzékenysége vezethető vissza, amelyet a domborzat, a tengerszint feletti magasság és a regionális légköri áramlás befolyásol.

A klaszteranalízis eredményei alapján kijelenthető, hogy az éghajlatváltozás hatásainak tervezésekor regionális megközelítésre van szükség. Az egyes városi régiók nemcsak a különböző forgatókönyvekre reagálnak eltérően, de ezek a reakciók földrajzi szabályosságot is mutatnak. Ez a tudás nélkülözhetetlen a hatékony klímavédelmi stratégiák kidolgozásához, hiszen például az északnyugati régióban másféle adaptációs intézkedések lehetnek szükségesek, mint az Alföldön. (33. ábra)

A kvantitatív módszerek – különösen a Pearson-féle és parciális korrelációs vizsgálatok, valamint a lineáris regressziós elemzések – azt mutatták, hogy az éves energiatermelés és a globálsugárzás között pozitív kapcsolat áll fenn, míg a hőmérséklet-növekedés hatása egyértelműen negatív korrelációt mutat a relatív hatásokkal. A multivariáns elemzések szerint a két fő éghajlati tényező együttes hatása a napelemek éves teljesítményére területi bontásban jelentős szórást mutat, amely a jövőbeni fejlesztések régióspecifikus optimalizációját teszi szükségessé.

A fenti eredmények alapján kijelenthető, hogy a klímaváltozás hatása nem kizárólag kockázati tényezőként értelmezendő, hanem lehetőségeket is rejt magában a technológiai fejlesztések, valamint a regionális energiatervezés területén. A megújuló technológiák – különösen a napelemes rendszerek – esetében ezért nem pusztán az éves termelési volumen, hanem a hosszú távú stabilitás és kiszámíthatóság vált meghatározóvá.

Végezetül elmondható, hogy a napelemes energiatermelés hatékonysága továbbra is kritikus tényező marad a fenntartható villamosenergia-rendszerek kialakításában. Az eredmények alapján indokolt a klímametérek alapján történő fejlesztéspolitikai és szabályozási beavatkozások előtérbe helyezése, valamint a hőmérsékleti érzékenység csökkentését célzó technológiai innovációk ösztönzése. Az adaptív napelemes rendszerek térnyerése, valamint a régióspecifikus energiatervezés és klímaszimulációk integrációja kulcsfontosságúvá válik a jövőbeli energiasztratégiák sikeres megvalósítása érdekében.

A szimulációk eredményei megerősítik, hogy a napelemes energiatermelés jövője nemcsak országos, hanem térségi szinten is érdemi klímaadaptációs kihívásokkal szembesül. E megállapítások jelentőséggel bírnak az értekezés hipotéziseinek értékelése és tudományos eredményeinek összegzése szempontjából, amely a következő fejezetekben kerül bemutatásra.

Összegzett következtetések

Hipotézisek értékelése

A disszertáció központi céljaként a magyar villamosenergia-rendszer fenntartható átalakításának tudományos megalapozása került kitézésre, különös tekintettel a gazdasági optimalizáció, a megújulóenergia-integráció és a klímaváltozáshoz való adaptáció összefüggéseire. A kutatás során négy egymásra épülő vizsgálati egység került kialakításra, amelyekhez specifikus hipotézisek tartoztak. Ezen hipotézisek tematikusan elkülönülve, de együttes hatásukkal a diverzifikált és klímatudatos energiaellátás lehetőségeinek feltérképezését szolgálták. A kvantitatív vizsgálatok keretében a hipotézisek megfogalmazása megtörtént, majd azokat szimulációs, modellezési és statisztikai elemzések alapján tesztelésnek vetették alá. Az alábbiakban a hat hipotézis bemutatása és értékelése történik meg.

H1: A 2030-ra várható villamosenergia-portfólió költség- és szén-dioxid-kibocsátási minimuma abszolút értékben növekedni fog, míg fajlagos értéke csökkenni fog a 2021-es állapothoz képest.

Értékelés: **Részben elfogadva.**

Alkalmazott módszer: Lineáris programozás, portfólió-optimalizáció, szenárióelemzés
A szimulációk alapján a 2030-as import ráta forgatókönyvek minden esetben csökkenő tendenciát mutattak a fajlagos mutatók tekintetében. Ez a tendencia a megújuló energiaforrások térnyerésével és a fosszilis technológiák visszaszorulásával hozható összefüggésbe. Az abszolút értékek esetében ugyanakkor nem volt megállapítható egyértelmű növekedési irány. A megállapítások alapján a hipotézis csak részben tekinthető igazoltnak.

H2: A háztartási méretű napelemes rendszerek megtérülését jelentősen rontja, és szélsőséges esetben lehetetlenné is teheti a nagy értékű rendszeres elemek projektidőszakon belüli cseréje.

Értékelés: **Elfogadva.**

Alkalmazott módszer: HOMER szimuláció, pénzügyi modellezés, projekt elemzés
A modellezés során kimutatásra került, hogy az inverter és akkumulátor cseréje jelentős költségemelkedéssel és a megtérülés elhúzódnásával járhat. A negatív nettó jelenérték kockázata is kimutatásra került, ezáltal a hipotézis megerősítést nyert.

H3a: Az RCP forgatókönyvek szerint a szélerőművek nagyobb érzékenységet mutatnak a klímaváltozás hatásaira, mint a naperőművek.

Értékelés: **Elfogadva.**

Alkalmazott módszer: Kapacitásfaktor-számítás, RCP szimulációk, idősoros-elemzés
A szimulációk és kapacitásfaktor-vizsgálatok igazolták, hogy a szélerőműveket nagyobb mértékben érintik az éghajlati változások. A naperőművek esetében kisebb mértékű és kiegyensúlyozottabb hatások voltak azonosíthatók. A hipotézis teljes mértékben igazoltnak tekinthető.

H3b: A nap- és szélerőművek kombinálásával csökkenthetők az időjárásfüggő ingadozások, és stabilabb energiatermelés érhető el.

Értékelés: **Elfogadva.**

Alkalmazott módszer: Szórás-elemzés (hozamvolatilitás), portfólió-diverzifikáció
A diverzifikált portfóliók elemzése igazolta, hogy az egyoldalú technológiai alkalmazással szemben a kombinált megoldások alacsonyabb termelési szórást és nagyobb ellátásbiztonságot biztosítottak. A hipotézis megerősítést nyert.

H4a: A 21. század során Magyarországon a növekvő éves átlaghőmérséklet csökkenti a napelemes rendszerek hatásfokát.

Értékelés: **Részben elfogadva.**

Alkalmazott módszer: Szimuláció, lineáris regresszió, Pearson- és parciális korreláció
A modellek többségében negatív kapcsolat került kimutatásra az átlaghőmérséklet és a villamosenergia-termelés között. Ugyanakkor nem minden forgatókönyv és régió esetében volt szignifikáns a kapcsolat, így a hipotézis csak részlegesen igazolható.

H4b: A 21. század során a napelemes rendszerek termelésében regionális eltérések fognak megjelenni Magyarországon.

Értékelés: **Elfogadva.**

Alkalmazott módszer: Lineáris regresszió, hierarchikus klaszteranalízis (dendrogram)
A klaszteranalízis alapján az ország több, jellemző klimatikus zónára osztható, ahol eltérő termelési trendek kerültek azonosításra. A hipotézis teljes mértékben igazoltnak tekinthető.

Tudományos eredmények

A disszertáció célja egy fenntartható és klímaadaptív villamosenergia-termelési modell tudományos megalapozása volt Magyarország számára. A kutatás egységes elemzési keret mentén valósult meg, amely a hazai villamosenergia-termelés portfólióoptimalizálását, a háztartási napelemes rendszerek fenntarthatóságát, a megújuló klímaérzékenységet, valamint a napsugárzás- és hőmérsékletváltozások hosszú távú hatásait vizsgálta. E négy tematikusan összefüggő vizsgálati irány közül három új tudományos eredményeket szolgáltatott, míg a háztartási rendszerek elemzése alkalmazott kutatásként járult hozzá a szakterület gazdasági és szabályozási kérdéseinek pontosításához.

Új tudományos eredmények:

- **A magyarországi erőművi portfólió optimalizációja költség- és szén-dioxid-kibocsátás szempontjából**

Kifejlesztésre került egy lineáris programozási algoritmusra épülő optimalizációs modell, amely az LCOE és az LCA(CO₂) szempontjából képes az erőművi portfóliók összeállítását vizsgálni. A modell a 2030-as magyar energiapolitikai célkitűzések, a Paks II projekt csúszása és a villamosenergia-igények növekedése által előidézett piaci feltételek mellett került alkalmazásra.

A modell alapján az LCOE- és LCA(CO₂)-minimum értékek eltérő erőmű struktúrát eredményeznek. A kompromisszumos optimumot képviselő portfólióban a napenergia dominanciája mellett mérsékelt földgáz- és nukleáris részarány szerepel. Ez az energiamix teljesíti a karbonsemlegességi és gazdaságossági szempontokat egyaránt. A szimulációk 20-30%-os importarány mellett többféle optimális LCOE/LCA-párokat azonosítottak, melyek mindegyike megfelel az elvárt klímacéloknak, miközben figyelembe veszik az energiafüggetlenség és az ipari elektrifikáció követelményeit.

- **Nap- és szélerőművi kapacitásfaktorok forgatókönyv alapú érzékenységvizsgálata**

Elsőként került sor a Copernicus C3S adatbázison alapuló regionális regresszió- és szórásanalízisre, amely az RCP2.6, RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek alapján

vizsgálta a szél- és napenergia-termelési kapacitásfaktorokat Magyarország területén.

A szélerőművek kapacitásfaktorában jelentős térbeli és időbeli változékonyság volt megfigyelhető, míg a naperőművek esetén ezek stabilabbnak bizonyultak. A két energiaforrás kombinálása csökkenti az időjárásfüggő ingadozásokat, mérséklet kapacitásfaktor csökkenés és kisebb szórás (kockázat) mellett.

- **Napelemes teljesítményváltozások klaszteralapú térségi besorolása RCP forgatókönyvek alapján**

A System Advisor Model (SAM) segítségével végzett teljesítményszimulációk alapján hierarchikus klaszteranalízis történt, amely három, jól elhatárolható térségi klasztert azonosított Magyarország területén. A klaszterképzés alapját a napelemek regressziós meredeksége és éves hozamai képezték.

A klaszterelemzés során az RCP2.6 és RCP8.5 forgatókönyvek között nagyobb hasonlóság mutatkozott, mint az RCP4.5 köztes scenárióhoz képest. Ez a megfigyelés ellentmond a nemzetközi szakirodalomban gyakran feltételezett monoton emissziós-hatás összefüggésnek, és új értelmezési keretet kínál a középtávú adaptációs stratégiák számára.

Újszerű tudományos értékek:

- **Háztartási méretű napelemes rendszerek hosszú távú gazdasági fenntarthatóságának vizsgálata**

A Napenergia Plusz Program keretében vizsgált tizenkét rendszerkonstrukció szimulációja alapján megállapítható, hogy a rendszerelemek – különösen az inverterek és az akkumulátorok – időszakos, támogatáson kívüli cseréje jelentős költségcsúcsokat eredményez, amelyek markáns töréseket okoznak a megtérülési görbékben. Több vizsgált esetben a beruházás teljes élettartama alatt sem térül meg a befektetett tőke, azaz a projekt pénzügyi megtérülési ideje meghaladja a számítási horizontot. Ezekben az esetekben a nettó jelenérték (NPV) is tartósan negatív marad, ami arra utal, hogy a jelenlegi támogatási rendszer nem minden konstrukció esetében rentábilis.

Ajánlás

A disszertáció tematikusan és módszertanilag egységes kutatási programként válaszol a villamosenergia-termelés diverzifikációját és klímaadaptációját érintő kérdésekre. A feltárt kutatási eredmények alapján megállapítható, hogy a fenntartható és alkalmazkodóképes villamosenergia-rendszer kialakítása csak akkor lehet sikeres, ha egyidejűleg érvényesül a társadalmi igazságosság, a gazdasági racionalitás és a klímaváltozásból eredő hosszú távú kockázatok kezelése. Az eredmények több tudományterület integrációján keresztül kínálnak alkalmazható irányokat a jövőbeli energetikai fejlesztésekhez, és konkrét javaslatokat fogalmaznak meg az energiapolitikai tervezés számára.

Társadalmi szempontból kiemelten fontos, hogy az energetikai átmenet a méltányosság és az esélykiegyenlítés elve mentén történjen. A kutatás során igazolást nyert, hogy a háztartási méretű napelemes rendszerek gazdaságosságát alapvetően nem a technológiai paraméterek, hanem a fogyasztási szokások és a visszatáplálási feltételek határozzák meg. Ennek alapján indokolt egy olyan támogatási rendszer kialakítása, amely nem csupán az energiatermelés mennyiségét, hanem a fogyasztói magatartást és a rendszerhasználat jellegét is figyelembe veszi. A lakossági beruházásokhoz való méltányos hozzáférés biztosítása érdekében differenciált, célzott támogatási konstrukciók bevezetése javasolt, különös tekintettel az energiaszegénységben élő háztartásokra. Az energiafüggetlenség és a rezsiköltségek csökkentése csak akkor válhat széles körben elérhetővé, ha az energiapolitika aktívan kezeli a jövedelmi és regionális különbségeket. Ehhez elengedhetetlen az energiatudatosság növelése és az állampolgári részvétel erősítése, amely hosszú távon a társadalmi elfogadottság növekedését is eredményezheti.

Gazdasági oldalról a modellezések és érzékenységvizsgálatok azt mutatják, hogy a megújuló energiaforrások, különösen a napenergia, a teljes élettartamra vetített költségek (LCOE) alapján is versenyképes alternatívát jelentenek. Ugyanakkor a beruházások kiszámíthatóságát jelentősen befolyásolja a szabályozási környezet stabilitása. Ezért stratégiai fontosságú egy hosszú távon konzisztens és átlátható szabályozási keretrendszer kialakítása, amely biztonságot nyújt a piaci szereplők számára. A visszatáplálási tarifák és a hálózathasználati feltételek kiszámíthatósága elengedhetetlen az egyéni és közösségi beruházások ösztönzése érdekében. A gazdasági fenntarthatóság szempontjából nem elegendő az alacsony LCOE értékek elérése, hanem szükséges az

energiaellátási rendszer teljes élettartamra vetített költségeinek optimalizálása is, beleértve a rendszerirányítás, a rugalmassági tartalékok és az energiatárolás költségeit.

A klímaváltozástól eredő kockázatok kezelése a kutatás egyik központi eleme volt. Az RCP klímaforgatókönyveken alapuló szimulációk szerint a megújuló alapú energiatermelés potenciálja térben és időben jelentős eltéréseket mutat. A nap- és szélenergiatermelés érzékenysége vizsgálatát alapján megállapítható, hogy a szélenergia teljesítménye fokozottan érzékeny az éghajlati változásokra, míg a napenergia termelése stabilabb képet mutat. A rendszerszintű volatilitás csökkentése érdekében olyan erőművi portfóliók kialakítása ajánlott, amelyek a nap- és szélenergia kiegészítő jellegére építenek. A jövőbeli napelemes energiatermelés szimulációi alapján világossá vált, hogy a délkeleti régiók kedvezőbb besugárzási viszonyai révén előnyösebb hozampotenciállal rendelkeznek, míg az északnyugati térségekben technológiai adaptációra lehet szükség. Az energiastratégiák tervezésénél ezért már most integrálni szükséges a regionális eltérések figyelembevételét és az alkalmazkodóképességet javító eszközök bevezetését.

Összegzésként megállapítható, hogy a jövő energiarendszerének sikeressége azon múlik, hogy képes-e egyszerre választ adni a társadalmi méltányosság, a gazdasági életképesség és a klímaváltozással szembeni alkalmazkodás kihívásaira. A disszertációban bemutatott tudományos eredmények és elemzések ehhez megalapozott, kvantitatív módszerekkel alátámasztott irányokat kínálnak, hozzájárulva a jövő energiapolitikai döntéseinek szakmailag megalapozott támogatásához.

Irodalomjegyzék

A Jelölt által felhasználásra kerülő források

- [1] Nemzeti Energia- és Klímaterv, 2020, Elérhető: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/hu_final_necp_main_hu_0.pdf [Hozzáférés: 2024. március 11.]
- [2] Magyarország Kormánya, „Orbán Viktor beszéde...”, Kormány.hu, Elérhető: <https://kormany.hu/beszedek-interjuk/miniszterelnok/orban-viktor-beszede-a-magyar-kereskedelmi-es-iparkamara-gazdasagi-evnyito-esemenyen-20230309> [Hozzáférés: 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 [Hozzáférés: 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> [Hozzáférés: 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> [Hozzáférés: 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> [Hozzáférés: 2024. május 03.]
- [7] S. Smit, L. Jánoskúti, A. Havas, P. Puskás és 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 [Hozzáférés: 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 [Hozzáférés: 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, doi: 10.1016/j.renene.2021.08.088
- [10] „LCOE V16.0”, Lazard 2023, Elérhető: <https://www.lazard.com/media/typdggmm/lazards-lcoeplus-april-2023.pdf> [Hozzáférés: 2024. március 18.]
- [11] Macrotrends, Euro Dollar Exchange Rate (EUR USD), Elérhető: <https://www.macrotrends.net/2548/euro-dollar-exchange-rate-historical-chart> [Hozzáférés: 2024. július 8.]
- [12] I. Bodnár, „Villamosenergia-termelés környezeti hatásainak elemzése”, Multidiszciplináris tudományok, 11. kötet. (2021) 4 sz. pp. 382-394. Elérhető: doi: 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 [Hozzáférés: 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 [Hozzáférés: 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 [Hozzáférés: 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: doi: 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: doi: 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> [Hozzáférés: 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: doi: 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 [Hozzáférés: 2024. március 18.]
- [21] Mathworks, Elérhető: https://www.mathworks.com/help/optim/ug/linprog.html#responsive_offcanvas [Hozzáférés: 2024. április 18.]
- [22] B. Glevitzky, „Operációkutatás I.”, Debreceni Egyetem, 2003, Elérhető: <https://gyires.inf.unideb.hu/mobiDiak/Glevitzky-Bela/Operaciokutatas-1/opkut1.pdf> [Hozzáférés: 2024. április 18.]
- [23] REKK, 2019, Elérhető: https://rekk.hu/downloads/projects/2019_REKK_NEKT_megujulo_final.pdf [Hozzáférés: 2024. ápr. 11.]
- [24] J. Szőnyi, L. Rybach, L. Lenkey, T. Hámor, F. Zsemle, E. Pulay, T. Mátrahalmi, I. Striczki, T. Lengyel, Zs. Csernóczki, Á. Zahorán, J. Pápay és 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 [Hozzáférés: 2024. ápr. 11.]
- [25] O. Toldi, „A megújuló energia ellátásbiztonságra gyakorolt hatása, 2021”, klmapolitikaintezet.hu, Elérhető: <https://klmapolitikaintezet.hu/elemzes/a-megujulo-energia-ellatasbiztonsagra-gyakorolt-hatasa> [Hozzáférés: 2024. ápr. 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 [Hozzáférés: 2024. ápr. 18.]
- [27] MAGYAR KÖZLÖNY, 2011. évi 119. sz, Elérhető: https://njt.hu/document/5d/5df020114130000077_1.PDF [Hozzáférés: 2024. ápr. 18.]
- [28] A. Aszódi, „A villamosenergia-fogyasztás növekedéséről”, 2015. december 05., Elérhető: https://aszodiattila.blog.hu/2015/12/05/a_villamosenergia-fogyasztas_novekedeserol [Hozzáférés: 2024. ápr. 18.]
- [29] European Comission, Modernisation Fund, Elérhető: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/modernisation-fund_en [Hozzáférés: 2024. ápr. 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> [Hozzáférés: 2024. ápr. 21.]
- [31] „Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal”, Elérhető: <https://mekh.hu/eves-adatok> [Hozzáférés: 2024. szeptember 21.]
- [32] „Így termelt áramot Magyarország 2023-ban - Villanyautósok”, Elérhető: <https://villanyautosok.hu/2024/02/17/igy-termelt-aramot-magyarorszag-2023-ban/> [Hozzáférés: 2024. szept. 21.]
- [33] S. Shahzad és E. Jasińska, „Renewable Revolution: A Review of Strategic Flexibility in Future Power Systems”, Sustainability 2024, Vol. 16, Page 5454, köt. 16, sz. 13, o. 5454, jún. 2024, doi: 10.3390/SU16135454.
- [34] „Itt az új lakossági napelemes pályázat: jó lehetőség, de nagyon oda kell figyelni - Portfolio.hu”, Elérhető: <https://www.portfolio.hu/gazdasag/20231205/itt-az-uj-lakossagi-napelemes-palyazat-jo-lehetoseg-de-nagyon-oda-kell-figyelni-655709> [Hozzáférés: 2024. szept. 21.]
- [35] „15.1.1.44. Villamosenergia-ellátás”, Elérhető: https://www.ksh.hu/stadat_files/kor/hu/kor0044.html [Hozzáférés: 2024. szept. 21.]
- [36] „MVM ~ Átlagos éves fogyasztás”, Elérhető: <https://www.mvmnext.hu/aram/pages/aloldal.jsp?id=550565> [Hozzáférés: 2024. szept. 21.]
- [37] E. Durkó, L. Huzsvai, és M. Csipkés, „Városi és vidéki háztartások villamosenergia fogyasztásának modellezése Magyarországon”, E-conom, köt. 5, sz. 2, o. 28–41, 2016, doi: 10.17836/EC.2016.2.028.
- [38] „Szaldó elszámolás, bruttó elszámolás? Útmutató (2024) - EnergoOptimo Kft.”, Elérhető: <https://www.energooptimo.hu/hirek-ujdontasagok/szaldo-elszamolas-brutto-elszamolas/> [Hozzáférés: 2024. szept.21.]
- [39] „MVM - Villamosenergia-díjak az egyetemes szolgáltatásban lakossági ügyfeleknek 2022. augusztus 1-jétől”, Elérhető: <https://www.mvmnext.hu/aram/servlet/download?type=file&id=15882> [Hozzáférés: 2024. szept. 21.]
- [40] „Napelemesek, itt vannak a bruttó elszámolás átvételi árai - Villanyautósok”, [Elérhető: <https://villanyautosok.hu/2023/12/30/napelemesek-itt-vannak-a-brutto-elszamolas-atveteli-arai/> [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]
- [41] „Jolywood HD108N 415W NCell DoubleGlass - WattBolt”, Elérhető: <https://www.wattbolt.com/Jolywood-HD108N-415W-NCell-DoubleGlass> [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]

- [42] „SpolarPV 415HM6-54L Black Frame - WattBolt”, Elérhető: <https://www.wattbolt.com/SpolarPV-415HM6-54L-Black-Frame> [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]
- [43] „Deye 5kW (SUN-5K-SG04LP3-EU) Napelem inverter árak összehasonlítása, 5 kW SUN 5 K SG 04 LP 3 EU boltok”, Elérhető: <https://napelem-inverter.arukereso.hu/deye/5kw-sun-5k-sg04lp3-eu-p1049241496/> [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]
- [44] „Huawei SUN2000-4KTL-M1 4 kW Napelem inverter árak összehasonlítása, SUN 2000 4 KTL M 1 4 kW boltok”, Elérhető: <https://napelem-inverter.arukereso.hu/huawei/sun2000-4ctl-m1-4-kw-p859003506/> [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]
- [45] „Huawei SUN2000-5KTL-M1-HC 5 kW Napelem inverter árak összehasonlítása, SUN 2000 5 KTL M 1 HC 5 kW boltok”, Elérhető: <https://napelem-inverter.arukereso.hu/huawei/sun2000-5ctl-m1-hc-5-kw-p859001304/> [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]
- [46] „Fronius Symo GEN24 4.0 Plus háromfázisú osztrák HIBRID inverter napelemes rendszerhez - eMAG.hu”, Elérhető: <https://www.emag.hu/fronius-symo-gen24-4-0-plus-haromfazisu-osztrak-hibrid-inverter-napelemes-rendszerhez-symogen244-0plus/pd/DY9C9TMBM/> [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]
- [47] „Fronius Symo GEN24 5.0 Plus háromfázisú osztrák HIBRID inverter napelemes rendszerhez - eMAG.hu”, Elérhető: <https://www.emag.hu/fronius-symo-gen24-5-0-plus-haromfazisu-osztrak-hibrid-inverter-napelemes-rendszerhez-symogen245-0plus/pd/D29C9TMBM/> [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]
- [48] „LFRX51200-01 10.24kWh LV akkumulátor - WattBolt”, Elérhető: <https://www.wattbolt.com/LFRX51200-01-10-24kWh-LV-akkumulator> [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]
- [49] „Huawei LUNA2000-5-E0 akkumulátor, LifePo4, 5,0 kWh - eMAG.hu”, Elérhető: <https://www.emag.hu/huawei-akkumulator-lifepo4-5-0-kwh-luna2000-5-e0/pd/DFH98ZMBM/> [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]
- [50] „Napenergia BYD Energy Storage BATTERY-BOX 4 kWh (HVS 10.2)”, Elérhető: https://www.senetic.hu/product/HVS_102 [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]
- [51] „Napenergia BYD Energy Storage BATTERY-BOX HVM 8.28 kWh (HVM 8.3)”, Elérhető: https://www.senetic.hu/product/HVM_83 [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]
- [52] „Napenergia Plusz Program 2. számú módosítás, NFFÜ Zrt., (2024. augusztus 6.)”, Elérhető: https://napenergiaplus.nffku.hu/files/01_Felhivas_lakossagi_PV_2_szamu_modositasa_240806.pdf [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]
- [53] „Intro - Meteonorm (de)”, Elérhető: <https://meteonorm.com/> [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]
- [54] D. Ciobanu, E. Eftimie and C. Jaliu, „The influence of measured/simulated weather data on evaluating the energy need in buildings”, Energy Procedia, köt. 48, o. 796–805, 2014, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2014.02.092.
- [55] „HOMER Grid | Design and Optimization Software for Solar, Energy Storage and Microgrids”, Elérhető: <https://homerenergy.com/products/grid/index.html> [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]
- [56] B. Zhao, X. Zhang, J. Chen, C. Wang and L. Guo, „Operation optimization of standalone microgrids considering lifetime characteristics of battery energy

- storage system”, IEEE Trans Sustain Energy, köt. 4, sz. 4, o. 934–943, 2013, doi: 10.1109/TSTE.2013.2248400.
- [57] S. C. Bhattacharyya, „Energy economics: Concepts, issues, markets and governance, 2nd ed. 2019”, Energy Economics: Concepts, Issues, Markets and Governance, 2nd ed. 2019, o. 1–849, jan. 2019, doi: 10.1007/978-1-4471-7468-4/COVER.
- [58] T. Lambert, P. Gilman and P. Lilienthal, „Micropower System Modeling with Homer”, Integration of Alternative Sources of Energy, o. 379–418, ápr. 2006, doi: 10.1002/0471755621.CH15.
- [59] D. Connolly, H. Lund, B. V. Mathiesen and M. Leahy, „A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems”, Appl Energy, köt. 87, sz. 4, o. 1059–1082, ápr. 2010, doi: 10.1016/J.APENERGY.2009.09.026.
- [60] M. R. Islam, S. Mekhilef and R. Saidur, „Progress and recent trends of wind energy technology”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, köt. 21, o. 456–468, máj. 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2013.01.007.
- [61] Y. A. Katsigiannis, P. S. Georgilakis and E. S. Karapidakis, „Multiobjective genetic algorithm solution to the optimum economic and environmental performance problem of small autonomous hybrid power systems with renewables”, IET Renewable Power Generation, köt. 4, sz. 5, o. 404–419, szept. 2010, doi: 10.1049/IET-RPG.2009.0076.
- [62] A. Diallo, A. Mezösi, és A. Selei, „A SZÉLENERGIA MAGYARORSZÁGI BŐVÍTÉSÉNEK MODELLEZÉSE”, Elérhető: https://energiaklub.hu/files/study/REKK_Szel_final.pdf [Hozzáférés: 2024. szept. 25.]
- [63] J. López Prol, F. de Llano Paz, A. Calvo-Silvosa, S. Pfenninger, and I. Staffell, “Wind-solar technological, spatial and temporal complementarities in Europe: A portfolio approach,” Energy, vol. 292, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.130348
- [64] IEA, “Renewables”, iea.org, Elérhető: <https://www.iea.org/energy-system/renewables> [Hozzáférés: 2024. febr. 20.]
- [65] IEA, “Solar PV”, iea.org, Elérhető: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv> [Hozzáférés: 2024. febr. 20.]
- [66] IEA, “Wind,” iea.org, Elérhető: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/wind> [Hozzáférés: 2024. febr. 20.]
- [67] Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal, “4.2. Bruttó villamosenergia-termelés”, Elérhető: https://mekh.hu/download/3/22/61000/4_2_brutto_villamos_energia_termeles_elves_2014_2023E.xlsx [Hozzáférés: 2024. febr. 20.]
- [68] Európa Tanács, “REPowerEU: energiapolitika az uniós országok helyreállítási és rezilienciaépítési terveiben”, Elérhető: <https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/eu-recovery-plan/repowereu/> [Hozzáférés: 2024. febr. 24.]
- [69] D. Farkas, “Megújuló energiaforrások a RePower EU tervében”, MTVSZ blog, Elérhető: https://mtvsz.blog.hu/2023/11/14/megujulo_energiaforrasok_a_repower_eu_tervben?utm_medium=lista&utm_campaign=bloghu_cimlap&utm_source=nagyvilag [Hozzáférés: 2024. febr. 24.]
- [70] P. Vígh, “Közelíti Magyarországot a klímasemlegességhez, de továbbra sem ériük el vele” A frissített Nemzeti Energia és Klímaterv szakmai-civil értékelése, Másfélfok, Elérhető: <https://masfelfok.hu/2023/10/16/magyarorszag-nemzeti->

- [energia-klimaterv-klimasemlegesség-eu-szakmai-civil-ertekeles/](#) [Hozzáférés: 2024. febr. 22.]
- [71] Nemzeti Energia- és Klímaterve, Comission Europa, Elérhető: https://commission.europa.eu/system/files/2023-09/HUNGARY%20-%20DRAFT%20UPDATED%20NECP%202021-2030%20_HU.pdf [Hozzáférés: 2024. febr. 22.]
- [72] Copernicus Climate Change Service, Energy sector, copernicus.eu, Elérhető: <https://climate.copernicus.eu/energy> [Hozzáférés: 2024. febr. 22.]
- [73] About Copernicus, copernicus.eu, Elérhető: <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus> [Hozzáférés: 2024. febr. 22.]
- [74] E. Juhász, J. Herczegh és N. Pete, "Regionális fejlettség a magyarországi civil szektorban", Civil Dimenziók 2012/1., Elérhető: http://www.kulturasz.hu/konyv_lap.php?szam=1003&foszam=1001 [Hozzáférés: 2024. febr. 22.]
- [75] Copernicus Climate Data Store, "CORDEX regional climate model data on single levels", Elérhető: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cordex-domains-single-levels?tab=overview> [Hozzáférés: 2024. febr. 22.]
- [76] Cs. Zs. Torma, "A Kárpát-medence domborzatának csapadékváltozásban betöltött szerepének vizsgálata regionális klímamodellek segítségével", In book: Aktuális környezeti problémák az időjárás és az éghajlat összefüggésében. Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája, January 2018, doi:10.31852/EMF.30.2018.159.166
- [77] Copernicus Climate Data Store, "Climate and energy indicators for Europe from 2005 to 2100 derived from climate projections", Elérhető: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/sis-energy-derived-projections?tab=overview> [Hozzáférés: 2024. febr. 22.]
- [78] T. He, D. Wang, and Y. Qu, "5.06 - Land Surface Albedo", Editor(s): Shunlin Liang, Comprehensive Remote Sensing, Elsevier, 2018, Pages 140-162, doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10370-7
- [79] D. P. van Vuuren, B. Eickhout, P. Lucas, and M. Elzen, "Long-Term Multi-Gas Scenarios to Stabilise Radiative Forcing – Exploring Costs and Benefits Within an Integrated Assessment Framework," The Energy Journal, vol. Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy, pp. 201–234, 2006, doi: 10.2307/23297082
- [80] D. P. van Vuuren, M. den Elzen, P. Lucas, B. Eickhout, B. Strengers, B. van Ruijven, S. Wonink, and R. van Houdt, "Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs", Climatic Change, 2007, doi: 10.1007/s10584-006-9172-9
- [81] L. Clarke, J. Edmonds, H. Jacoby, H. Pitcher, J. Reilly, and R. Richels, "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 pp., 2007, Elérhető: https://globalchange.mit.edu/sites/default/files/CCSP_SAP2-1a-FullReport.pdf [Hozzáférés: 2024. febr. 24.]
- [82] S. Smith and T. Wigley, "Multi-Gas Forcing Stabilization with the MiniCAM," The Energy Journal, vol. Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy, pp. 373–392, 2006, doi: 10.2307/23297091

- [83] M. Wise, K. Calvin, A. Thomson, L. Clarke, B. Bond-Lamberty, R. Sands, S. Smith, A. Janetos, and J. Edmonds, "Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy," *Science*, vol. 324, pp. 1183–1186, 2009
- [84] J. Fujino, R. Nair, M. Kainuma, T. Masui, and Y. Matsuoka, "Multi-Gas Mitigation Analysis on Stabilization Scenarios Using AIM Global Model," *The Energy Journal*, vol. Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy, pp. 343–354, 2006, doi: 10.2307/23297089
- [85] Y. Hijioka, Y. Matsuoka, H. Nishimoto, T. Masui, and M. Kainuma, "Global GHG emission scenarios under GHG concentration stabilization targets," *Journal of Global Environment Engineering*, vol. 13, pp. 97–108, 2008
- [86] K. Riahi and N. Nakicenovic, "Special Issue: Greenhouse Gases - Integrated Assessment", 2007, Elérhető: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/8191/> [Hozzáférés: 2024. márc. 10.]
- [87] "How to use different RCPs?", copernicus.eu <https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/2021-01/infosheet3.pdf> [Hozzáférés: 2024. márc. 10.]
- [88] ENTSO-E, entsoe.eu, Elérhető: <https://www.entsoe.eu/about/inside-entsoe/objectives/> [Hozzáférés: 2024. márc. 10.]
- [89] Climate Data Store, copernicus.eu, Elérhető: <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home> [Hozzáférés: 2024. márc. 10.]
- [90] Energiaklub tanulmány, "Szél és napenergia együtt", Elérhető: <https://energiaklub.hu/files/study/Energiaklub%20tanulma%CC%81ny%20-%20Sze%CC%81%20e%CC%81s%20napenergia%20egy%CC%88tt.pdf> [Hozzáférés: 2024. márc. 10.]
- [91] H. Zsiborács, A. Vincze, I. Háber, G. Pintér, and N. Hegedűsné Baranyai, "Challenges of Establishing Solar Power Stations in Hungary," *Energies*, vol. 16, no. 1, p. 530, 2023, doi: 10.3390/en16010530
- [92] Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal, "7.4 Eurostat típusú országos részletes energiamérleg (éves) 2014-2022.", MEKH. Elérhető: https://www.mekh.hu/download/9/00/61000/7_4_orzagos_eves_%20Eurostat_%20tipusu_%20reszletes_%20energiamerleg_2014_2022.xlsx [Hozzáférés: 2023. április 10.]
- [93] "Climate/Weather", ELTE, Elérhető: <https://www.elte.hu/en/about-hungary/climate> [Hozzáférés: 2024. február 10.]
- [94] D. D'Agostino, P. M. Congedo, P. M. Albanese, A. Rubino, and C. Baglivo, "Impact of climate change on the energy performance of building envelopes and implications on energy regulations across Europe", *Energy*, Volume 288, 2024, 129886, doi: 10.1016/j.energy.2023.129886
- [95] J. Bartholy, R. Pongrácz, and I. Pieczka, "How the climate will change in this century?", *Hungarian Geographical Bulletin* 63 (1) (2014) 55–67.; doi: 10.15201/hungeobull.63.1.5
- [96] N. Skarbit, J. Unger, and T. Gál, "Projected Values of Thermal and Precipitation Climate Indices for the Broader Carpathian Region Based on EURO-CORDEX Simulations", *Hungarian Geographical Bulletin* 2022. 71 (4), 325-47. doi: 10.15201/hungeobull.71.4.2
- [97] D. Komlós, and M. Mirkovic, "Soil in the Pannonian plains: on the East of the West and the West of the East", *Agroberichten Buitenland*, Elérhető: <https://www.agroberichtenbuitenland.nl/actueel/nieuws/2020/05/06/soil-in-the-pannonian-plains> [Hozzáférés: 2024. febr. 24.]

- [98] R. R. Hernandez, S. B. Easter, M. L. Murphy-Mariscal, F. T. Maestre, M. Tavassoli, E. B. Allen, C. W. Barrows, J. Belnap, R. Ochoa-Hueso, S. Ravi, and M. F. Allen, "Environmental impacts of utility-scale solar energy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 766–779, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.041
- [99] Copernicus Climate Change Service, "Climate and energy indicators for Europe from 2005 to 2100 derived from climate projections," Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2021, doi: 10.24381/cds.f6951a62
- [100] J. A. Duffie, W. A. Beckman, and N. Blair, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley and Sons, 1991, ISBN: 978111954031 1.
- [101] S. Singh, "Solar Irradiance Concepts: DNI, DHI, GHI & GTI," Knowledge, Solar Energy. Elérhető: <https://www.yellowhaze.in/solar-irradiance/> [Hozzáférés: 2024. márc. 10.]
- [102] T. Markvart and L. Castañer, "Chapter I-1-A – Principles of Solar Cell Operation," in *McEvoy's Handbook of Photovoltaics*, 3rd ed., S. A. Kalogirou, Ed. Academic Press, 2018, pp. 3–28, doi: 10.1016/B978-0-12-809921-6.00001-X
- [103] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, and R. Stewart, "Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance," *Solar Energy*, vol. 44, no. 5, pp. 271–289, 1990, doi: 10.1016/0038-092X(90)90055-H
- [104] T. Markvart and L. Castañer, "Chapter I-1-A – Principles of Solar Cell Operation," in *McEvoy's Handbook of Photovoltaics*, 3rd ed., S. A. Kalogirou, Ed. Academic Press, 2018, pp. 3–28, doi: 10.1016/B978-0-12-809921-6.00001-X
- [105] Green Rhino Energy, "PV Electronics," Green Rhino Energy. Elérhető: https://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_electronics.php. [Hozzáférés: 2024. márc. 10.]
- [106] M. Seapan, Y. Hishikawa, M. Yoshita, and K. Okajima, "Temperature and irradiance dependences of the current and voltage at maximum power of crystalline silicon PV devices," *Solar Energy*, vol. 204, pp. 459–465, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.05.019
- [107] M. Belarbi, A. Stambouli, E. H. Belarbi, and K. Haddouche, "A new algorithm of parameter estimation of a photovoltaic solar panel," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 24, pp. 276–284, 2016, doi: 10.3906/elk-1308-60.
- [108] A. Mermoud, "How is evaluated the 'Low-light' efficiency?," *PV Components*, Mar. 25, 2013. Elérhető: <https://forum.pvsyst.com/topic/22-how-is-evaluated-the-low-light-efficiency/> [Hozzáférés: 2024. márc. 10.]
- [109] N. M. Kumar, R. P. Gupta, M. Mathew, A. Jayakumar, and N. K. Singh, "Performance, energy loss, and degradation prediction of roof-integrated crystalline solar PV system installed in Northern India," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 13, 100409, 2019, doi: 10.1016/j.csite.2019.100409
- [110] T. Rahman, A. A. Mansur, M. S. H. Lipu, M. S. Rahman, R. H. Ashique, M. A. Houran, R. M. Elavarasan, and E. Hossain, "Investigation of Degradation of Solar Photovoltaics: A Review of Aging Factors, Impacts, and Future Directions toward Sustainable Energy Management," *Energies*, vol. 16, no. 9, p. 3706, 2023, doi: 10.3390/en16093706
- [111] M. Meinshausen, S. J. Smith, K. V. Calvin, J. S. Daniel, M. L. T. Kainuma, J.-F. Lamarque, K. Matsumoto, S. A. Montzka, S. C. B. Raper, K. Riahi, A. M. Thomson, G. J. M. Velders, and D. van Vuuren, "The RCP greenhouse gas

- concentrations and their extensions from 1765 to 2300," *Climatic Change*, vol. 109, p. 213, 2011, doi: 10.1007/s10584-011-0156-z
- [112] D. P. van Vuuren, M. G. J. den Elzen, P. L. Lucas, B. Eickhout, B. J. Strengers, B. van Ruijven, S. Wonink, and R. van Houdt, "Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs," *Climatic Change*, vol. 81, pp. 119–159, 2007, doi: 10.1007/s10584-006-9172-9
- [113] L. E. Clarke, J. A. Edmonds, H. D. Jacoby, H. M. Pitcher, J. M. Reilly, and G. R. Richels, *Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations*, U.S. Department of Energy Publications, Elérhető: <https://core.ac.uk/download/pdf/17231294.pdf> [Hozzáférés: 2024. márc. 10.]
- [114] S. J. Smith and T. M. L. Wigley, "Multi-Gas Forcing Stabilization with Minicam," *The Energy Journal*, vol. 27, pp. 373–391, 2006, Elérhető: <http://www.jstor.org/stable/23297091>. [Hozzáférés: 2024. márc. 22.]
- [115] M. Wise, K. Calvin, A. Thomson, L. Clarke, B. Bond-Lamberty, R. Sands, S. J. Smith, A. Janetos, and J. Edmonds, "Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy," *Science*, vol. 324, pp. 1183–1186, 2009, doi: 10.1126/science.1168475
- [116] K. M. A. Parker and M. R. Mainelli, "What happens if we ‘burn all the carbon’? Carbon reserves, carbon budgets, and policy options for governments," *Environmental Science: Atmospheres*, vol. 4, no. 4, pp. 435–454, 2024, doi: 10.1039/d3ea00107e.
- [117] K. Riahi, A. Grübler, and N. Nakicenovic, "Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 74, no. 7, pp. 887–935, 2007, doi: 10.1016/j.techfore.2006.05.026
- [118] *Meteonorm 8, Handbook Part II: Theory, Version 8.1*, Oct. 2021. Elérhető: https://meteonorm.com/assets/downloads/mn81_theory.pdf. [Hozzáférés: 2024. márc. 22.]
- [119] U. Shahzad, "Analysis of Solar System Models Using System Advisor Model Simulations," *Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science (JEECCS)*, vol. 9, no. 31, pp. 23–32, 2023.
- [120] Zs. Hollósy, J. Poór, and J. Tóth, "Háztartási méretű kiserőművek: Napelemes rendszerek gazdaságossági vizsgálata," *Studia Mundi – Economica*, vol. 6, pp. 22–33, Mar. 28, 2019, doi: 10.18531/Studia.Mundi.2019.06.01.22-33
- [121] W. Gu, T. Ma, M. Li, L. Shen, and Y. Zhang, "A coupled optical-electrical-thermal model of the bifacial photovoltaic module," *Applied Energy*, vol. 258, 114075, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114075
- [122] R. Taylor, "Interpretation of the Correlation Coefficient: A Basic Review," *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, vol. 6, pp. 35–39, 1990, doi: 10.1177/875647939000600106
- [123] I. Maryati, T. S. Sumartini, and D. Sofyan, "Experiences of Pearson formula in analysis regression," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1098, no. 3, 032088, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1098/3/032088

A Jelölt által írt, az értekezéshez kapcsolódó publikációk

- [BN-1] N. Bozsik, "A jövőbeli erőművi portfólió elemzés költség- és kibocsátás minimum optimalizálás szempontjából," *International Journal of Engineering and Management Sciences*, vol. 9, no. 3, pp. 61–77, 2024, doi: 10.21791/IJEMS.2024.025.
- [BN-2] N. Bozsik and I. Takács, "Háztartási napelemes rendszerek gazdasági és környezeti vizsgálata – Economic and Environmental Assessment of Household Solar Systems," *Gradus*, vol. 12, no. 1, p. 1, 2025. doi: 10.47833/2025.1.ENG.005
- [BN-3] N. Bozsik és I. Takács, "Az RCP klíma forgatókönyveken alapuló nap-szélerőmű kapacitásfaktor horizontális és vertikális elemzése", *Multidiszciplináris tudományok*, 15. kötet. (2025) 1 sz. **pp. xx-yy**, doi: **feltöltés alatt**: (<https://ojs.uni-miskolc.hu/index.php/multi/issue/view/261>)
- [BN-4] N. Bozsik és I. Takács, "A klímaváltozás okozta felmelegedés hatása a közepes méretű napelemes erőművek teljesítményére", *Studia Mundi – Economica*, Vol. 12. No. 1. (2025), doi: 10.18531/sme.vol.12.no.1.pp.89-106
- [BN-5] N. Bozsik, A. Szeberényi, and N. Bozsik, "Impact of Climate Change on Electric Energy Production from Medium-Size Photovoltaic Module Systems Based on RCP Climate Scenarios," *Energies*, vol. 17, no. 16, p. 4009, 2024, doi: 10.3390/en17164009
- [BN-6] N. Bozsik, A. Szeberényi, and N. Bozsik, "Impact of Climate Change on the Performance of Household-Scale Photovoltaic Systems," *HighTech and Innovation Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 1–15, 2024, doi: 10.28991/HIJ-2024-05-01-01

A Jelölt által írt, az értekezéshez szorosan nem kapcsolódó publikációk

- [BN-7] N. Bozsik, A. Szeberényi, and N. Bozsik, "Examination of the Hungarian Electricity Industry Structure with Special Regard to Renewables", *Energies*, vol. 16, no. 9, pp. 1–23, 2023, doi: 10.3390/en16093826
- [BN-8] N. Bozsik and N. Bozsik, "A megújuló energiaforrások szerepe a magyar villamosenergia-termelésben", *Acta Carolus Robertus*, vol. 14, no. 2, pp. 31–49, 2024, doi: 10.33032/acr.5921
- [BN-9] N. Bozsik, "A MAGYAR VILLAMOSENERGIA-RENDSZERT ÉRINTŐ HAVÁRIAESEMÉNYEK MENEDZSELÉSE", *Védelem Tudomány: Katasztrófavédelmi Online Tudományos Folyóirat*, vol. 8, no. 2, pp. 65–86, 2023.
- [BN-10] N. Bozsik, T. Tánczos, és N. Bozsik, "Az Európai Unió megújuló energiaforrásainak szerepe a szén-dioxid-kibocsátás és az energiafüggőség csökkentésében", *Külügyi Szemle*, vol. 23, no. 2, pp. 3–27, 2024, doi: 10.47707/Kulugyi_Szemle.2024.2.1.
- [BN-11] N. Bozsik, "A szigetüzemű rendszerek domotikai aspektusa", *Biztonságtudományi Szemle*, vol. 4, no. 4, pp. 43–57, 2022.
- [BN-12] N. Bozsik, N. Bozsik, és T. Tánczos, "A magyar bruttó villamosenergia-termelés struktúrájának alakulása 2010–2021 között", *Studia Mundi – Economica*, vol. 10, no. 3, pp. 17–32, 2023, doi: 10.18531/sme.vol.10.no.3.pp.17-32.

- [BN-13] N. Bozsik, R. Magda, and N. Bozsik, "Analysis of Primary Energy Consumption for the European Union Member States," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 20, no. 10, pp. 89–108, 2023, doi: 10.12700/APH.20.10.2023.10.6.
- [BN-14] N. Bozsik and I. Molnár, "Investigating the possibility of a solar hydrogen producing energy island concept in cooperation with a small settlement," in *Mérnöki Szimpózium a Bánkin előadásai: Proceedings of the Engineering Symposium at Bánki (ESB 2022)*, R. Horváth, J. Lukács, and R. G. Stadler, Eds., Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, pp. 15–24, Nov. 22, 2022. ISBN: 9789634493068
- [BN-15] A. Soós and N. Bozsik, "Possibilities of using vertically installed bifacial solar cells in agriculture," in *XVIII. Nemzetközi Tudományos Napok [18th International Scientific Days]: A „Zöld Megállapodás” – Kihívások és lehetőségek [The ‘Green Deal’ – Challenges and Opportunities]*, Z. Bujdosó, Ed., Gyöngyös, Magyarország: Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Károly Róbert Campus, pp. 592–601, May 5–6, 2022. ISBN: 9789636230326.
- [BN-16] A. Soós and N. Bozsik, "Low energy data connectivity of IoT sensors used in agriculture," in *XVIII. Nemzetközi Tudományos Napok [18th International Scientific Days]: A „Zöld Megállapodás” – Kihívások és lehetőségek [The ‘Green Deal’ – Challenges and Opportunities]*, Z. Bujdosó, Ed., Gyöngyös, Magyarország: Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Károly Róbert Campus, pp. 586–591, May 5–6, 2022. ISBN: 9789636230326.
- [BN-17] N. Bozsik, "Elektronikus behatolásjelző rendszerek helye a naperőművek objektumvédelmében", *Hadmérnök*, vol. 17, no. 2, pp. 5–15, 2022, doi: 10.32567/hm.2022.2.1.
- [BN-18] N. Bozsik, "Kis- és közepes méretű napelemes erőművek teljesítményoptimalizálása és rendszerfelügyelete," *Biztonságtudományi Szemle*, vol. 4, no. 2, pp. 75–85, 2022.
- [BN-19] N. Bozsik, "Alacsony energiafogyasztású, nagy átviteli távolságú adatkommunikációs megoldások a mezőgazdaságban alkalmazott IoT eszközöknél", in *„Innováció és digitalizáció”: XXXVIII. Óvári Tudományos Nap – Absztraktkötet*, É. Szalka, Ed., Mosonmagyaróvár, Magyarország: Széchenyi István Egyetem Mezőgazdaság- és Élelmiszertudományi Kar, pp. 135–136, Nov. 11, 2021. ISBN: 9786155837944.
- [BN-20] N. Bozsik, N. Bozsik and A. Szeberényi, "The Role of Artificial Intelligence and Electronic Intrusion Detection Systems in Protecting Solar Power Plants ", in *9th FEB International Scientific Conference: Sustainable Management in the Age of ESG and AI: Navigating Challenges and Opportunities*, vol. 9, Univerzitetna založba Univerze v Mariboru, 2025, pp. 217–226, doi: 10.18690/um.epf.5.2025.21

Táblázatjegyzék

1. táblázat Az erőművek LCOE értékei, USD/MWh.....	14
2. táblázat Az erőművek életciklusra vetített fajlagos szén-dioxid-kibocsátása, g/kWh	15
3. táblázat Az erőműtípusok kapacitásfaktora	16
4. táblázat A magyar erőművek kapacitásfaktora a 2021-es termelési adatok alapján...	17
5. táblázat A 2021. évi erőműtípusok szerinti költség- és kibocsátásadatai	21
6. táblázat Az Egyensúly Intézet 2030-as scenáriója.....	21
7. táblázat A 2030-as években rendelkezésre álló erőműtípusok jellemzői	22
8. táblázat Az LCOE- és az LCA(CO ₂)-minimum célérték portfóliók 47,6 TWh hazai termelés, a 30% nettó import és a minimum 30% hazai megújuló esetén.....	23
9. táblázat Az LCOE- és LCA(CO ₂)-minimum célérték portfóliók 51 TWh hazai termelés, 25% import és minimum 30% hazai megújuló esetén	24
10. táblázat Az LCOE- és LCA(CO ₂)-minimum célérték portfóliók 54,4 TWh hazai termelés, 20% import és minimum 30% hazai megújuló esetén	24
11. táblázat A 2021. év és 2030 Egyensúly Intézet fajlagos LCOE- és LCA(CO ₂) értékei	25
12. táblázat A 2030-ra tervezett, nagy energiaigényű ipart kiszolgáló erőművi portfólió LCOE- és LCA(CO ₂)-minimumának értékei különböző importráták mellett.	26
13. táblázat A rendszer konstrukciók költségei	35
14. táblázat A rendszerkonstrukció megtérülésülése években.....	44
15. táblázat A megújulóenergia-részarány alakulása százalékban	47
16. táblázat Az magyar éves bruttó villamosenergia-termelés gigawattórában 2018-2023	53
17. táblázat A magyarországi NUTS 0, 1 és 2-es osztályok.....	56
18. táblázat A két időszak közötti kapacitásfaktor változása százalékpontban, 100%-os nap- és 100%-os szélerőmű-portfólió esetén	67
19. táblázat A két időszak közötti kapacitásfaktor szórásának változása, 100%-os nap- és 100%-os szélerőmű-portfólió esetén	68
20. táblázat A magyarországi NUTS2 régiók hierarchikus klaszterbesorolása.....	68
21. táblázat A teljesítmény változás és a teljes horizontális sugárzás változás aránya ..	95
22. táblázat Pearson-korreláció mátrix	96
23. táblázat Parciális-korreláció.....	98
24. táblázat Lineáris regresszió egyenes együtthatói.....	99

Ábrajegyzék

1. ábra Az LCOE-LCA(CO ₂) párok abszolút értéken.....	25
2. ábra Az LCOE-LCA(CO ₂) párok fajlagos értéken	26
3. ábra Havi bontású sugárzási átlag és hőmérsékleti intervallum értékek	36
4. ábra Problémamegoldás HOMER-ben	37
5. ábra Rendszer séma	38
6. ábra Az LCOE alakulása – különböző átvételi árak és napi átlagfogyasztások mellett – a beruházási költségek függvényében.....	41
7. ábra Az szén-dioxid-kibocsátás alakulása – különböző átvételi árakon és különböző napi átlagfogyasztásokon – a beruházási költségek függvényében	43
8. ábra A 3. rendszerkonstrukció nominál- és diszkontált megtérülés görbéi	45
9. ábra Magyarország NUTS2 szerinti felosztása.....	56
10. ábra CORDEX földrajzi lefedettsége	57
11. ábra Az RCP-k szén-dioxid-kibocsátás alakulása	59
12. ábra Az RCP-k sugárzási kényszer alakulása	59
13. ábra A nap és szélenergia kapacitásfaktor relatív értékeinek alakulása RCP forgatókönyvek alapján.....	62
14. ábra Az együttes szórás és együttes kapacitásfaktor alakulása.....	65
15. ábra Az együttes szórás és a kapacitásfaktor az RCP2.6 forgatókönyv esetén	66
16. ábra Az együttes szórás és a kapacitásfaktor az RCP4.5 forgatókönyv esetén	66
17. ábra Az együttes szórás és a kapacitásfaktor az RCP8.5 forgatókönyv esetén	67
18. ábra Magyarországi NUTS2 régiók dendrogramjai kapacitásfaktor és szórás alapján	69
19. ábra A régiók három fő csoportja	70
20. ábra Az RCP forgatókönyvek szerint éves középhőmérséklet alakulása 2100-ig....	75
21. ábra Az RCP forgatókönyvek szerint napsugárzás alakulása 2100-ig	75
22. ábra Egydiódás napelem modell	78
23. ábra Az U-I görbe	80
24. ábra Feszültség-áram görbe	81
25. ábra A sugárzás és a cella hatásfok kapcsolata a hőmérséklet függvényében.....	81
26. ábra A munkapont követés azonos hőmérsékleten, különböző sugárzás mellett	82
27. ábra A munkapont követés azonos sugárzáson, különböző hőmérséklet mellett.....	82

28. ábra A sugárzási pályák RCP forgatókönyvei	84
29. ábra A szimuláción belüli modellek sémája	88
30. ábra A SAM algoritmus	89
31. ábra Budapest, Debrecen, Győr, Kecskemét és Miskolc teljes horizontális sugárzás, évi középhőmérséklet és DC villamosenergia-termelés változás, bázisév: 2010.....	93
32. ábra Pécs, Sopron, Szeged, Szombathely és Veszprém teljes horizontális sugárzás, évi középhőmérséklet és DC villamosenergia-termelés változás, bázisév: 2010.....	94
33. ábra Régiók hierarchikus klaszterezése RCP klímamodell-eredmények alapján...	101

Függelék

1. melléklet Jelmagyarázat a 2-5. mellékletekhez

- I Konstrukció száma
- II Átlagos napi fogyasztás (kWh/d)
- III Installált PV teljesítmény (kW)
- IV Installált akkumulátor kapacitás (kWh)
- V Inverter (kW)
- VI Költség/NPC (Ft)
- VII Költség/LCOE (Ft/kWh)
- VIII Költség/CAPEX (Ft)
- IX Költség/OPEX (Ft/év)
- X Rendszer/Ren Frac (%)
- XI Rendszer/Elec Prod (kWh/év)
- XII Rendszer/CO₂ (kg/év)
- XIII Projekt jelenérték/NPV (Ft)
- XIV Projekt gazdaságosság/ROI (%)
- XV Projekt gazdaságosság/IRR (%)
- XVI Nominál megtérülés (év)
- XVII Diszkontált megtérülés (év)
- XVIII PV/energia-termelés (kWh/év)
- IXX Akkumulátor autonómia (óra)

2. melléklet Eredmények 5 Ft-os visszatáplálási ár 1-6. konstrukciók esetén

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	IXX
1	7	4,2	10	5	2827438	50,08	1315520	15344,81	94,31	5193,97	-649,57	-1713821,00	-6,91				4918,08	28,01
1	10	4,2	10	5	3046968	49,86	1315520	34182,77	86,60	5620,62	-287,50	-1046281,00	-2,56				4918,08	19,61
1	15	4,2	10	5	3619434	49,04	1315520	83306,39	71,45	6726,29	306,51	-130001,50	3,42	5,58	6,09	8,21	4918,08	13,07
1	20	4,2	10	5	4546548	49,79	1315520	162862,50	57,91	8216,69	891,16	431630,20	7,08	11,61	4,98	6,34	4918,08	9,80
2	7	5	10	5	2796214	42,22	1354005	9363,08	96,02	6081,02	-936,05	-1682597,00	-6,39				5854,85	28,01
2	10	5	10	5	2994009	42,70	1354005	26335,91	90,16	6446,84	-572,66	-993321,50	-2,02				5854,85	19,61
2	15	5	10	5	3501847	43,04	1354005	69913,80	77,35	7436,42	23,90	-12414,84	4,19	6,87	5,90	7,88	5854,85	13,07
2	20	5	10	5	4348867	44,49	1354005	142597,00	64,48	8833,55	610,27	629310,80	8,26	13,39	4,76	5,99	5854,85	9,80
3	7	5,8	10	5	2769600	36,36	1391595	3853,63	97,07	6983,21	-1222,35	-1655982,00	-5,93				6791,63	28,01
3	10	5,8	10	5	2950383	37,13	1391595	19366,75	92,52	7301,46	-857,99	-949695,80	-1,57				6791,63	19,61
3	15	5,8	10	5	3473924	38,75	1391595	58896,43	81,63	8204,97	-259,57	15508,74	4,37	7,56	5,79	7,68	6791,63	13,07
3	20	5,8	10	5	4223459	40,18	1391595	126170,10	69,66	9528,33	328,09	754718,50	8,93	14,56	4,62	5,78	6791,63	9,80
4	7	5,8	10	5	2928910	38,46	1550905	3853,63	97,07	6983,21	-1222,35	-1815292,00	-5,73				6791,63	28,01
4	10	5,8	10	5	3109693	39,13	1550905	19366,75	92,52	7301,46	-857,99	-1109006,00	-1,82				6791,63	19,61
4	15	5,8	10	5	3633234	40,53	1550905	58896,43	81,63	8204,97	-259,57	-143801,30	3,51	6,02	6,45	8,88	6791,63	13,07
4	20	5,8	10	5	4382769	41,70	1550905	126170,10	69,66	9528,33	328,09	595408,50	7,60	12,29	5,15	6,62	6791,63	9,80
5	7	4,6	10	4	3345205	54,57	1562630	12287,24	95,27	5635,22	-792,58	-2231587,00	-8,00				5386,47	28,01
5	10	4,6	10	4	3553004	54,20	1562630	30118,62	88,58	6029,04	-429,78	-1552317,00	-4,27				5386,47	19,61
5	15	4,6	10	4	4091403	52,80	1562630	76318,94	74,63	7073,52	165,45	-601970,90	0,95	1,50	7,00		5386,47	13,07
5	20	4,6	10	4	4972578	52,71	1562630	151933,00	61,41	8510,33	751,12	5599,79	4,28	7,05	5,68	7,49	5386,47	9,80
6	7	4,6	10	4	3489300	56,92	1706725	12287,24	95,27	5635,22	-792,58	-2375682,00	-7,66				5386,47	28,01
6	10	4,6	10	4	3697099	56,40	1706725	30118,62	88,58	6029,04	-429,78	-1696412,00	-4,25				5386,47	19,61
6	15	4,6	10	4	4235499	54,66	1706725	76318,94	74,63	7073,52	165,45	-746065,90	0,53	0,84	7,65		5386,47	13,07
6	20	4,6	10	4	5116673	54,24	1706725	151933,00	61,41	8510,33	751,12	-138495,20	3,58	5,85	6,20	8,42	5386,47	9,80

szürke cella háttérszín: NPV>0

3. melléklet Eredmények 5 Ft-os visszatáplálási ár 7-12. konstrukciók esetén

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	IXX
7	7	5,8	10	5	3377889	44,35	1649070	3853,63	97,07	6983,21	-1222,35	-2264272,00	-7,52				6791,63	28,01
7	10	5,8	10	5	3558673	44,78	1649070	19366,75	92,52	7301,46	-857,99	-1557986,00	-3,85				6791,63	19,61
7	15	5,8	10	5	4126392	46,03	1649070	58896,43	81,63	8204,97	-259,57	-636960,00	0,93	1,65	6,86		6791,63	13,07
7	20	5,8	10	5	4851728	46,16	1649070	126170,10	69,66	9528,33	328,09	126450,40	4,92	8,38	5,48	7,15	6791,63	9,80
8	7	5,8	10	5	3574789	46,94	1845970	3853,63	97,07	6983,21	-1222,35	-2461172,00	-7,14				6791,63	28,01
8	10	5,8	10	5	3755573	47,26	1845970	19366,75	92,52	7301,46	-857,99	-1754886,00	-3,86				6791,63	19,61
8	15	5,8	10	5	4323293	48,22	1845970	58896,43	81,63	8204,97	-259,57	-833860,00	0,41	0,72	7,67		6791,63	13,07
8	20	5,8	10	5	5048628	48,03	1845970	126170,10	69,66	9528,33	328,09	-70449,62	3,96	6,68	6,13	8,30	6791,63	9,80
9	7	4,6	8	4	3536018	57,21	1718690	13532,67	94,54	5675,79	-793,35	-2422400,00	-7,82				5386,47	22,41
9	10	4,6	8	4	3759208	56,45	1718690	32684,75	87,29	6112,76	-431,67	-1758521,00	-4,50				5386,47	15,69
9	15	4,6	8	4	4429233	55,07	1718690	84497,64	72,17	7307,07	159,27	-939800,00	-0,42		8,00		5386,47	10,46
9	20	4,6	8	4	5278113	54,29	1718690	163022,70	59,82	8738,35	745,01	-299934,70	2,78	4,52	6,51	8,98	5386,47	7,84
10	7	4,6	8	4	3706068	59,96	1888740	13532,67	94,54	5675,79	-793,35	-2592450,00	-7,47				5386,47	22,41
10	10	4,6	8	4	3929258	59,00	1888740	32684,75	87,29	6112,76	-431,67	-1928571,00	-4,46				5386,47	15,69
10	15	4,6	8	4	4599283	57,18	1888740	84497,64	72,17	7307,07	159,27	-1109850,00	-0,74		8,79		5386,47	10,46
10	20	4,6	8	4	5448163	56,04	1888740	163022,70	59,82	8738,35	745,01	-469984,70	2,17	3,53	7,15		5386,47	7,84
11	7	5,8	10	5	4286349	56,28	2093375	3853,63	97,07	6983,21	-1222,35	-3172732,00	-8,75				6791,63	28,01
11	10	5,8	10	5	4467133	56,21	2093375	19366,75	92,52	7301,46	-857,99	-2466445,00	-5,85				6791,63	19,61
11	15	5,8	10	5	5051751	56,35	2093375	58896,43	81,63	8204,97	-259,57	-1562318,00	-2,16		8,70		6791,63	13,07
11	20	5,8	10	5	5767829	54,87	2093375	126170,10	69,66	9528,33	328,09	-789651,10	1,02	1,69	6,95		6791,63	9,80
12	7	5,8	10	5	4481459	58,84	2288485	3853,63	97,07	6983,21	-1222,35	-3367842,00	-8,34				6791,63	28,01
12	10	5,8	10	5	4662243	58,67	2288485	19366,75	92,52	7301,46	-857,99	-2661555,00	-5,69				6791,63	19,61
12	15	5,8	10	5	5246861	58,53	2288485	58896,43	81,63	8204,97	-259,57	-1757428,00	-2,31				6791,63	13,07
12	20	5,8	10	5	5962939	56,73	2288485	126170,10	69,66	9528,33	328,09	-984761,10	0,59	0,98	7,60		6791,63	9,80

szürke cella háttérszín: NPV>0

4. melléklet Eredmények 15 Ft-os visszatáplálási ár 1-6. konstrukciók esetén

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	IXX
1	10	4,2	10	5	2861240	46,82	1315520	18245,38	86,60	5620,62	-287,50	-860552,90	-1,35		8,57		4918,08	19,61
1	15	4,2	10	5	3519438	47,69	1315520	74725,69	71,45	6726,29	306,51	-30005,61	4,07	6,67	5,85	7,80	4918,08	13,07
1	20	4,2	10	5	4484064	49,10	1315520	157500,70	57,91	8216,69	891,16	494113,80	7,49	12,26	4,88	6,18	4918,08	9,80
1	7	4,2	10	5	2560636	45,36	1315520	-7549,64	94,31	5193,97	-649,57	-1447018,00	-5,17				4918,08	28,01
2	10	5	10	5	2718154	38,76	1354005	2664,69	90,16	6446,84	-572,66	-717467,00	-0,27		8,01		5854,85	19,61
2	15	5	10	5	3326173	40,88	1354005	54839,09	77,35	7436,42	23,90	163259,50	5,31	8,70	5,54	7,25	5854,85	13,07
2	20	5	10	5	4222195	43,20	1354005	131727,20	64,48	8833,55	610,27	755983,00	9,06	14,60	4,58	5,72	5854,85	9,80
2	7	5	10	5	2431719	36,72	1354005	-21914,50	96,02	6081,02	-936,05	-1318101,00	-4,08				5854,85	28,01
3	10	5,8	10	5	2581030	32,48	1391595	-12327,67	92,52	7301,46	-857,99	-580342,40	0,70	1,12	7,56		6791,63	19,61
3	15	5,8	10	5	3215451	35,87	1391595	36716,75	81,63	8204,97	-259,57	273981,50	5,96	10,21	5,30	6,85	6791,63	13,07
3	20	5,8	10	5	4023056	38,27	1391595	108973,40	69,66	9528,33	328,09	955121,40	10,17	16,37	4,37	5,41	6791,63	9,80
3	7	5,8	10	5	2305713	30,27	1391595	-35952,74	97,07	6983,21	-1222,35	-1192095,00	-3,07				6791,63	28,01
4	10	5,8	10	5	2740340	34,48	1550905	-12327,67	92,52	7301,46	-857,99	-739652,40	0,22	0,35	8,43		6791,63	19,61
4	15	5,8	10	5	3374761	37,64	1550905	36716,75	81,63	8204,97	-259,57	114671,50	4,94	8,38	5,90	7,88	6791,63	13,07
4	20	5,8	10	5	4182366	39,79	1550905	108973,40	69,66	9528,33	328,09	795811,40	8,71	13,92	4,87	6,17	6791,63	9,80
4	7	5,8	10	5	2465023	32,36	1550905	-35952,74	97,07	6983,21	-1222,35	-1351405,00	-3,16				6791,63	28,01
5	10	4,6	10	4	3322867	50,69	1562630	10370,42	88,58	6029,04	-429,78	-1322180,00	-3,01				5386,47	19,61
5	15	4,6	10	4	3954567	51,04	1562630	64576,96	74,63	7073,52	165,45	-465134,70	1,70	2,72	6,65		5386,47	13,07
5	20	4,6	10	4	4879871	51,73	1562630	143977,70	61,41	8510,33	751,12	98307,27	4,79	7,91	5,52	7,22	5386,47	9,80
5	7	4,6	10	4	3029906	49,42	1562630	-14768,71	95,27	5635,22	-792,58	-1916288,00	-6,27				5386,47	28,01
6	10	4,6	10	4	3466962	52,89	1706725	10370,42	88,58	6029,04	-429,78	-1466275,00	-3,09				5386,47	19,61
6	15	4,6	10	4	4098662	52,89	1706725	64576,96	74,63	7073,52	165,45	-609229,70	1,22	1,95	7,27		5386,47	13,07
6	20	4,6	10	4	5023966	53,25	1706725	143977,70	61,41	8510,33	751,12	-45787,73	4,05	6,62	6,03	8,10	5386,47	9,80
6	7	4,6	10	4	3174001	51,77	1706725	-14768,71	95,27	5635,22	-792,58	-2060383,00	-6,08				5386,47	28,01

szürke cella háttérszín: NPV>0

5. melléklet Eredmények 15 Ft-os visszatáplálási ár 7-12. konstrukciók esetén

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII	IXX
7	10	5,8	10	5	3189319	40,13	1649070	-12327,67	92,52	7301,46	-857,99	-1188632,00	-1,92		8,96		6791,63	19,61
7	15	5,8	10	5	3867920	43,14	1649070	36716,75	81,63	8204,97	-259,57	-378487,30	2,28	4,07	6,28	8,56	6791,63	13,07
7	20	5,8	10	5	4651325	44,25	1649070	108973,40	69,66	9528,33	328,09	326853,30	5,96	10,13	5,18	6,67	6791,63	9,80
7	7	5,8	10	5	2914003	38,26	1649070	-35952,74	97,07	6983,21	-1222,35	-1800385,00	-5,11				6791,63	28,01
8	10	5,8	10	5	3386219	42,61	1845970	-12327,67	92,52	7301,46	-857,99	-1385532,00	-2,14				6791,63	19,61
8	15	5,8	10	5	4064820	45,34	1845970	36716,75	81,63	8204,97	-259,57	-575387,30	1,61	2,85	7,03		6791,63	13,07
8	20	5,8	10	5	4848225	46,12	1845970	108973,40	69,66	9528,33	328,09	129953,30	4,90	8,22	5,80	7,71	6791,63	9,80
8	7	5,8	10	5	3110903	40,85	1845970	-35952,74	97,07	6983,21	-1222,35	-1997285,00	-4,99				6791,63	28,01
9	10	4,6	8	4	3518633	52,84	1718690	12040,92	87,29	6112,76	-431,67	-1517946,00	-3,30				5386,47	15,69
9	15	4,6	8	4	4262948	53,00	1718690	70228,69	72,17	7307,07	159,27	-773515,60	0,41	0,69	7,50		5386,47	10,46
9	20	4,6	8	4	5156627	53,04	1718690	152598,00	59,82	8738,35	745,01	-178448,80	3,39	5,53	6,26	8,53	5386,47	7,84
9	7	4,6	8	4	3215711	52,03	1718690	-13953,04	94,54	5675,79	-793,35	-2102093,00	-6,22				5386,47	22,41
10	10	4,6	8	4	3688683	55,39	1888740	12040,92	87,29	6112,76	-431,67	-1687996,00	-3,36				5386,47	15,69
10	15	4,6	8	4	4432998	55,11	1888740	70228,69	72,17	7307,07	159,27	-943565,60	0,01	0,02	8,24		5386,47	10,46
10	20	4,6	8	4	5326677	54,79	1888740	152598,00	59,82	8738,35	745,01	-348498,80	2,72	4,43	6,88		5386,47	7,84
10	7	4,6	8	4	3385761	54,78	1888740	-13953,04	94,54	5675,79	-793,35	-2272143,00	-6,02				5386,47	22,41
11	10	5,8	10	5	4097779	51,56	2093375	-12327,67	92,52	7301,46	-857,99	-2097092,00	-4,34				6791,63	19,61
11	15	5,8	10	5	4793278	53,47	2093375	36716,75	81,63	8204,97	-259,57	-1303845,00	-1,10		7,97		6791,63	13,07
11	20	5,8	10	5	5567426	52,97	2093375	108973,40	69,66	9528,33	328,09	-589248,20	1,84	3,08	6,58		6791,63	9,80
11	7	5,8	10	5	3822462	50,19	2093375	-35952,74	97,07	6983,21	-1222,35	-2708845,00	-6,84				6791,63	28,01
12	10	5,8	10	5	4292889	54,02	2288485	-12327,67	92,52	7301,46	-857,99	-2292202,00	-4,31				6791,63	19,61
12	15	5,8	10	5	4988388	55,64	2288485	36716,75	81,63	8204,97	-259,57	-1498955,00	-1,34		8,71		6791,63	13,07
12	20	5,8	10	5	5762536	54,82	2288485	108973,40	69,66	9528,33	328,09	-784358,20	1,34	2,25	7,19		6791,63	9,80
12	7	5,8	10	5	4017572	52,75	2288485	-35952,74	97,07	6983,21	-1222,35	-2903955,00	-6,60				6791,63	28,01

szürke cella háttérszín: NPV>0

6. melléklet Szél-nap portfólió, RCP2.6

2026-2055

nap-szél portfólió	HU11		HU12		HU21		HU22		HU23		HU31		HU32		HU33	
	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR
0-100	0,0234	22,46	0,0241	22,75	0,0225	27,95	0,0211	27,39	0,0208	23,05	0,0181	17,27	0,0224	20,77	0,0227	21,59
10-90	0,0210	21,47	0,0216	21,74	0,0201	26,41	0,0189	25,88	0,0187	22,03	0,0163	16,74	0,0201	19,92	0,0204	20,73
20-80	0,0187	20,48	0,0192	20,72	0,0178	24,87	0,0168	24,37	0,0166	21,01	0,0146	16,21	0,0179	19,08	0,0182	19,86
30-70	0,0163	19,48	0,0168	19,71	0,0155	23,33	0,0146	22,86	0,0145	19,99	0,0128	15,68	0,0157	18,23	0,0159	19,00
40-60	0,0139	18,49	0,0144	18,70	0,0132	21,79	0,0124	21,35	0,0124	18,97	0,0111	15,16	0,0135	17,38	0,0136	18,14
50-50	0,0116	17,50	0,0121	17,68	0,0109	20,25	0,0103	19,84	0,0103	17,96	0,0094	14,63	0,0114	16,53	0,0114	17,28
60-40	0,0093	16,50	0,0098	16,67	0,0087	18,72	0,0083	18,33	0,0084	16,94	0,0078	14,10	0,0093	15,69	0,0092	16,42
70-30	0,0071	15,51	0,0075	15,65	0,0065	17,18	0,0063	16,82	0,0065	15,92	0,0062	13,58	0,0073	14,84	0,0071	15,55
80-20	0,0052	14,52	0,0055	14,64	0,0046	15,64	0,0045	15,31	0,0048	14,90	0,0049	13,05	0,0055	13,99	0,0052	14,69
90-10	0,0037	13,52	0,0039	13,62	0,0034	14,10	0,0034	13,80	0,0036	13,88	0,0039	12,52	0,0041	13,14	0,0037	13,83
100-0	0,0035	12,53	0,0035	12,61	0,0035	12,56	0,0035	12,29	0,0036	12,86	0,0036	11,99	0,0038	12,30	0,0034	12,97

2056-2085

nap-szél portfólió	HU11		HU12		HU21		HU22		HU23		HU31		HU32		HU33	
	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR
0-100	0,0292	22,43	0,0290	22,57	0,0284	27,52	0,0259	26,89	0,0228	22,71	0,0224	17,31	0,0265	20,66	0,0263	21,09
10-90	0,0261	21,44	0,0260	21,57	0,0255	26,02	0,0232	25,44	0,0205	21,72	0,0201	16,78	0,0238	19,81	0,0236	20,27
20-80	0,0231	20,45	0,0230	20,56	0,0225	24,52	0,0206	23,98	0,0181	20,73	0,0178	16,25	0,0210	18,97	0,0209	19,44
30-70	0,0201	19,45	0,0200	19,56	0,0195	23,02	0,0179	22,52	0,0158	19,74	0,0154	15,72	0,0183	18,13	0,0182	18,61
40-60	0,0171	18,46	0,0170	18,56	0,0166	21,52	0,0153	21,07	0,0134	18,75	0,0131	15,18	0,0156	17,28	0,0155	17,78
50-50	0,0142	17,47	0,0141	17,56	0,0137	20,03	0,0127	19,61	0,0112	17,75	0,0109	14,65	0,0129	16,44	0,0128	16,96
60-40	0,0112	16,48	0,0112	16,56	0,0108	18,53	0,0101	18,15	0,0089	16,76	0,0086	14,12	0,0102	15,59	0,0102	16,13
70-30	0,0084	15,49	0,0083	15,56	0,0080	17,03	0,0076	16,70	0,0068	15,77	0,0065	13,59	0,0077	14,75	0,0076	15,30
80-20	0,0057	14,50	0,0057	14,56	0,0055	15,53	0,0054	15,24	0,0049	14,78	0,0046	13,06	0,0053	13,90	0,0053	14,47
90-10	0,0036	13,51	0,0036	13,55	0,0037	14,03	0,0038	13,78	0,0038	13,78	0,0034	12,53	0,0036	13,06	0,0035	13,65
100-0	0,0036	12,51	0,0035	12,55	0,0038	12,53	0,0038	12,33	0,0039	12,79	0,0036	11,99	0,0037	12,22	0,0035	12,82

7. melléklet Szél-nap portfólió, RCP4.5

2026-2055

nap-szél arány (%)	HU11		HU12		HU21		HU22		HU23		HU31		HU32		HU33	
	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR
0-100	0,0205	23,09	0,0205	23,38	0,0215	27,91	0,0200	26,89	0,0176	22,85	0,0158	17,71	0,0197	21,30	0,0182	22,06
10-90	0,0184	22,03	0,0185	22,29	0,0194	26,37	0,0180	25,43	0,0159	21,85	0,0142	17,14	0,0178	20,39	0,0163	21,07
20-80	0,0164	20,96	0,0164	21,20	0,0172	24,83	0,0160	23,98	0,0141	20,85	0,0127	16,56	0,0158	19,49	0,0145	20,09
30-70	0,0144	19,90	0,0144	20,11	0,0151	23,29	0,0140	22,53	0,0124	19,85	0,0112	15,99	0,0139	18,58	0,0127	19,11
40-60	0,0124	18,83	0,0124	19,03	0,0130	21,76	0,0120	21,08	0,0107	18,84	0,0097	15,42	0,0119	17,67	0,0108	18,12
50-50	0,0104	17,77	0,0104	17,94	0,0109	20,22	0,0101	19,63	0,0090	17,84	0,0082	14,85	0,0100	16,76	0,0091	17,14
60-40	0,0084	16,71	0,0084	16,85	0,0088	18,68	0,0081	18,18	0,0073	16,84	0,0068	14,28	0,0082	15,86	0,0073	16,16
70-30	0,0066	15,64	0,0066	15,77	0,0068	17,14	0,0063	16,73	0,0057	15,84	0,0054	13,70	0,0064	14,95	0,0057	15,18
80-20	0,0048	14,58	0,0048	14,68	0,0049	15,60	0,0045	15,28	0,0043	14,84	0,0042	13,13	0,0049	14,04	0,0043	14,19
90-10	0,0035	13,51	0,0035	13,59	0,0034	14,06	0,0031	13,83	0,0032	13,84	0,0034	12,56	0,0037	13,13	0,0035	13,21
100-0	0,0031	12,45	0,0031	12,51	0,0029	12,53	0,0027	12,38	0,0030	12,84	0,0032	11,99	0,0035	12,23	0,0035	12,23

2056-2085

nap-szél arány (%)	HU11		HU12		HU21		HU22		HU23		HU31		HU32		HU33	
	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR
0-100	0,0197	22,48	0,0188	22,70	0,0238	27,62	0,0224	26,97	0,0212	22,53	0,0138	17,64	0,0157	21,01	0,0192	21,38
10-90	0,0177	21,45	0,0168	21,66	0,0214	26,08	0,0201	25,49	0,0190	21,54	0,0124	17,05	0,0141	20,11	0,0172	20,51
20-80	0,0156	20,42	0,0149	20,61	0,0190	24,55	0,0178	24,01	0,0168	20,55	0,0109	16,46	0,0125	19,21	0,0153	19,63
30-70	0,0136	19,40	0,0130	19,57	0,0166	23,01	0,0156	22,53	0,0147	19,56	0,0095	15,88	0,0109	18,32	0,0133	18,75
40-60	0,0116	18,37	0,0110	18,53	0,0142	21,48	0,0133	21,05	0,0126	18,57	0,0081	15,29	0,0093	17,42	0,0114	17,88
50-50	0,0096	17,34	0,0091	17,48	0,0118	19,95	0,0111	19,58	0,0104	17,57	0,0068	14,70	0,0078	16,52	0,0094	17,00
60-40	0,0077	16,31	0,0073	16,44	0,0095	18,41	0,0089	18,10	0,0084	16,58	0,0055	14,12	0,0064	15,62	0,0075	16,12
70-30	0,0058	15,28	0,0055	15,39	0,0072	16,88	0,0068	16,62	0,0063	15,59	0,0044	13,53	0,0050	14,72	0,0057	15,25
80-20	0,0042	14,25	0,0040	14,35	0,0051	15,34	0,0048	15,14	0,0045	14,60	0,0035	12,94	0,0039	13,83	0,0041	14,37
90-10	0,0031	13,22	0,0029	13,30	0,0034	13,81	0,0033	13,66	0,0031	13,60	0,0031	12,36	0,0032	12,93	0,0029	13,49
100-0	0,0031	12,19	0,0031	12,26	0,0030	12,28	0,0029	12,19	0,0029	12,61	0,0033	11,77	0,0033	12,03	0,0028	12,62

8. melléklet Szél-nap portfólió, RCP8.5

2026-2055

nap-szél arány (%)	HU11		HU12		HU21		HU22		HU23		HU31		HU32		HU33	
	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR
0-100	0,0205	22,35	0,0203	22,62	0,0247	27,79	0,0230	27,18	0,0201	22,83	0,0165	17,30	0,0178	20,73	0,0190	21,48
10-90	0,0183	21,34	0,0182	21,60	0,0221	26,24	0,0206	25,67	0,0180	21,81	0,0148	16,76	0,0160	19,87	0,0170	20,61
20-80	0,0161	20,34	0,0160	20,57	0,0195	24,69	0,0182	24,15	0,0159	20,79	0,0131	16,22	0,0141	19,02	0,0150	19,73
30-70	0,0140	19,33	0,0139	19,55	0,0169	23,15	0,0158	22,64	0,0138	19,77	0,0114	15,67	0,0123	18,16	0,0131	18,86
40-60	0,0118	18,33	0,0117	18,52	0,0143	21,60	0,0135	21,13	0,0118	18,75	0,0097	15,13	0,0105	17,30	0,0111	17,98
50-50	0,0097	17,32	0,0096	17,50	0,0118	20,05	0,0111	19,62	0,0098	17,73	0,0081	14,58	0,0087	16,45	0,0092	17,11
60-40	0,0076	16,32	0,0076	16,47	0,0093	18,51	0,0088	18,11	0,0078	16,71	0,0066	14,04	0,0071	15,59	0,0073	16,23
70-30	0,0057	15,31	0,0057	15,45	0,0068	16,96	0,0067	16,60	0,0059	15,69	0,0052	13,50	0,0055	14,74	0,0056	15,36
80-20	0,0040	14,31	0,0041	14,42	0,0047	15,41	0,0047	15,09	0,0043	14,67	0,0041	12,95	0,0042	13,88	0,0041	14,48
90-10	0,0032	13,30	0,0032	13,40	0,0032	13,87	0,0035	13,57	0,0032	13,65	0,0036	12,41	0,0036	13,02	0,0033	13,60
100-0	0,0037	12,30	0,0037	12,38	0,0035	12,32	0,0037	12,06	0,0033	12,63	0,0039	11,86	0,0039	12,17	0,0036	12,73

2056-2085

nap-szél arány (%)	HU11		HU12		HU21		HU22		HU23		HU31		HU32		HU33	
	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR	szórás	CFR
0-100	0,0201	22,52	0,0200	22,75	0,0241	27,46	0,0262	26,83	0,0202	22,72	0,0169	17,54	0,0185	21,03	0,0190	21,47
10-90	0,0180	21,50	0,0180	21,72	0,0215	25,96	0,0234	25,36	0,0180	21,71	0,0152	16,97	0,0166	20,14	0,0170	20,60
20-80	0,0159	20,48	0,0159	20,68	0,0190	24,45	0,0206	23,89	0,0159	20,70	0,0135	16,40	0,0147	19,25	0,0150	19,72
30-70	0,0138	19,46	0,0138	19,65	0,0164	22,94	0,0178	22,42	0,0137	19,70	0,0119	15,83	0,0128	18,36	0,0130	18,85
40-60	0,0118	18,44	0,0118	18,61	0,0139	21,43	0,0151	20,95	0,0116	18,69	0,0102	15,26	0,0110	17,47	0,0111	17,97
50-50	0,0098	17,42	0,0098	17,58	0,0114	19,92	0,0124	19,48	0,0095	17,68	0,0086	14,69	0,0092	16,59	0,0091	17,10
60-40	0,0078	16,40	0,0079	16,54	0,0089	18,42	0,0097	18,01	0,0075	16,67	0,0071	14,12	0,0074	15,70	0,0072	16,23
70-30	0,0060	15,38	0,0060	15,50	0,0065	16,91	0,0070	16,54	0,0056	15,67	0,0056	13,55	0,0057	14,81	0,0054	15,35
80-20	0,0045	14,36	0,0044	14,47	0,0044	15,40	0,0046	15,07	0,0040	14,66	0,0044	12,98	0,0042	13,92	0,0039	14,48
90-10	0,0035	13,34	0,0035	13,43	0,0031	13,89	0,0030	13,60	0,0031	13,65	0,0036	12,41	0,0033	13,03	0,0030	13,60
100-0	0,0038	12,32	0,0036	12,40	0,0037	12,39	0,0035	12,13	0,0037	12,64	0,0036	11,84	0,0033	12,15	0,0034	12,73

9. melléklet Budapesti régióra vonatkozó szimuláció eredménye

		2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
RCP	Gh	3,35	3,43	3,51	3,54	3,56	3,57	3,58	3,58	3,58	3,59
2.6	Ta	11,8	12,2	12,7	12,9	13,2	13,3	13,2	13,2	13,1	13,1
	En	315928	323576	330963	334100	338080	338727	338822	340633	339775	339609
RCP	Gh	3,35	3,40	3,45	3,47	3,48	3,50	3,51	3,53	3,54	3,55
4.5	Ta	11,8	12,2	12,6	13	13,4	13,9	14	14,3	14,5	14,8
	En	315928	319875	323837	327839	327148	331690	326419	329803	328063	329197
RCP	Gh	3,35	3,4	3,45	3,48	3,51	3,53	3,54	3,55	3,57	3,58
8.5	Ta	11,8	12,3	12,9	13,5	14,1	14,9	15,5	16,2	16,9	17,6
	En	315928	322727	324140	329568	328969	330588	332595	331232	333546	332870

Gh: kWh/m²/d; Ta: °C; En: kWh/y

10. melléklet Debreceni régióra vonatkozó szimuláció eredménye

		2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
RCP	Gh	3,36	3,43	3,51	3,53	3,56	3,57	3,58	3,58	3,59	3,59
2.6	Ta	11,3	11,8	12,1	12,4	12,6	12,7	12,7	12,7	12,6	12,6
	En	314411	320996	328748	331230	335797	335249	335539	336130	336768	337424
RCP	Gh	3,36	3,40	3,45	3,46	3,49	3,50	3,51	3,53	3,54	3,55
4.5	Ta	11,3	11,7	12,1	12,5	13	13,1	13,5	13,9	14	14,3
	En	314411	315191	320791	321743	320911	324021	323840	324101	328258	329456
RCP	Gh	3,36	3,4	3,46	3,48	3,52	3,53	3,55	3,56	3,57	3,59
8.5	Ta	11,3	11,8	12,3	13	13,6	14,3	15	15,6	16,4	17,1
	En	314411	319573	324949	324095	329220	331511	330404	329129	329725	331924

Gh: kWh/m²/d; Ta: °C; En: kWh/y

11. melléklet Győri régióra vonatkozó szimuláció eredménye

		2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
RCP	Gh	3,26	3,32	3,38	3,4	3,42	3,43	3,43	3,43	3,43	3,43
2.6	Ta	11,2	11,5	11,9	12,2	12,5	12,6	12,5	12,4	12,3	12,3
	En	304591	307487	312436	316171	316908	319282	317862	318425	316863	316024
RCP	Gh	3,26	3,29	3,32	3,33	3,35	3,36	3,37	3,38	3,39	3,40
4.5	Ta	11,20	11,50	11,90	12,20	12,70	13,00	13,20	13,40	13,70	14,00
	En	304591	304387	304342	305683	306024	306913	307397	310376	308942	308232
RCP	Gh	3,26	3,3	3,34	3,37	3,39	3,41	3,42	3,43	3,45	3,46
8.5	Ta	11,20	11,70	12,20	12,80	13,40	14,10	14,80	15,50	16,20	16,90
	En	304591	304635	310096	310369	311853	315411	313446	314669	313961	315582

Gh: kWh/m²/d; Ta: °C; En: kWh/y

12. melléklet Kecskeméti régióra vonatkozó szimuláció eredménye

		2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
RCP	Gh	3,33	3,41	3,5	3,52	3,54	3,56	3,56	3,56	3,57	3,57
2.6	Ta	11,5	11,9	12,4	12,7	13	13	12,9	12,8	12,9	12,8
	En	309038	316118	326760	325637	331127	333421	332313	334167	331746	333196
RCP	Gh	3,33	3,38	3,43	3,45	3,47	3,48	3,49	3,50	3,52	3,54
4.5	Ta	11,5	11,9	12,4	12,8	13,1	13,5	13,8	14	14,2	14,5
	En	309038	314882	316220	319631	318277	321382	320276	321201	322153	322908
RCP	Gh	3,33	3,38	3,44	3,46	3,49	3,51	3,53	3,54	3,55	3,56
8.5	Ta	11,5	12	12,6	13,2	13,8	14,5	15,3	16	16,6	17,4
	En	309038	313743	320210	321255	322028	324945	324421	329258	327873	328070

Gh: kWh/m²/d; Ta: °C; En: kWh/y

13. melléklet Miskolci régióra vonatkozó szimuláció eredménye

		2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
RCP	Gh	3,26	3,34	3,44	3,45	3,48	3,49	3,49	3,49	3,50	3,50
2.6	Ta	10,7	11,2	11,7	11,9	12,1	12,3	12,2	12,2	12,2	12,1
	En	305673	313799	323527	324536	325733	330983	328316	329553	328158	328005
RCP	Gh	3,3	3,3	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,5	3,5
4.5	Ta	10,70	11,20	11,60	12,00	12,40	12,70	13,00	13,30	13,50	13,80
	En	305673	310884	314868	314388	314147	319897	317790	318704	321020	321117
RCP	Gh	3,26	3,30	3,35	3,38	3,41	3,43	3,45	3,46	3,48	3,49
8.5	Ta	10,7	11,3	11,8	12,5	13,1	13,8	14,5	15,2	15,9	16,6
	En	305673	308566	315135	315621	318343	320788	320258	319130	322300	321317

Gh: kWh/m²/d; Ta: °C; En: kWh/y

14. melléklet Pécsi régióra vonatkozó szimuláció eredménye

		2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
RCP	Gh	3,38	3,46	3,53	3,56	3,58	3,6	3,6	3,59	3,6	3,6
2.6	Ta	11,8	12,2	12,6	12,8	13,1	13,2	13,2	13,1	13	13
	En	312167	319676	325432	330809	332924	332771	333776	336911	334027	331998
RCP	Gh	3,38	3,42	3,46	3,48	3,49	3,50	3,52	3,53	3,55	3,56
4.5	Ta	11,8	12,2	12,6	12,9	13,3	13,7	13,9	14,2	14,4	14,7
	En	312167	313694	317601	321852	318399	319184	322585	321952	321933	324283
RCP	Gh	3,38	3,43	3,48	3,51	3,54	3,56	3,58	3,59	3,6	3,62
8.5	Ta	11,8	12,3	12,8	13,5	14,2	14,8	15,5	16,2	16,9	17,7
	En	312167	316429	320011	323456	322834	327213	327204	328332	328793	328249

Gh: kWh/m²/d; Ta: °C; En: kWh/y

15. melléklet Soproni régióra vonatkozó szimuláció eredménye

		2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
RCP	Gh	3,37	3,43	3,50	3,52	3,54	3,55	3,54	3,54	3,53	3,53
2.6	Ta	11,00	11,40	11,80	12,00	12,30	12,40	12,30	12,20	12,10	12,00
	En	320284	325806	332901	332366	335737	339056	334982	336633	335190	334260
RCP	Gh	3,37	3,40	3,44	3,46	3,48	3,49	3,50	3,50	3,51	3,52
4.5	Ta	11,00	11,50	11,80	12,20	12,60	12,90	13,10	13,40	13,60	13,80
	En	320284	322216	323847	325572	328188	328194	327107	327896	330459	331329
RCP	Gh	3,37	3,41	3,46	3,49	3,51	3,52	3,54	3,55	3,57	3,58
8.5	Ta	11,00	11,60	12,10	12,70	13,30	13,90	14,60	15,40	16,00	16,70
	En	320284	324466	327323	330906	331064	330332	331047	332536	333078	333808

Gh: kWh/m²/d; Ta: °C; En: kWh/y

16. melléklet Szegedi régióra vonatkozó szimuláció eredménye

		2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
RCP	Gh	3,39	3,47	3,56	3,58	3,62	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63
2.6	Ta	11,70	12,30	12,60	12,90	13,10	13,30	13,20	13,20	13,10	13,10
	En	312955	319140	329890	332669	336042	338444	337344	337842	336166	336567
RCP	Gh	3,39	3,44	3,50	3,51	3,53	3,54	3,56	3,57	3,58	3,59
4.5	Ta	11,70	12,20	12,70	13,10	13,40	13,70	14,00	14,20	14,50	14,80
	En	312955	317986	322761	322167	324195	324395	327953	327582	329716	328320
RCP	Gh	3,39	3,44	3,50	3,53	3,56	3,58	3,59	3,61	3,62	3,64
8.5	Ta	11,70	12,40	12,80	13,50	14,10	14,80	15,60	16,20	16,90	17,60
	En	312955	318347	324218	325353	326632	330559	332320	334557	332285	333748

Gh: kWh/m²/d; Ta: °C; En: kWh/y

17. melléklet Szombathelyi régióra vonatkozó szimuláció eredménye

		2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
RCP	Gh	3,25	3,32	3,40	3,42	3,44	3,45	3,45	3,45	3,44	3,44
2.6	Ta	10,80	11,20	11,60	11,80	12,00	12,10	12,00	12,00	11,90	11,90
	En	304942	313017	316971	321093	322879	321446	322612	321469	320502	319892
RCP	Gh	3,25	3,30	3,34	3,36	3,38	3,40	3,40	3,41	3,42	3,43
4.5	Ta	10,80	11,20	11,60	11,90	12,40	12,70	12,90	13,10	13,50	13,60
	En	304942	305917	310457	311970	312324	314720	315023	314197	314439	315534
RCP	Gh	3,25	3,3	3,34	3,37	3,4	3,42	3,43	3,44	3,47	3,48
8.5	Ta	10,80	11,40	11,80	12,40	13,00	13,70	14,40	15,20	15,90	16,50
	En	304942	307570	311724	311707	314772	317921	315283	318861	318542	320084

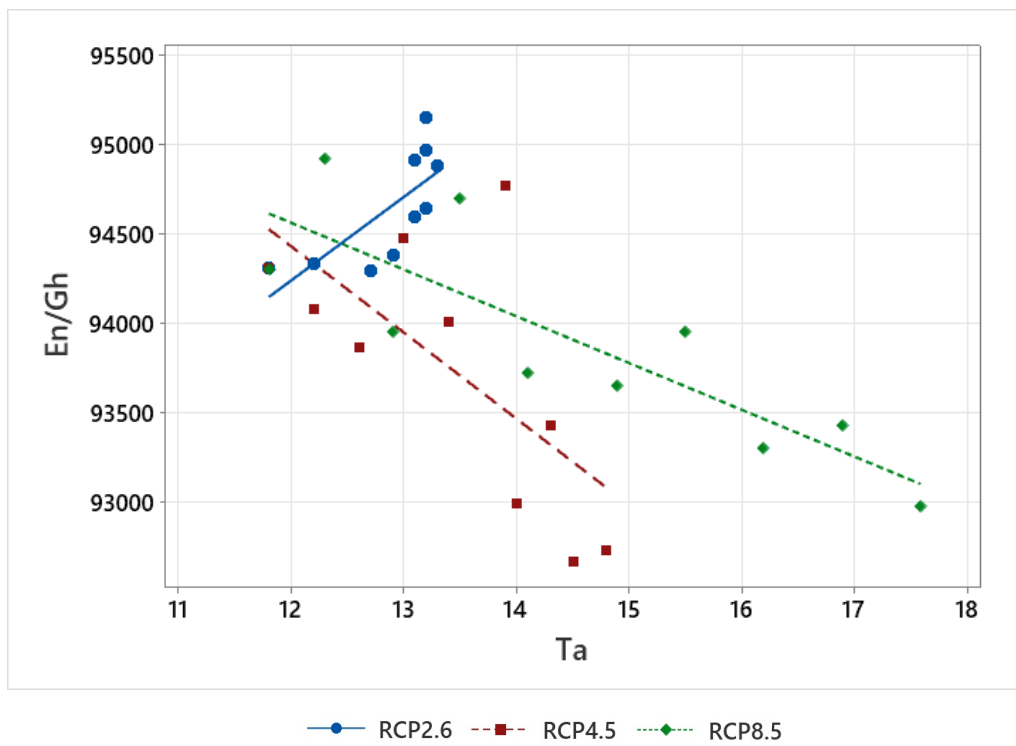
Gh: kWh/m²/d; Ta: °C; En: kWh/y

18. melléklet Veszprémi régióra vonatkozó szimuláció eredménye

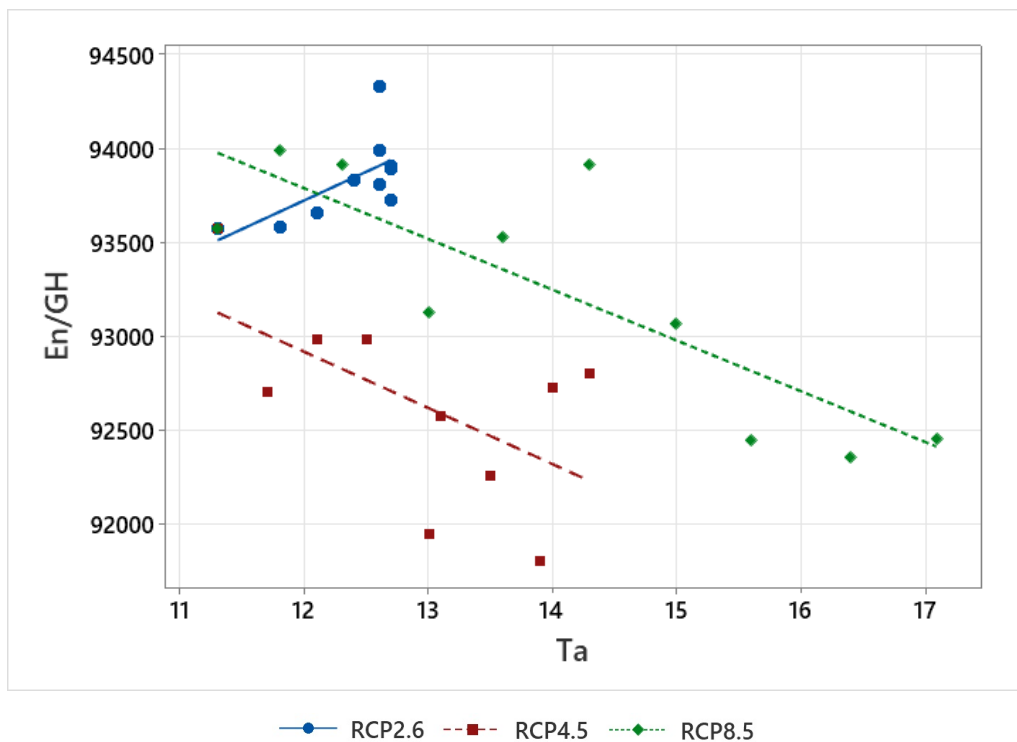
		2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
RCP	Gh	3,32	3,38	3,45	3,47	3,49	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
2.6	Ta	10,70	11,10	11,50	11,80	12,00	12,20	12,10	12,10	11,90	11,80
	En	308564	314782	322688	323791	325282	325908	325870	327357	323869	328741
RCP	Gh	3,32	3,34	3,37	3,39	3,41	3,42	3,43	3,44	3,46	3,47
4.5	Ta	10,70	11,20	11,50	11,90	12,30	12,60	12,90	13,00	13,30	13,60
	En	308564	310404	312302	314543	314863	315566	316328	317329	316885	318324
RCP	Gh	3,32	3,36	3,40	3,43	3,45	3,47	3,48	3,50	3,51	3,53
8.5	Ta	10,70	11,40	11,80	12,50	13,10	13,80	14,40	15,20	15,90	16,60
	En	308564	314669	317641	317095	320289	321066	322789	322312	321856	322926

Gh: kWh/m²/d; Ta: °C; En: kWh/y

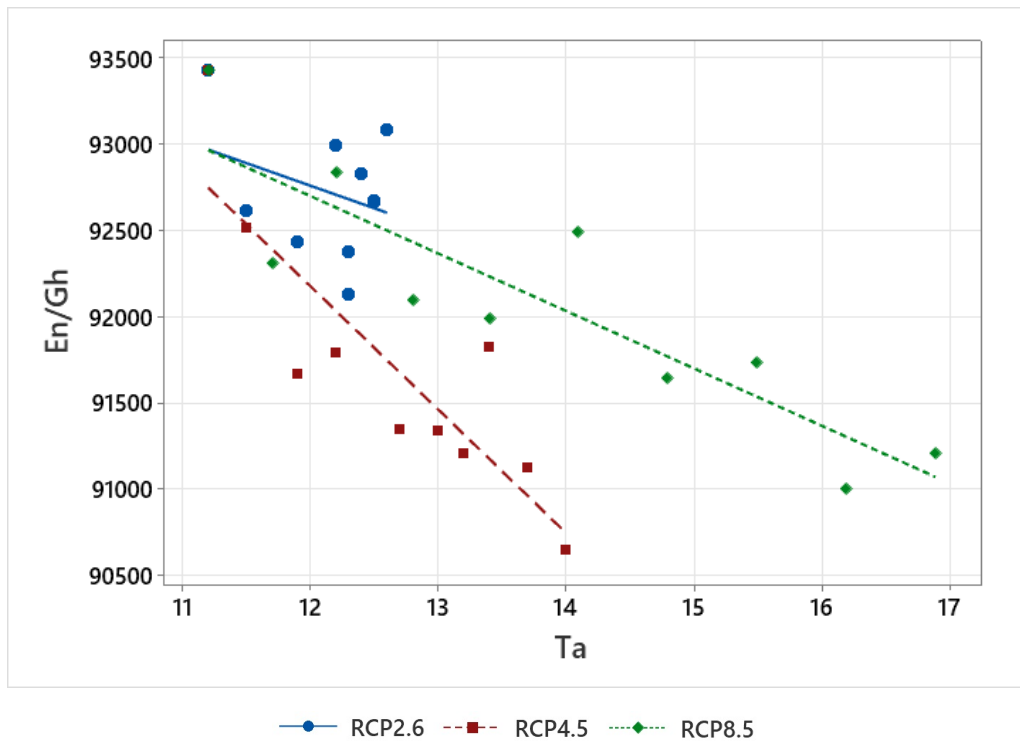
19. melléklet Budapest, RCP regresszió



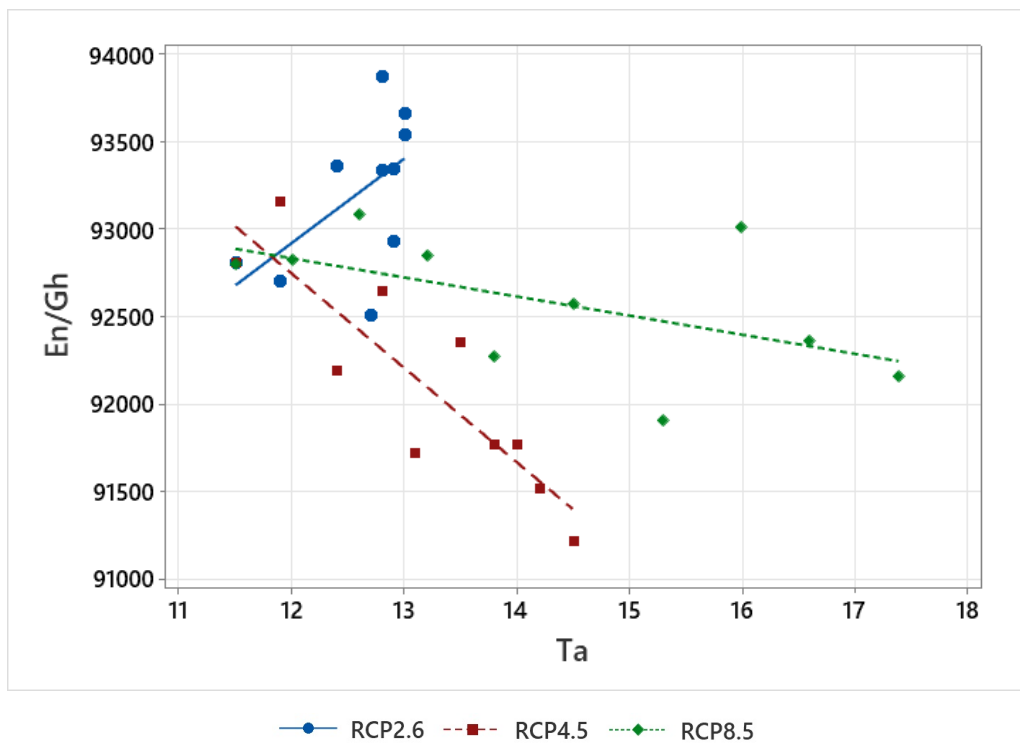
20. melléklet Debrecen, RCP regresszió



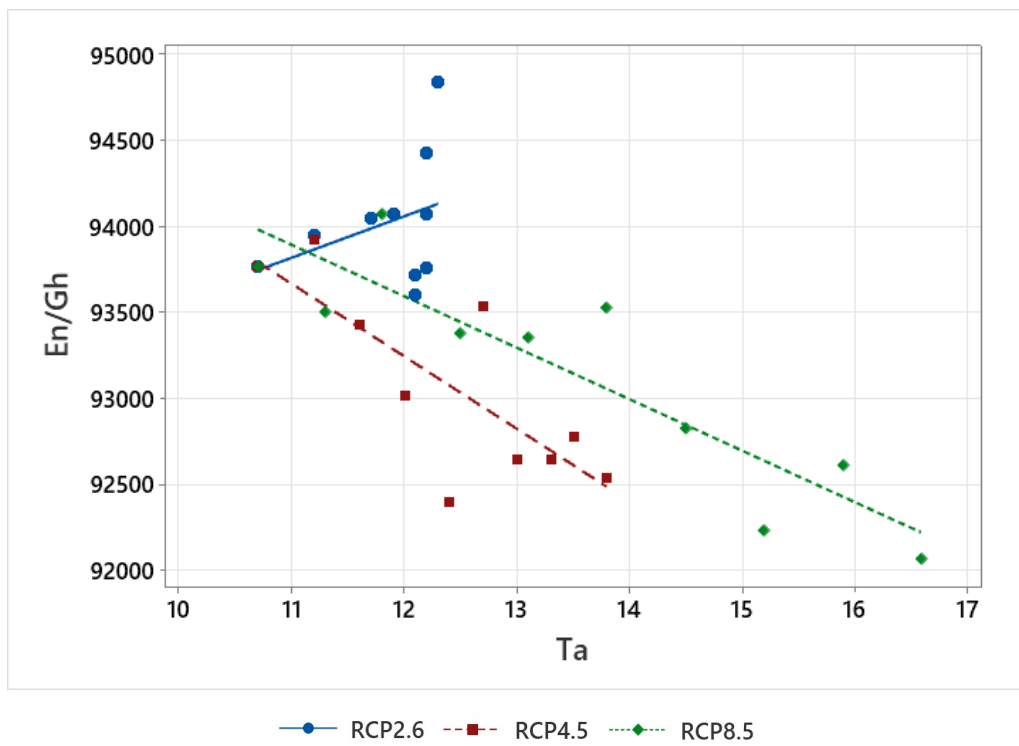
21. melléklet Győr, RCP regresszió



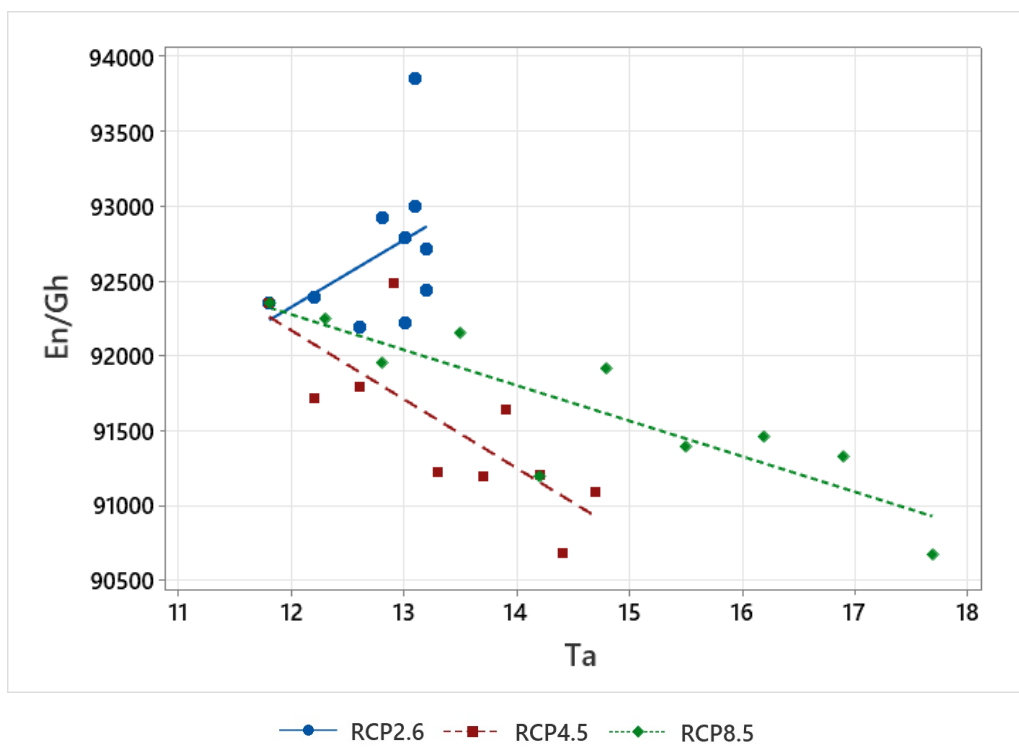
22. melléklet Kecskemét, RCP regresszió



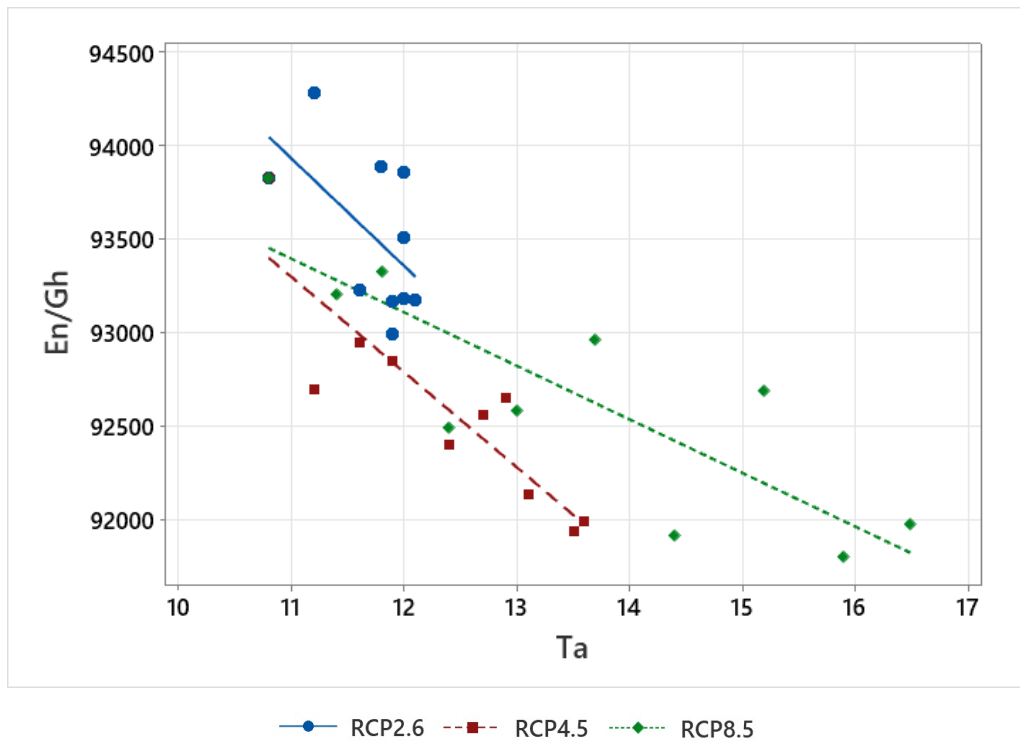
23. melléklet Miskolc, RCP regresszió



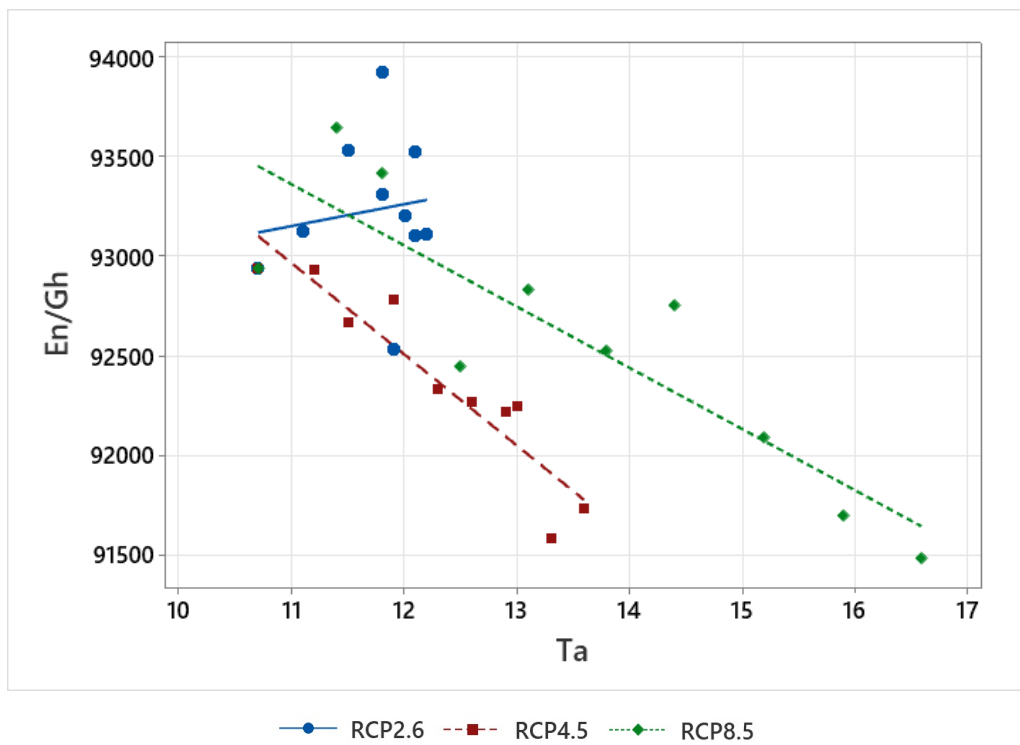
24. melléklet Pécs, RCP regresszió



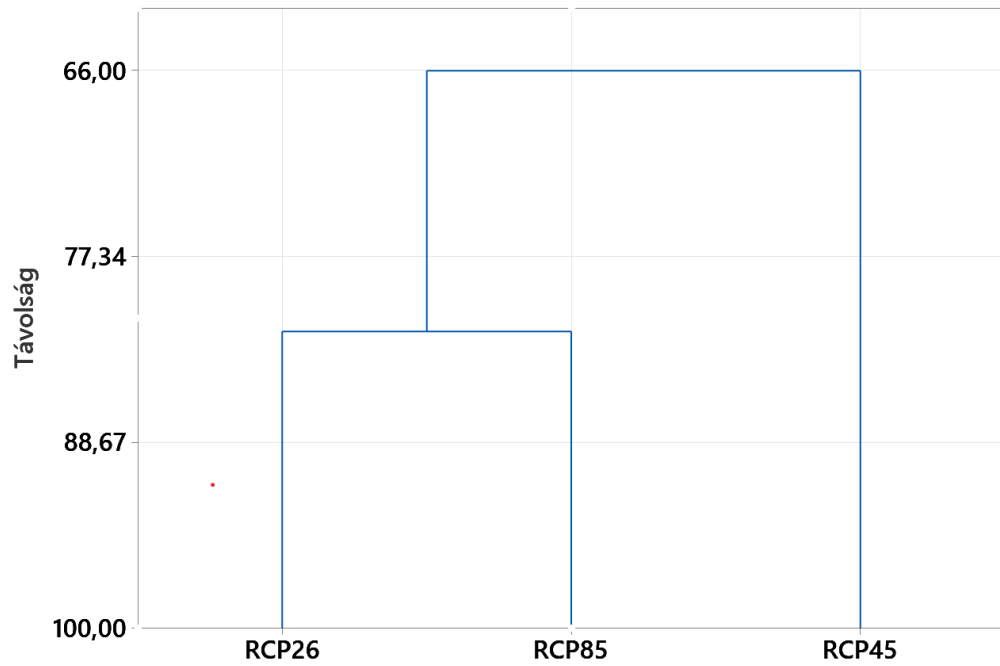
27. melléklet Szombathely, RCP regresszió



28. melléklet Veszprém, RCP regresszió



29. melléklet Az RCP-forgatókönyvek közötti hasonlóság hierarchikus klaszterezéssel



Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti Prof. Dr. Takács Istvánt szakmai iránymutatásáért, következetes támogatásáért és inspiráló gondolataiért, amelyek nélkül ez a disszertáció nem jöhetett volna létre.