



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Prantner József

**NAPELEMES RENDSZER TERMELÉS
ELŐREJELZÉSÉNEK VIZSGÁLATA ÉS
OPTIMALIZÁCIÓJA ENERGIATÁROLÓVAL**

KONZULENS

Dr. Dülk Ivor

BUDAPEST, 2023

Tartalomjegyzék

| | |
|---|-----------|
| Összefoglaló | 3 |
| Abstract..... | 4 |
| 1 Elméleti áttekintés..... | 5 |
| 1.1 PV panel működése és PV rendszer felépítése, működése | 5 |
| 1.2 Meteorológia alapkérdések (besugárzás) és mérések | 6 |
| Besugárzás és mérése..... | 6 |
| Besugárzás előrejelzésének lehetőségei..... | 8 |
| Meteorológiai adat és előrejelzés szolgáltatók | 9 |
| 1.3 Termelés előrejelzés (menetrend)..... | 11 |
| A menetrend tartásának lehetőségei | 11 |
| 1.4 Energiatárolás típusai..... | 13 |
| 2 Célkitűzés, módszertan..... | 15 |
| 3 Megvalósítás | 17 |
| 3.1 Monitoring és meteorológiai adatok feldolgozása..... | 17 |
| Panel hőmérséklet | 17 |
| Árnyékolás | 18 |
| 3.2 Szolgáltatói adatok vizsgálata..... | 19 |
| Besugárzás | 20 |
| Kvantálási hiba | 25 |
| 3.3 Energiatároló hatása a termelés előrejelzés hibájára | 27 |
| Teljesítmény átalakító hatása..... | 27 |
| Energiatároló kapacitásának hatása | 31 |
| Teljesítmény és kapacitás | 35 |
| 4 Diskusszió..... | 39 |
| Irodalomjegyzék..... | 40 |

Összefoglaló

A fenntarthatóság szempontjából a megújulóknak, azon belül pedig a napelemes (fotovoltaikus) energiatermelő rendszereknek kiemelt szerep jut. Egy közüzemi hálózatra termelő napelemes rendszer (erőmű) gazdasági megtérülése és profitabilitása a műszaki kialakítás és megvalósítás mellett a megtermelt villamos energia kereskedelmétől is nagymértékben függ. Utóbbi feladat egy ilyen volatilisen változó rendszer esetében számos kihívást rejt magában, mint például a menetrend, azaz a jövőbeli időpontokra előzetesen becsült termelési profil tartása minél kisebb hibával. A menetrendtől való eltérés szabályozói pótdíj kiszabását eredményezi, ami végső soron a napelemes rendszer által termelt bevételt csökkenti.

A dolgozatomban a napelemes rendszerek termelés előrejelzésével (menetrend), illetve a menetrendi hiba csökkentésével foglalkozom. Első lépésben a naperőművek termelésében fontos szerepet játszó meteorológiai adatok (pl. besugárzás) előrejelzésére szolgáló módszerekkel, azok alkalmazhatóságával, valamint az elérhető adatbázisokkal ismerkedem meg. A kinyert adatokat elemzem, továbbá valódi mérési adatokkal is összehasonlítom. A menetrendi hiba a meteorológiai előrejelzésen túl a rendszer energiátárolóval, például elektromos akkumulátorral való kiegészítésével is csökkenthető. Ezért a dolgozat második részében a meglévő valós helyszíni adatok és előrejelzések segítségével felépítetek egy szimulációs környezetet a szükséges modellekkel, amiben az energiátárolónak a menetrendi hibára gyakorolt hatását vizsgálom, továbbá keresem az energiátárolónak a feladat szempontjából optimális műszaki és gazdasági paramétereit.

Abstract

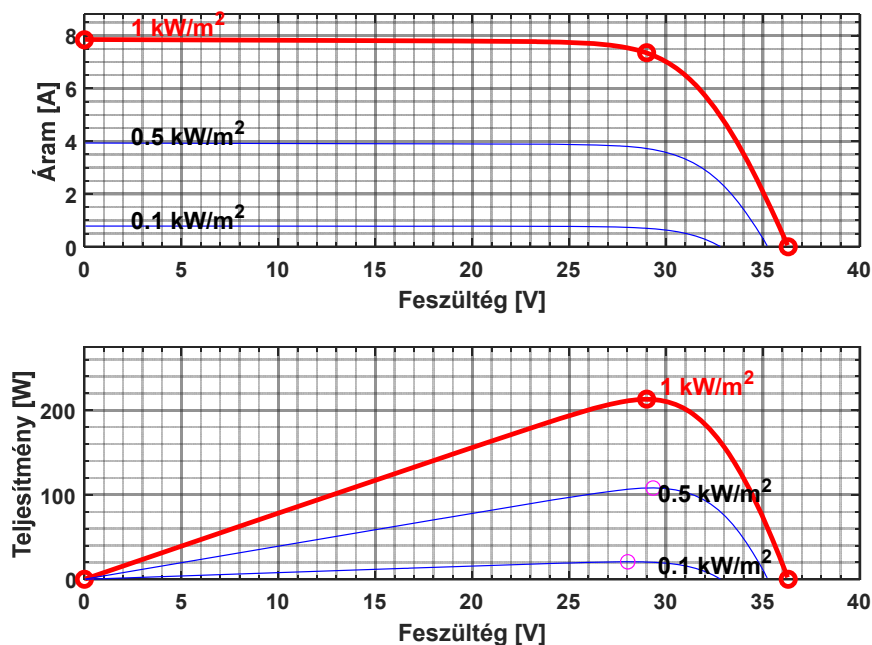
Renewable energy sources, including solar (photovoltaic) power generation systems, play a vital role in sustainability. The economic returns and profitability of grid-connected solar photovoltaic (electricity) systems depend not only on the technical design and installation but also on the commercial exploitation of the produced electricity. The latter task presents a number of challenges for such a volatile system, such as maintaining a day-ahead schedule, i.e. a production profile forecast for future dates with as little error as possible. Deviations from the schedule result in a regulatory surcharge, which reduces the revenue of the solar PV system.

In my project, I am working on the prediction (scheduling) of solar energy production and the reduction of scheduling errors. In the first step, I will describe methods for forecasting meteorological data (e.g. irradiance), which play a crucial role in solar power generation, and their applicability. I will analyse the available databases and compare the extracted data with real measured data. In addition to meteorological forecasting, the scheduling error can be reduced by adding an energy storage device to the system, e.g. an electric battery. Therefore, in the second part of the project, I will build a simulation environment with the necessary models using real field data and forecasts to investigate the effects of energy storage on the scheduling error and to find the optimal technical and financial parameters of energy storage for the task.

1 Elméleti áttekintés

1.1 PV panel működése és PV rendszer felépítése, működése

A fotovoltaikus energiaátalakítás alapja, hogy ha a félvezető rétegeket (PN átmenet) sugárzás éri, akkor a rétegek által elnyelt fotonok a rétegben lévő elektronokat gerjesztik, melyek így szabad töltéshordozóvá válnak. Egy PN átmenet esetében létrejövő feszültség kb. 0.6V, és mivel ez a feszültség igen kicsi, így ezekből a PN átmenetekből többet sorba kötve napelem panelt kapunk. Így már egy panel maximális teljesítménye elérheti a 400W-ot is kb. 30-40V mellett. A teljesítmény növelése érdekében a paneleket sorba kötve stringeket hozunk létre (ennek korlátja, hogy a PN átmenetet átütési feszültségét nem lépheti át a stringek feszültsége). Ha a teljesítményt még mindig növelni szeretnénk, akkor a stringeket párhuzamosan kötve azt is megtehetjük. Mivel a napelemek egyenáramot állítanak elő és az elosztóhálózat pedig váltakozóáramú, így szükséges egy inverter ennek az átalakítására. Majd a váltakozóáramot amennyiben szükséges egy transzformátor segítségével a csatlakozási pontnak megfelelő feszültségszintre transzformáljuk.



1. ábra Napelem karakterisztikája a besugárzás függvényében

1. ábra az mutatja, hogy a besugárzás megváltozására jelentős mértékben változik a napelemből kivethető teljesítmény.

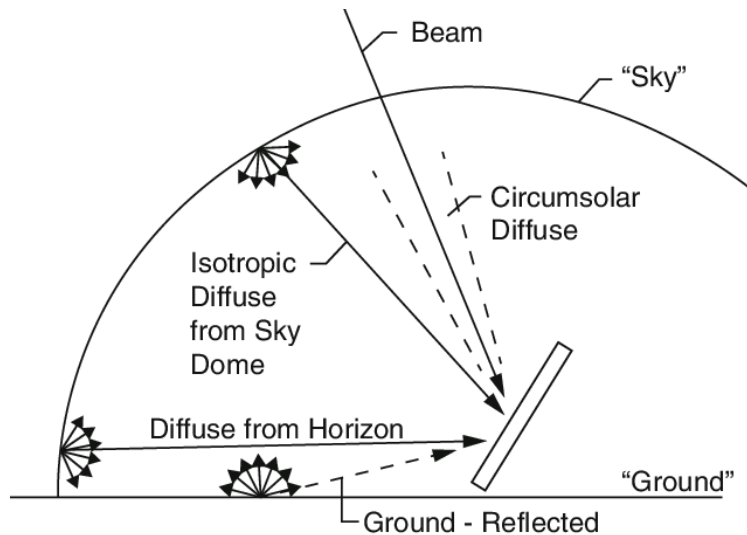
1.2 Meteorológia alapparaméterek (besugárzás) és mérések

A napelem panel termelése jelentősen függ a környezeti paramétereiktől, melyek közül a legjelentősebbek a Napból érkező fény (annak spektruma és intenzitása, a továbbiakban **besugárzás**), illetve a **napelem celláinak hőmérséklete**, amit a besugárzással együtt a **környezeti hőmérséklet** és **szélsebesség** határoz meg. A napelemes rendszer esetében a fenti alap tényezőkön túl természetesen a rendszer kialakításának sajátosságai és a rendszer további komponensei is jelentős hatással bírhatnak a termelésre, de ezekkel jelen dolgozatban most kevésbé foglalkozom, inkább az alapvető, „bemenő” környezeti feltételek vizsgálatára szorítkozom.

Besugárzás és mérése

Vizsgálatom során először a besugárzással foglalkozom, mint a napelemes rendszer kimenő villamos teljesítményét közvetlenül a legnagyobb és legdinamikusabb mértékben befolyásoló mennyiséggel. A napból érkező és felhasználható besugárzás felbontható különböző komponensekre. Megkülönböztethető a közvetlenül érkező ezáltal irányított és „árnyékkal” rendelkező direkt, a közvetlen irányultsággal nem rendelkező szórt, és a visszavert (Ground Reflected) sugárzást, amit az 2. ábra is bemutat. Ezen felül gyakorlati megfontolásból szokás még definiálni a további besugárzásokat:

- **GHI** – Global Horizontal Irradiation: a vízszintes síkra érkező összes besugárzási teljesítmény (komponensek eredője).
- **GTI** – Global Tilted Irradiation: egy valamilyen irányultsággal, dőlésszöggel rendelkező síkra érkező összes besugárzási teljesítmény (komponensek eredője).
- **DHI** – Diffuse Horizontal Irradiation: a vízszintes síkra érkező szórt besugárzás.



2. ábra Sugárzás komponensei (Gairaa et al., 2015)

Egy adott helyszínen a besugárzás mérésére több módszer, eszköz létezik, amelyeket röviden ismertetek (lásd 3. ábra).



3. ábra Baloldalon - Pirheliométer (“What is a pyrheliometer?,” n.d.)

Középen - Piranométer (“SR20 pyranometer | Hukseflux | secondary standard pyranometer,” n.d.)

Jobbolal on - Referencia panel (“ADL-SR,” n.d.)

A **Pirheliométer** eszköz párhuzamos sugárzás mérésére alkalmas, mellyel a naptól érkező direkt sugárzás mérhető, ha kiegészítésre kerül egy mozgató szerkezettel, ami mindig a napra irányítja.

A **piranométer** a felületére érkező sugárzást méri. A készülék elhelyezésétől függ, hogy a besugárzás mely komponenseit méri. Vízszintes felületre, a Föld síkjába helyezve méri a GHI-t, ha pedig egy napelem tábla síkjába akkor pedig a GTI-t.

A **referencia panel** – ami tulajdonképpen egy kis méretű napelem - lényege, hogy a napelem karakterisztikájából számolja a felületére érkező besugárzást. Használatának előnye, hogy mivel kifejezetten napelemes rendszerekhez tervezték

könnyedén rögzíthető a napelemes táblák síkjában és általában csatlakoztathatóak hozzá külső szenzorok is pl. panel vagy környezeti hőmérséklet mérésére alkalmas.

Besugárzás előrejelzésének lehetőségei

A besugárzás előrejelzése kulcsfontosságú a menetrendezés szempontjából, mivel előre kell megmondani, mennyi energiát fog a rendszer termelni. Erre alkalmas módszereket tekintek át. Némely módszer a besugárzás mellett egyéb környezeti változók előrejelzésére is alkalmas.

Az **égboltkamera** (Sky imager), egy nagy felbontású kamera, melyet arra használnak, hogy az égboltot figyelje és ez alapján becsülje a lokációjára a besugárzás értékeit rövidtávon 0-60 perc időintervallumban.

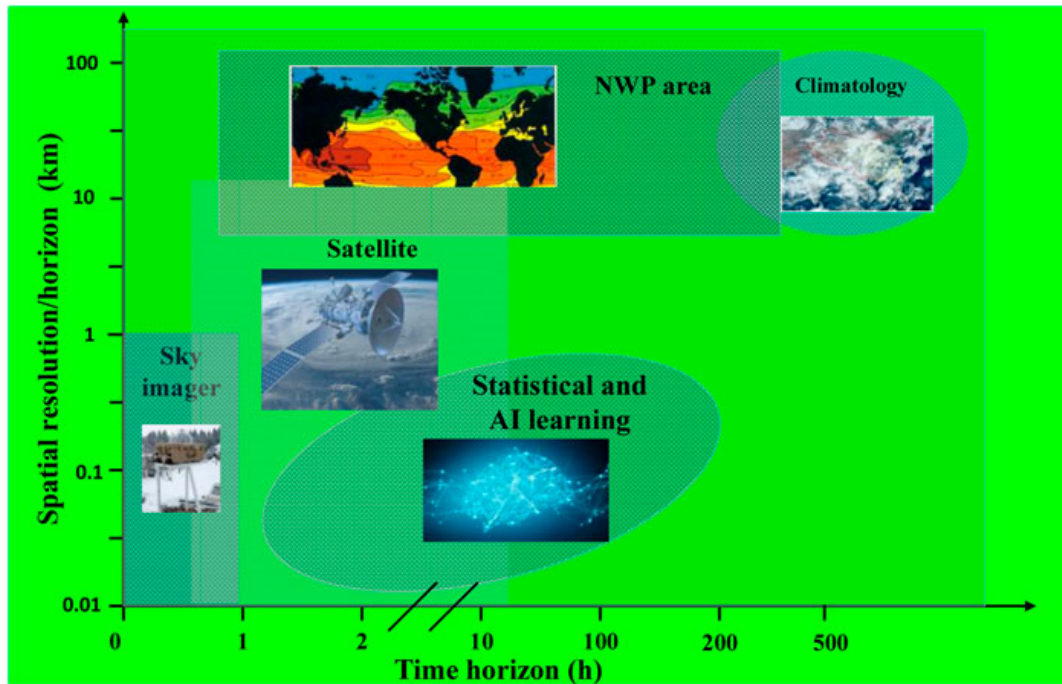
Műholdas megfigyelésen alapuló előrejelzés. Kontinensünkön az European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) szervezet üzemelteti a Meteosat műholdsorozatot, aminek aktuális verziója a Meteosat-11, ami egy Föld körül geostacionárius pályán keringő meteorológiai műhold. Ezek a műholdak képek formájában (nem csak a látható fény tartományában) méréseket végezve szolgáltatnak adatokat, melyek alapul szolgálnak a felhők és a légköri adatok szolgáltatásához. Ezeket az adatokat általában extrapolálással, gépi tanulással alkalmazzák időjárás előrejelzésre.

A **numerikus időjárás előrejelzés (NWP)** alapja, hogy a légkör és felhőzet változásai elvileg leírhatóak fizikai (pl. áramlástan, hőtani) differenciálegyenletekkel, azonban ezek az egyenletek, általában túl komplexek, hogy analitikusan megoldhatóak legyenek, ezért inkább numerikus megoldásokat alkalmaznak. Az NWP modelleket megkülönböztethetjük területi (pl. globális, regionális) és időbeli (néhány óra - hetek) felbontás alapján is. Az European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) szervezete ilyen előrejelzéseket ad ~10-30km-es területi, és néhány hetes időbeli felbontás mellett.

A gépi tanulás robbanásszerű terjedésének köszönhetően a meteorológiai előrejelzések készítésénél is megjelent. Alkalmazása széleskörű attól függően, hogy milyen adatokat használnak a modell tanítására, illetve, hogy milyen típusú előrejelzésekre vagyunk kíváncsiak.

A **Klimatológia** a Föld légköri és éghajlati változásainak hosszú távú (évtizedes) váltoásaival foglalkozik, ami számomra most kevésbé releváns.

A 4. ábra Előrejelzési algoritmusok és a hozzá tartozó idő/tér horizon (Ye et al., 2022) mutatja be, hogy milyen időbeli és térbeli felbontással rendelkeznek az egyes módszerek.



4. ábra Előrejelzési algoritmusok és a hozzá tartozó idő/tér horizon (Ye et al., 2022)

Megfigyelhető, hogy az égbolt kamera a nagyon rövidtávú előrejelzése miatt a másnapi menetrend megállapításban nem alkalmazható ellenben, ha van lehetőségünk a napközben „módosítani” a menetrendet, akkor jól használható.

A statisztikai és NWP megoldások alkalmasak a másnapi előrejelzés megállapítására, mely általában a meteorológiai műholdakból származó információon alapul.

Meteorológiai adat és előrejelzés szolgáltatók

Az előző fejezetben megfigyelhettük, hogy az időjárás előre jelzése egy meglehetősen komplikált terület, dolgozatomban nem célom időjárás előrejelzés készítése, viszont vannak ipari szereplők, akik ilyen előrejelzések készítésére szakosodtak. A továbbiakban az ő általuk szolgáltatott környezeti adatokat használom a vizsgálataimhoz.

A dolgozatomhoz több szervezetet is megvizsgáltam, ezek közül több szolgáltató, alkalmatlan volt erre a feladatra, mivel nem volt elérhető Magyarország területére. Másik jellemző probléma a modellek időbeli felbontása, hogy túl nagy lépésközzel állították elő a szimulációjukat pl. 1 óra, ami a 15 perces menetrendezés miatt nem alkalmazható. Egyes adatbázisok nem tartalmaznak friss adatot pl. a ("Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS),) 2020-ig szolgáltatót.

Végül a Solcast-ra esett a választásom, mivel ők bocsátottak a rendelkezésemre adatokat, melyek használható dokumentációval és a napelemes rendszerek termelésének számításához szükséges információt tartalmaznak.

Az összehasonlítások során egy cikk két másik szolgáltatóval összehasonlítva a Solcast-et hozta ki legjobbnak, viszont a cég által szolgáltatott referenciáknál nagyobb eltérést állapított meg (Ashan Induranga and Viduruwan Geekiayange, 2021), mindemellett egy másik kutatás pontosabbnak találta a szolgáltatott adatokat (Bright, 2019), mint az előző.

Fontos megjegyezni, hogy a különböző adatszolgáltatók között a legfőbb különbségek, hogy milyen modelleket használnak a környezeti paraméterek becslésére. Erre két tanulmány is azt találta, hogy az alapján kell modellt választani, hogy mekkora a számítási kapacitás igénye, illetve mely modellhez vannak bemeneti adatok, mivel a modellek komplexitásának növelése kismértékben pontosítja a becslést. Ellenben a modell bemeneti adatainak minősége nagymértékben befolyásolja a becsléseket (Ineichen, 2006; Stein et al., 2012). A szolgáltatók között van némi változatosság abban, hogy más forrásból szerzik be a modellek futtatásához szükséges adatokat, viszont ezen a téren nincs sok lehetőség, mivel az Európai kontinens felett kizárólagosan az EUMETSAT szolgáltatót műholdas információt a légkörről.

1.3 Termelés előrejelzés (menetrend)

A menetrendezés az a folyamat a villamosenergia kereskedelmében, mikor az egyes piaci szereplők (termelők és fogyasztók egyaránt), leadják a másnapi teljesítményigényüket a rendszer irányítónak negyedórás felbontásban, aki ez alapján meghatározza az energia árát és azt is, hogy ki, mikor szolgáltathat vagy fogyaszthat villamosenergiát. Erre azért van szükség, mivel minden időpillanatban a megtermelt és felhasznált villamosenergia mennyiségének egyensúlyban kell lenni az elektromos hálózaton.

A menetrendi hiba nem más, mint a beadott menetrendtől való eltérés mind pozitív mind negatív irányba, amit a rendszer irányítójának ki kell egyenlíteni (erre szolgál az ún. kiegyenlítő energia). A menetrendi hiba a kiegyenlítés miatt pótdíj kiszabásával jár, így ennek célja, hogy a szereplők a menetrendjüktől lehetőleg ne térjenek el. Amíg a menetrend tartása egy jól szabályozható (és prediktálható) hőerőmű esetén nem jelent nagy kihívást, addig egy, a környezeti paraméterek (pl. besugárzás) gyors változásainak kitett napelemes rendszer esetén egyáltalán nem triviális feladat.

A menetrend tartásának lehetőségei

A triviális megoldás, ha a meteorológiai adatokat – leginkább a besugárzást - illetően tökéletesen **pontos előrejelzéseink** vannak. Megjegyzendő, hogy ez még azonban kevés, mivel a környezeti paraméterekből a villamos teljesítményt származtatni kell, amihez egy ún. erőmű modellre is szükség lehet. Sajnálatos módon a besugárzás becslése nem egyszerű feladat, ezért is jött létre ennyi különböző komplexitású és pontosságú modell a környezeti paraméterek becslésére.

Gyakorlatban használt, viszont árbevétel szempontjából kevésbé kedvező megoldás a **naperőmű visszszabályozás**, aminek lényege, hogy kevesebb energiát termel a rendszer a hálózatra, mint amennyit ténylegesen tudna. Ez megoldást jelent arra a problémára, hogy pozitív hiba ne legyen, illetve amennyiben a becsült termelésnél, kisebb mennyiséget jelentenek be a menetrendben, vagyis a naperőmű alapból sem maximálisan kivehető teljesítménnyel dolgozik, akkor a negatív hibák is csökkenthetőek azzal, hogy növelem a rendszer hatásfokát, ha a besugárzás csökken. Ez a megoldás nem optimális, mivel nem használható ki maximálisan a megújuló energiaforrásaink. A hirtelen nagy változások negatív irányba általában

kompenzálhatóak, de nem szüntethetőek meg teljesen, hacsak nem jelentősen alul méretezett a menetrend, ami a bevétel szempontjából sem előnyös.

Méréstechnikai alapokon tudjuk, hogy nincsen tökéletes mérés, minden mérésnek van mért értéke és egy bizonytalansága, továbbá a mérés szempontjából előnyös, ha több független mérés áll rendelkezésünkre, mivel így a mérés pontosabbá tehető (a bizonytalanság, vagyis a szórás csökkenthető). Piaci megfogalmazásban előnyösebb a befektetett eszközöket **diverzifikálni**, hogy a piaci változásnak kevésbé legyünk kitéttek, ennek is az a célja, hogy a profitot maximalizáljuk amellet, hogy a kockázatot csökkentjük. Ez úgy fordítható le a napelemes erőművekre, hogy előnyösebb több különböző helyszínen lévő kisméretű parkot együttesen kezelni, mint egy nagyot, mivel így kevésbé lesz a teljes rendszer kitétt a hirtelen változó környezetnek. Így már nem az egyes „termékeket” (naperőmű parkokat) kell önállóan optimalizálni, hanem a teljes portfóliónkon cél a bevételeink maximalizálása. Mindemelett egy nagy naperőmű parknak is meg lehetnek az előnyei: telepítési (beruházási), üzemeltetési, karbantartási szempontokból.

Gyakori megoldás más típusú megújulókkal **kombinálni a termelést**, amik „komplementer” módon kiegészíthetik egymást, például nap és szél erőművek esetében. A portfóliónk ezáltal tovább diverzifikálható.

Mint minden tőzsdén, a villamosenergia piacon is van **napon belüli kereskedés**, ami, ha van rá lehetőségünk akkor felhasználható a bevételek maximalizálásához. Ennek az áll a háttérében, hogy a mérési adatok és/vagy rövidtávú előrejelzések alapján (Műholdas extrapolációk, Égbolt kamera), valamilyen irányba eltérne a termelés a menetrendtől, akkor ellentétes irányú opciókkal, valamelyest korrigálható.

Az **energiatárolók** egy napelemes rendszer esetén több szempontból is hasznosíthatóvá válnak. A menetrendi hiba csökkenthető azáltal, hogy a többlet energiát átmenetileg eltároljuk, majd mikor energia hiány lépne fel akkor visszatápláljuk onnan, de természetesen ennek a megoldásnak is megvannak a maga korlátjai. A teljeség igénye nélkül: nincs végtelen kapacitású energiatároló és nem lehetséges bármekkora teljesítménnyel energiát szolgáltatni vagy eltárolni. Emellett az energiatároló arra is felhasználható, hogy a fotovoltaiikus erőmű termelési profilját befolyásolja, annak reményében, hogy az energia kereskedelméből nagyobb bevétel legyen elérhető.

Az előbbieken több lehetőséget ismertettem a menetrendi hiba csökkentésére, amelyek közül önmagában bármely megoldás használata kedvező hatással bír a menetrend betartására. Bármelyik egy önálló téma lehetne, hogy az eljárás alapján hogyan érdemes optimálisan üzemeltetni egy napelemes rendszert. Akár több különböző megoldás is használható egyszerre, mint ahogy az iparban teszik is, de ez az egyébként is nagy paraméterterű lehetőségeket még komplexebbé teszi. Továbbiakban a dolgozatomban a villamosenergia-tárolóknak a napelemes rendszerek menetrendi hibájára gyakorolt csökkentő hatását vizsgálom.

1.4 Energiatárolás típusai

A villamosenergia-tárolás területén is az utóbbi időben egyre gyorsabban jelennek meg az újabb és újabb (időnként kreatívabb) megoldások. Az energiátárolásnak több célja is lehet, mint például hosszú távú (nyár – tél közötti tárolás), vagy rövidtávú (napon belüli). Az utóbbi eset legfőbb oka, hogy az energia termelése és fogyasztása nincsen szinkronban egymással sem térben, sem időben. Ennek a hatása áthidalható energiátárolók beiktatásával. A legtöbb esetben nem villamosenergia formájában tárolják el a megtermelt áramot, hanem valamilyen energiaátalakításon megy keresztül, természetesen az energiaátalakítás és szállítás veszteségekkel jár, ami a rendszer hatásfokát csökkenti. Az energiátárolók nagyon különböző sajátosságokkal rendelkeznek: skálázhatóság, hatásfok, bekerülési és üzemeltetési költség, stb.

Főbb energiátároló típusok:

- Elektrokémiai (pl. akkumulátor)
- Mechanikai (pl. lendkerék, víztározók)
- Villamos (pl. kondenzátor)
- Hő (pl. gőz, melegvíz tároló)
- Hidrogén

Az elosztóhálózat szempontjából nem egy újkeletű dolog az energia tárolása a rendszer egyensúlyban tartása végett, gondoljunk az „éjszakai áramra”, aminek ez is volt a célja, hogy amikor energiátöbblet van a hálózaton akkor a felhasználóknál lévő

energiatárolókat (tipikusan bojler, hőtárolóskályha) felfűtötték, igaz az energiaátalakítás itt kizárólagosan egyirányú.

2 Célkitűzés, módszertan

A dolgozatom fő célja, hogy a napelemes erőművek számára releváns meteorológiai adatok előrejelzését összehasonlítsam valós helyszíni mérési adatokkal, majd pedig az ezen alapuló termelés előrejelzés hibájának az alakulását megvizsgáljam energiatároló használata esetén, annak főbb paramétereinek a függvényben. Ezt több, egymástól távoli magyarországi helyszínrre elvégzem, és az egyes eredményeket egymással összehasonlítom.

A vizsgálataim a következő helyszínekre terjednek ki: Berettyóújfalu, Csepreg, Vaskút, Vép. Berettyóújfalu esetében a felügyeleti rendszer 60 perces időbeli felbontásban szolgáltat információt a GHI-t mérő piranométerről és környezeti-, panelhőmérsékletről. Csepreg és Vép estében piranométer méri a GHI-t és GTI-t egyaránt, illetve a hőmérséklet adatok mellett a szélsébségről ad információt a felügyeleti rendszer 5 perces bontásban. Vaskút esetében a GTI-t egy referencia panel méri, amihez egy panelhőmérséklet és egy szélsébség mérő szenzor szintén csatlakoztatva, szintén 5 perces felbontással. Ez a felügyeleti rendszerből érhető el.

Ehhez először begyűjtöm az adatokat a különböző forrásokból, melyet szimuláció futtatására alkalmas formára hozok. Majd egy menetrendet készítek a meglévő adatszolgáltatói becslések alapján, ezt összehasonlítom valódi mérésekkel, ez alapján meghatározom a minőségét a becslésnek, amihez felhasználok a statisztika eszközeit. Ezzel párhuzamosan egy akkumulátormodellt készítek, mellyel a menetrendi hibára gyakorolt hatását tudom vizsgálni az energiatárolónak. Ehhez az elején egy minden szempontból ideális energiatárolóval kezdek, ami fokozatosan közelebb kerül egy valós akkumulátorhoz, hogy ténylegesen gazdasági szempontokat is figyelembe véve lehessen optimálisan méretezni az akkumulátort. A meglévő adatok alapján megalkotok egy menetrendező modellt, ami a figyelembe veszi az energiatárolót és a naperőművet is. A naperőművet csak az utolsó fázisban veszem figyelembe, mivel annak nem megfelelő komplexitású modellje nagy mértékben befolyásolná jelalakokat, ami a végeredmény torzítást eredményezné a statisztikai paraméterek meghatározása esetén és így az akkumulátor meghatározásában is. Viszont a tényleges menetrend megalkotásánál már nem hagyható figyelmen kívül. Ezt úgy vitelezem ki, hogy a számításaim során minden értéket 1m²-nyi felületre vizsgálom, melyből a naperőműmodellel könnyedén

átkonvertálhatóak a teljes rendszerre a szimulációim. A vizsgálatot során olyan helyszíneket veszek alapul, ahol vannak besugárzás mérők, melyek lehetőséget biztosítanak a vizsgálataim elvégzéséhez.

3 Megvalósítás

3.1 Monitoring és meteorológiai adatok feldolgozása

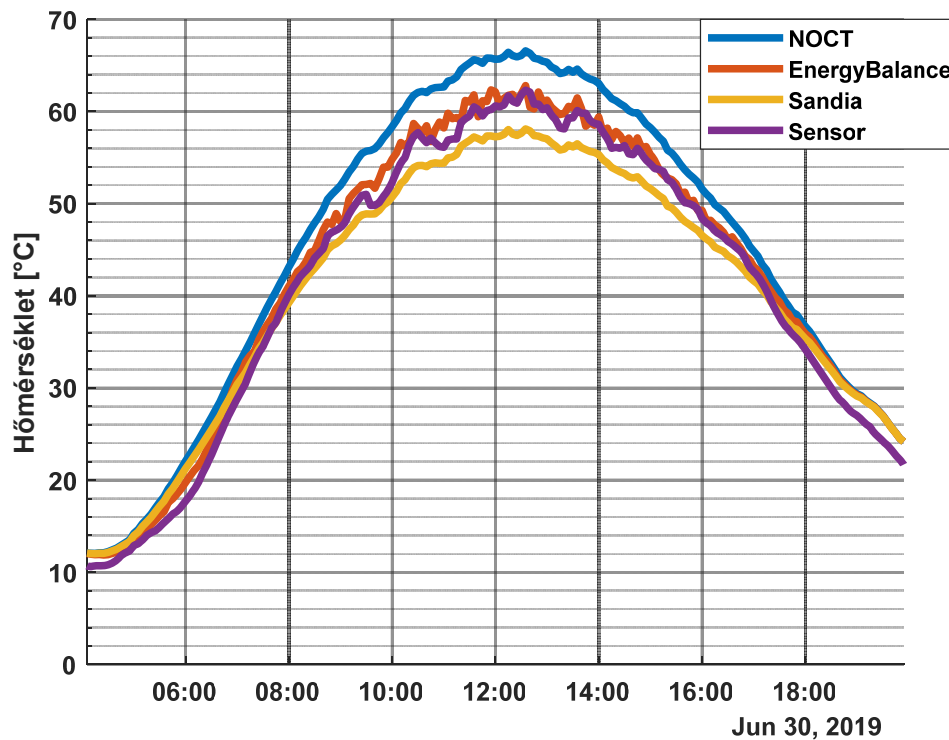
Dolgozatom szempontjából a legfontosabb, hogy a mérési és becsült adatokat össze lehessen hasonlítani. Ehhez az adatokat nem egy triviális feladat összegyűjteni, mivel minden lokáción különböző gyártó termékei vannak elhelyezve és összeintegrálva a naperóművek felügyeleti rendszerével, melyek különböző formátumban, különböző módon szolgáltatnak adatokat. Az adatokat, a modelleket és a szimulációkat MATLAB segítségével dolgozom fel.

Panel hőmérséklet

Egy napelem termelése során egyáltalán nem elhanyagolható a cellák hőmérséklete, amit mérni is csak akkor lehet, ha van beépítve szenzor a cellához közvetlenül, ami helyett a legtöbb esetben a panel hátoldalán szoktak utólag szenzorokat elhelyezni a hőmérséklet mérésére. A vizsgálataim során 3. különböző eljárást vizsgáltam a cellák hőmérsékletének becslésére:

- A panel normál üzemi cellahőmérséklet és tényleges besugárzás alapján egy lineáris összefüggéssel becsüli az NOCT eljárás a cella hőmérsékletét(Mattei et al., 2006)
- Felírható a napelemre a hőmérsékleti egyensúlyi állapotban a felvett és leadott energiákból egyszerűsítéssel számolva a cella hőmérséklete. (Energy balance) (Mattei et al., 2006).
- Sandia Module Temperature Model, pedig az amerikai székhelyű Sandia National Laboratories modellje(“Sandia Module Temperature Model,” 2023)

Az utóbbi két modell, a környezeti hőmérséklet és a besugárzás mellett már a szélsébséget is figyelembe veszi, sőt az egyensúlyi modell különböző eseteket állapít meg a szélsébségre attól függően, milyen irányból éri a felületet.

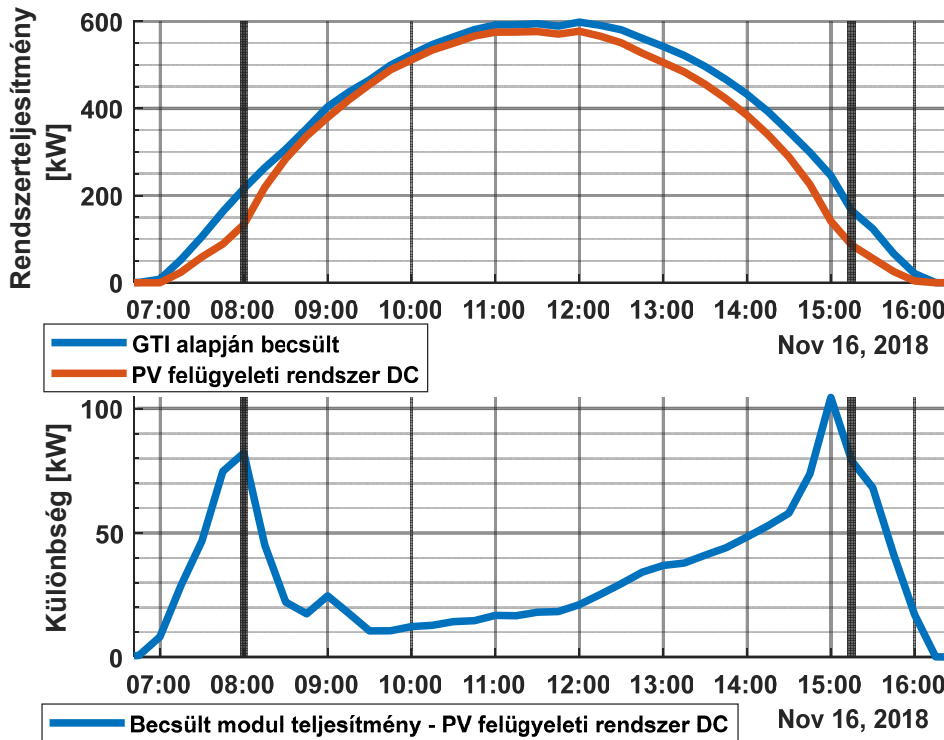


5. ábra Vép Panel hőmérsékletének becslése különböző modellekkel a mért környezeti paraméterek alapján, mért panelhőmérséklettel való összehasonlítása

5. ábra a cella hőmérsékletét becsülő modellek eredményét mutatja, melyeket a mért környezeti paraméterek alapján határoztam meg. Az ábrán megfigyelhető, hogy a modellek becsült cellahőmérséklete és a mért panel hőmérséklet között van különbség, viszont több napon megvizsgálva nem egyértelmű, hogy melyik modell a legalkalmasabb a feladatra.

Árnyékolás

A legtöbb naperőmű park felépítése olyan, hogy a sorok között nincs akkora távolság, az alacsony napállású időszakokban (pl. tél), hogy a reggeli és esti órákban, ne árnyékoljanak egymásra. Ennek nem csak az a következménye, hogy az árnyékolt sorokban kevesebbet fog termelni a rendszer, hanem a többi napelem termelésére is hatással van. Emellett a környezeti objektumok (pl. Erdők, távvezetékek és épületek), szintén okozhatnak árnyékolást.



6. ábra Vép sorok közötti árnyékolás hatása

A 6. ábra a vépi rendszer esetén mutatja be az árnyékolás hatását. Ennek a rendszernek az esetében a sorok közötti távolság viszonylag nagy, de reggel és este összesen több órányi árnyékolást kellene figyelembe venni. Megfigyelhető, az árnyékolt időszakokban 100kW-nyi teljesítménykülönbség is, ami a napközbeni maximum 500kW-os termeléshez viszonyítva is jelentős.

Az első ötletem az volt, hogy a teljes naperőműparkra határozok meg minden hibát, de gyorsan beláttam, hogy amíg a cella hőmérséklet becslése működőképes lehet, addig az árnyékolás hatásának figyelembevételére egy komplex 3D-s napelempark modelljére lenne szükségem, hogy az árnyékolás ne torzítsa az eredményeimet. Mivel a vizsgált napelemparkokban vannak besugárzásmérők, így azokhoz tudok viszonyítani, ennek következményeképpen a naperőművek modelljeire nincsen szükségem.

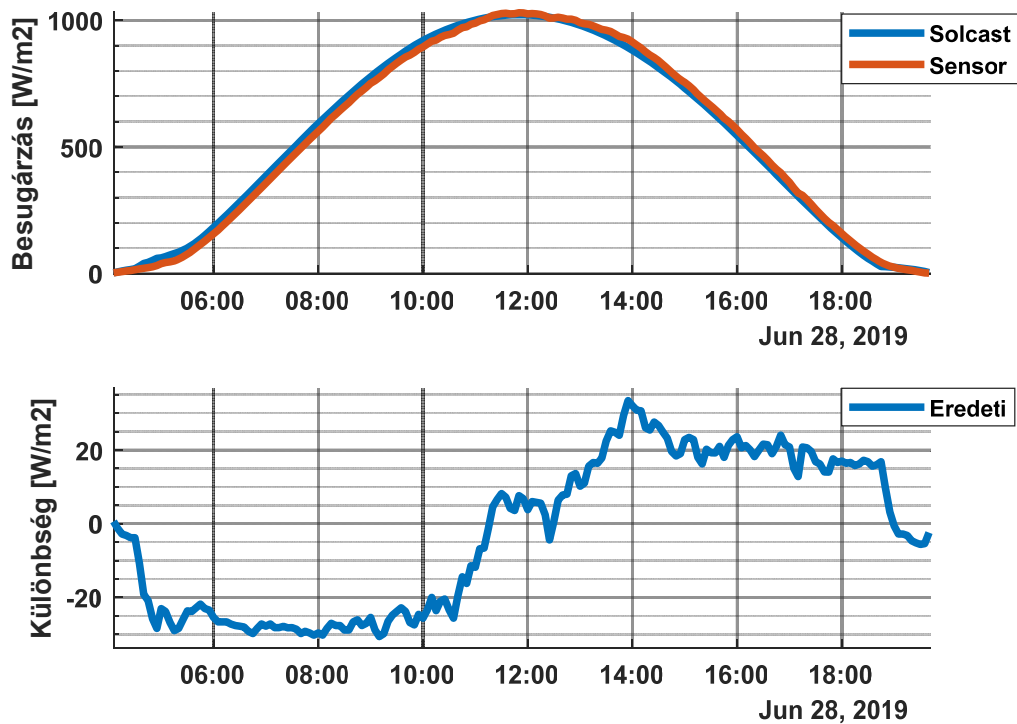
3.2 Szolgáltatói adatok vizsgálata

A menetrend előállítása szempontjából, nem elhanyagolható az adatszolgáltatótól kapott becslések használhatósága (pontossága). A terv az volt, hogy összehasonlítok több adatszolgáltatót, viszont végül csak a Solcast-től sikerült adatokat

szerezni. Az adatok összehasonlítását, korábban említett 4 lokációra végzem el. A Solcast adatai 5 perces szimulációs lépésközzel érhetőek el, így ahol eltérő a mérés és a szimuláció mintavételi ideje, ott közös időskálára hozom a vizsgálataimhoz, a jel alakokat.

Besugárzás

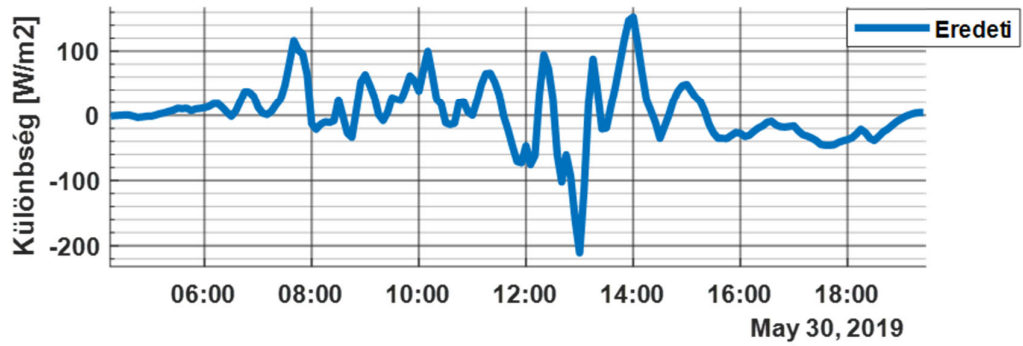
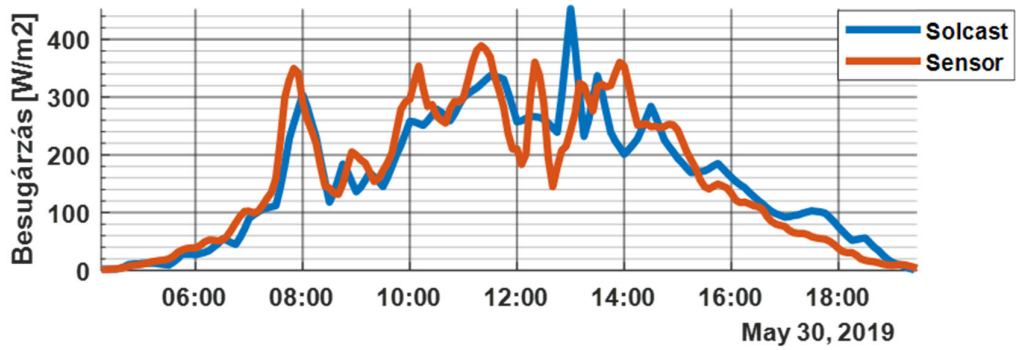
A következőkben bemutatok néhány ábrát különböző napokról, amik szemléltetik a Solcast által biztosított besugárzási adatokat és a valós mérési eredményeket.



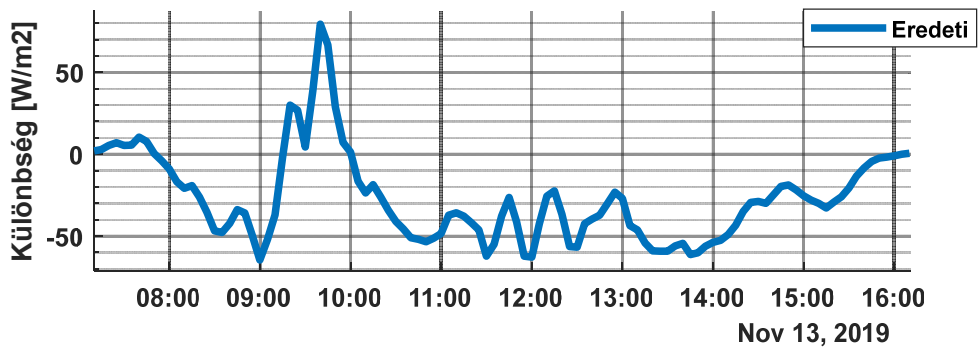
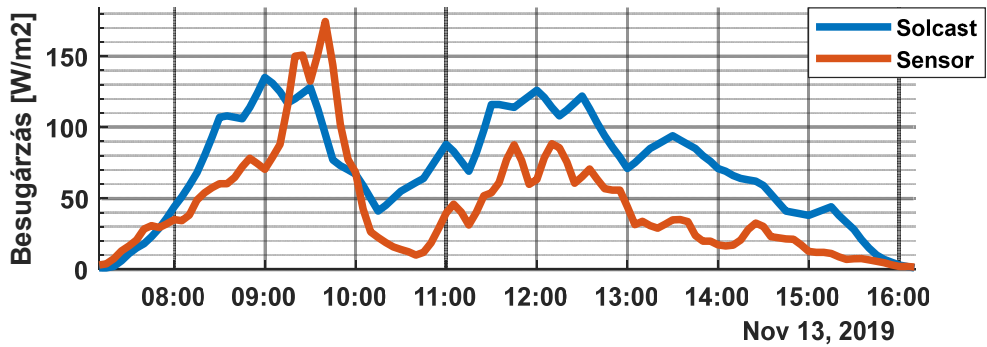
7. ábra Vép 2019.06.28. besugárzás 5 perces szimulációs idővel

7. ábra egy olyan napot mutat mikor egyáltalán nem volt hatása a felhőzetnek, ez a legegyszerűbb eset a besugárzás becslésére. Megfigyelhető a két jel különbség képzéséből, hogy maximálisan kb. ± 30 W/m² eltérés van, továbbá az is, hogy a különbség alakja középpontosan szimmetrikusnak tűnik, ennek az oka, hogy a jelek időben minimálisan el vannak csúszva.

Az elcsúszás hátterében az átlagolások állhatnak, illetve az, hogy a megépült vépi rendszernek valószínűleg nem tökéletesen déli a tájolású a besugárzás mérője.

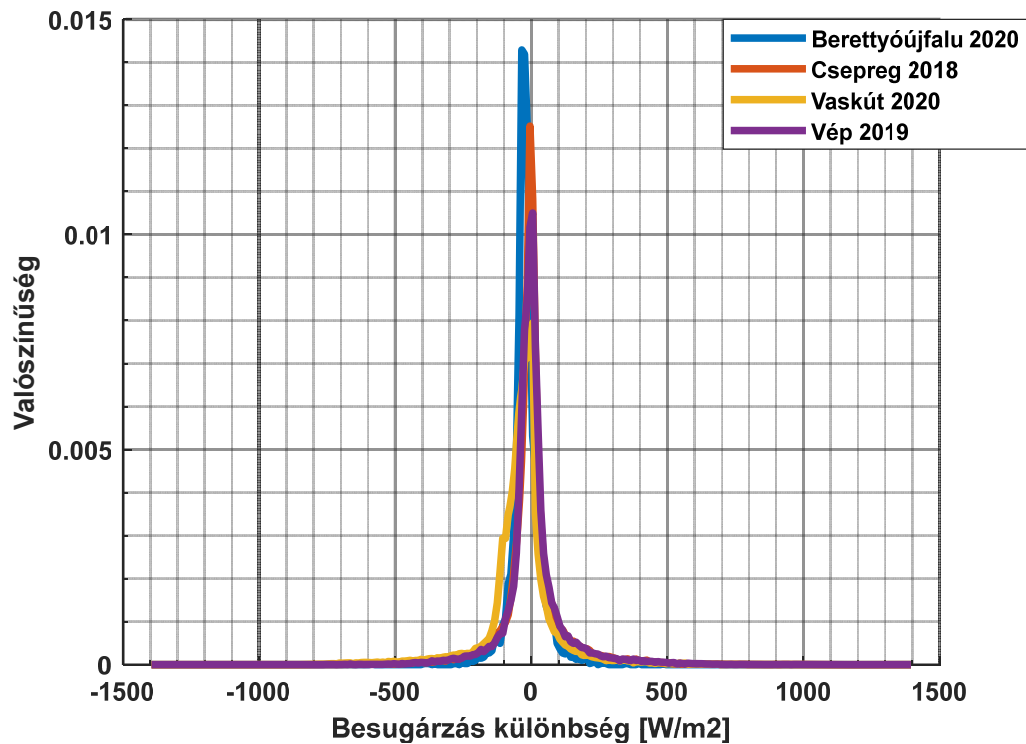


8. ábra Vép 2019.05.30. besugárzás 5 perces szimulációs idővel



9. ábra Vép 2019.11.13. besugárzás 5 perces szimulációs idővel

A 8. ábra és 9. ábra két olyan napot mutat mikor a felhőzetnek jelentős hatása van. Megfigyelhető az is, hogy jellegre a becslés összhangban van a mérésekkel, ezt minden lokáció alátámasztja. Míg a 8. ábra szerint a besugárzás pillanat értékei is jól közelítik a valódi értékeket, addig a 9. ábra esetében relatív nagyobb eltérés van. Az adatokat a leíró statisztika eszközeivel vizsgálva a következőket kaptam:



10. ábra Besugárzás hiba sűrűségfüggvény több lokációra

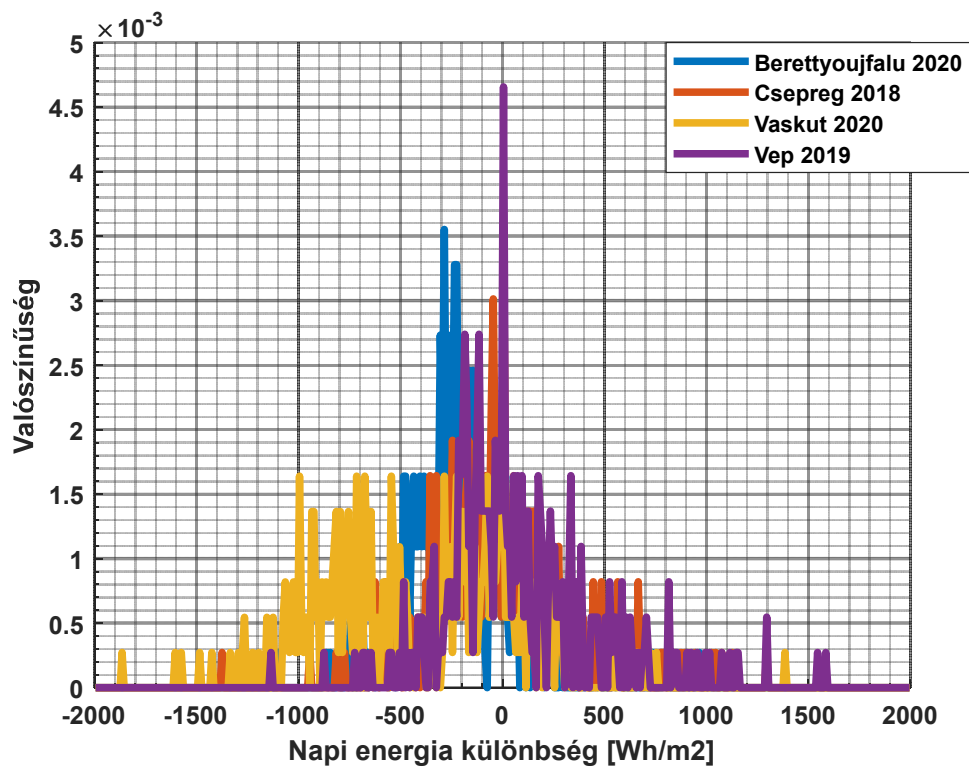
A 10. ábra azt mutatja, hogy egy-egy éven át hogyan alakul a hiba sűrűségfüggvénye, minden lokáción. Jellegre Student-féle t eloszlásra hasonlít, a paramétereit nem határoztam meg, mivel többlet információt nem hordoz a vizsgálat szempontjából. Megfigyelhető (11. ábra), hogy a különböző lokációkon jelentősebb eltérés van, mind várható értékben, mind szórásban, viszont egy lokáción a különböző évek között elhanyagolható a különbség. A várható értékből az következik, hogy a rendszer éves szinten több vagy kevesebb energiát, fog termelni, mint a becslés. A szórás és ezek az ábrák majd az energiatároló átalakítási teljesítményének meghatározásához

használhatóak fel.

| Lokáció | Besugárzás | Év | Várható érték [W/m ²] | Szórás [W/m ²] |
|----------------|------------|------|-----------------------------------|----------------------------|
| Berettyóújfalú | GHI | 2020 | - 18.8 | 55.9 |
| Berettyóújfalú | GHI | 2021 | - 18.5 | 57.7 |
| Berettyóújfalú | GHI | 2022 | - 18.2 | 58.1 |
| Csepreg | GTI | 2018 | 1.4 | 110.5 |
| Vaskút | GTI | 2020 | - 35.0 | 131.9 |
| Vaskút | GTI | 2021 | - 33.5 | 129.2 |
| Vaskút | GTI | 2022 | - 37.4 | 133.6 |
| Vép | GTI | 2018 | 7.2 | 121.2 |
| Vép | GTI | 2019 | 6.1 | 113.0 |

11. ábra Besugárzás hibájának statisztikai jellemzői

Az előző ábrák alapján azt láttuk, hogy az összes hiba hogyan alakul egy év leforgása alatt, arról viszont az ábrák nem nyújtanak információt, hogy egy nap leforgása alatt hogyan változik a megtermelt energia mennyisége.



12. ábra Napi megtermelt energia hiba sűrűségfüggvénye

A 12. ábra azt mutatja, hogy egy éven keresztül napokra lebontva mennyivel termelt többet vagy kevesebbet a napelemes rendszer. Berettyóújfalu esetében megfigyelhető, hogy az idő többségében felül van becsülve a megtermelt energia mennyisége, ezt a 11. ábra is alátámasztja, mivel a besugárzási hiba várhatóértéke kb. -19Wh/m^2 . Mindennek ellenére az éves eredőben pontosabb becslést adó helyek (Vép, Csepreg) esetében, a napok közötti energia eloszlás szórása jelentősebb, mint az egész évre vett hibák szórása, ezt mutatja be a 13. ábra.

| Lokáció | Besugárzás | Év | Várható érték [Wh/m ²] | Szórás [Wh/m ²] |
|----------------|------------|------|------------------------------------|-----------------------------|
| Berettyóújfalu | GHI | 2020 | - 207.8 | 256.7 |
| Berettyóújfalu | GHI | 2021 | - 205.0 | 286.2 |
| Berettyóújfalu | GHI | 2022 | - 202.0 | 316.6 |
| Csepreg | GTI | 2018 | 15.8 | 433.0 |
| Vaskút | GTI | 2020 | - 407.2 | 478.8 |
| Vaskút | GTI | 2021 | - 400.1 | 467.2 |
| Vaskút | GTI | 2022 | - 447.1 | 453.6 |
| Vép | GTI | 2018 | 79.2 | 371.4 |
| Vép | GTI | 2019 | 69.1 | 366.1 |

13. ábra Napi energia hiba jellemzői

Az előzőekben megvizsgált sűrűségfüggvények és szemrevételezés egy jó kiindulási alapot ad arra, hogy az előrejelzések használhatóak az energiatároló paramétereinek meghatározásához. Megtehetném, hogy az energiatároló hatását ugyanígy leíró statisztikával vizsgálom, ez esetben az lenne tapasztalható, hogy a hibák várható értékének abszolútértéke csökken. Ennek ellenére a műszaki és gazdasági területeken a hiba ilyen módon való megfogalmazása nem túl szemléletes, így nehezen is használható fel ténylegesen az energiatároló méretezéséhez. Ezért a becslés minőségének átfogóbb vizsgálatlára a következő mérőszámokat vezettem be:

- Energiakülönbség (TVE) [Wh/m²]

$$TVE = \Sigma(\hat{y}(i) - y(i))$$

- Abszolút energiakülönbség (ATVE) [Wh/m²]

$$ATVE = \Sigma(|\hat{y}(i) - y(i)|)$$

- Pozitív energiakülönbség (TVEP/TVEPositive) [Wh/m²]

$$TVEP = \Sigma(\hat{y}(i) - y(i)), \quad \text{feltéve } (\hat{y}(i) - y(i)) \geq 0$$

- Negatív energiakülönbség (TVEN/TVENegative) [Wh/m²]

$$TVEN = \Sigma(\hat{y}(i) - y(i)), \quad \text{feltéve } (\hat{y}(i) - y(i)) < 0$$

, ahol $\hat{y}(i)$ a Solcast általi becslés, $y(i)$ a mérési eredmény.

Az energiakülönbséggel válik összehasonlíthatóvá, hogy egy adott időintervallumon mennyivel termelt a rendszer többet vagy kevesebbet. Az abszolút különbség ad arra lehetőséget, hogy majd az akkumulátor hatását figyelembe tudjuk venni, hiszen ezt a mennyiséget kell felvennie, majd leadnia a kompenzálások során, amit az egyszerű TVE az integráló hatása miatt elrejt. A pozitív és negatív energia különbségeket szintén az előző integráló hatás kiküszöbölése miatt hoztam létre, illetve a későbbiekben lehetőséget nyújt majd a gazdasági elemzéseknél is, mivel a kiegyenlítő energia ára eltérő a két esetre. A 14. ábra ezt szemlélteti, ahol a szenzorok által mért (Sen-E) és a Solcast által becsült (Sol-E) éves energiamennyiség látható.

| Lokáció | Év | Sen-E [kwh] | Sol-E [kwh] | TVE [%] | ATVE [%] | TVE P [%] | TVE N [%] |
|----------------|------|----------------|----------------|------------|-------------|--------------|--------------|
| Berettyóújfalu | 2020 | 1 249 | 1 325 | - 6.1 | 13.4 | 3.7 | - 9.8 |
| Berettyóújfalu | 2021 | 1 297 | 1 372 | - 5.8 | 12.8 | 3.5 | - 9.3 |
| Berettyóújfalu | 2022 | 1 311 | 1 385 | - 5.6 | 12.8 | 3.6 | - 9.2 |
| Csepreg | 2018 | 1 372 | 1 366 | 0.4 | 19.1 | 9.8 | - 9.3 |
| Vaskút | 2020 | 1 361 | 1 510 | - 11.0 | 25.7 | 7.4 | - 18.3 |
| Vaskút | 2021 | 1 422 | 1 568 | - 10.3 | 24.5 | 7.1 | - 17.4 |
| Vaskút | 2022 | 1 445 | 1 608 | - 11.3 | 25.4 | 7.0 | - 18.3 |
| Vép | 2018 | 1 425 | 1 396 | 2.1 | 20.0 | 11.0 | - 8.9 |
| Vép | 2019 | 1 416 | 1 391 | 1.8 | 18.8 | 10.3 | - 8.5 |

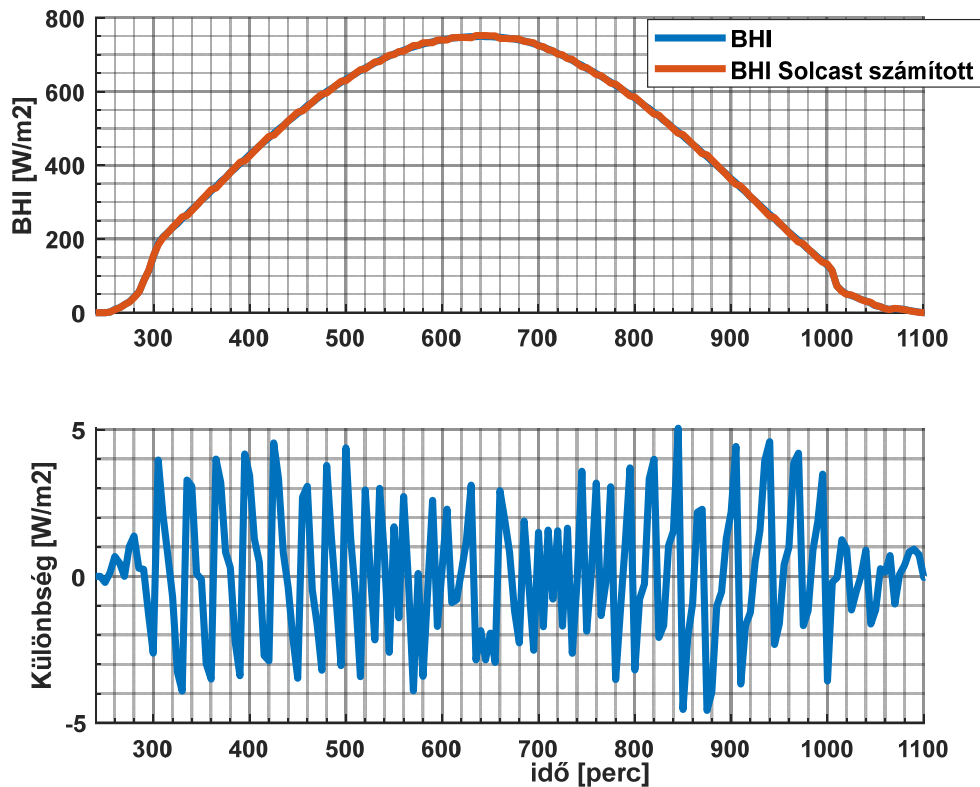
14. ábra Éves jellemzők kompenzálás nélkül

Most, hogy ismerjük a kiinduló állapotokat, megvizsgálhatom milyen javulást sikerül elérnem az energiataról hozzáadásával.

Kvantálási hiba

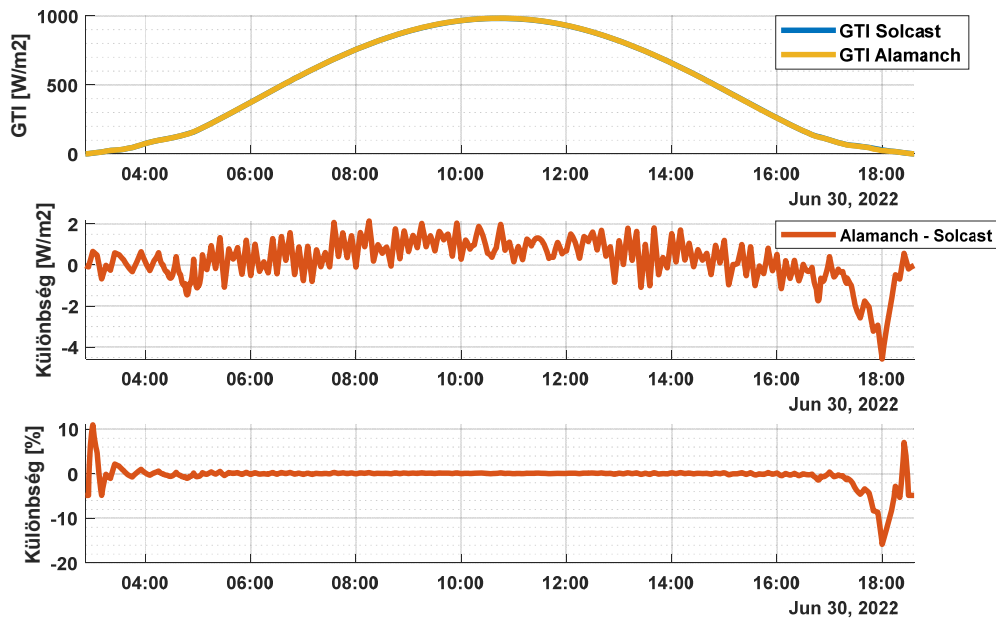
Az adatfeldolgozás elején nem tűnt fel elsőre, hogy az Solcast által szolgáltatott adatok nem csak időben, hanem értékben is kvantáltak. Erre az átlagolás okozta, időbeli elcsúszás vizsgálata során figyeltem fel. A kvantálás nem okoz lényeges hibát a besugárzás értékében, mivel maximális $\pm 0.5W/m^2$ kerekítés a besugárzás értékeihez ($10-1000W/m^2$) képest elhanyagolható. A hőmérséklet változása pedig egy lassú folyamat és kevésbé is jelentős a termelés szempontjából, mint a besugárzás.

A kvantálási hiba vizsgálataim során nem okoz problémát az előbb említettek miatt mindaddig, amíg nem egy napot követő naperőművem van, vagy nem veszem figyelembe az árnyékolás hatását. Ez esetben azért probléma, mert a nap pozíciójára szükségem van a direkt besugárzás felületre való vetítéséhez. A **nap pozícióját** két szögérték adja meg gömbi koordináta rendszerben: a **napmagasság** (Elevation angle), ami a nap horizonttal való bezárt szöge, illetve az **azimuth**, amely a nap horizontra vetett vetületének az északkal bezárt szöge.



15. ábra A direkt komponens vízszintes felületre vett vetülete (BHI)

15. ábra a kvantálásból származó hibát mutatja a vízszintes felület esetében. Ezek után implementáltam a nap pontosabb pozíciójának meghatározásához az *Astronomical Almanac's* algoritmust (Michalsky, 1988), amit ellenőriztem is a következő honlap segítségével: “Home ☀ SunEarthTools.com solar tools for consumers and designers,” n.d.). Majd a Direkt sugárzás vetítése alapján és a Solcast által használt Hay modellt (Hay, 1993) felhasználva megvalósítottam a saját algoritmusom, ami meghatározza a döntött felületre érkező fénytjeljesítményt (16. ábra) árnyékolás mentes esetben.



16. ábra Saját GTI összehasonlítása a Solcast által szolgáltatottal.

Megfigyelhető, hogy az általam létrehozott modell jól közelíti a Solcast által szolgáltatott értékeket, így a későbbiekben majd az árnyékoló hatás figyelembevételénél, fogom tudni használni.

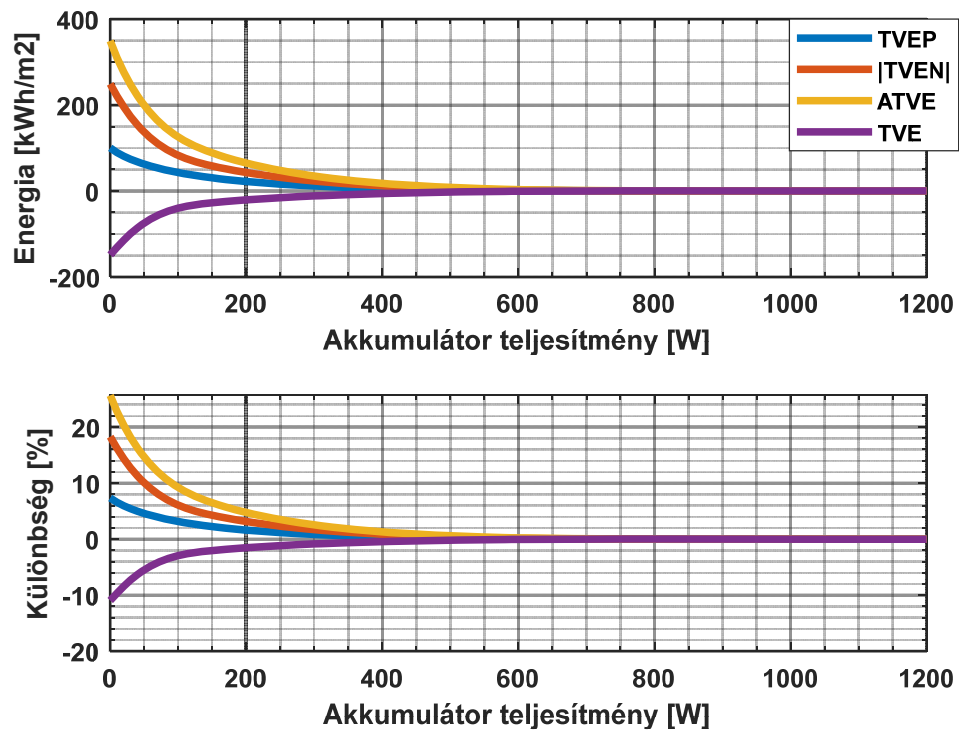
3.3 Energiatároló hatása a termelés előrejelzés hibájára

Esetünkben az energiatároló (akkumulátor) két legfontosabb és egyben vizsgált paramétere a kapacitás [kWh], illetve az energia transzfer sebessége, azaz töltési és kisütési sebessége, villamos teljesítménye [kW] vagy [h]. Az energiatároló energia áramlását a gyakorlatban egy dedikált teljesítmény átalakító egység végzi, ezért a továbbiakban a teljesítmény átalakító teljesítményét használom. A lentebb bemutatott vizsgálatokhoz ugyancsak Matlabban készítettem egy modellező és szimulációs környezetet, ami a szükséges adatokat feldolgozza és a számításokat elvégzi.

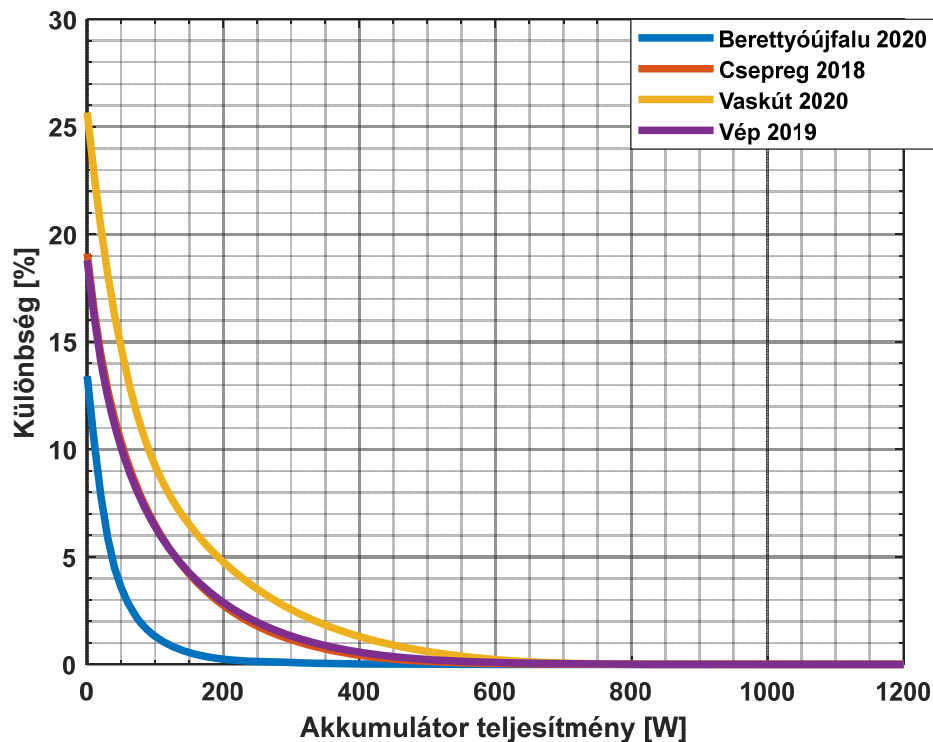
Teljesítmény átalakító hatása

A teljesítményátalakító vizsgálata szempontjából a tároló kapacitása idealizált, ami azt jelenti, hogy bármennyi energiát felvehet és bármennyit leadhat, még akkor is, ha előtte kevesebbet töltöttünk be. A 17. ábra azt mutatja, hogy az előzőek

függvényében, hogy csökken a hiba Vaskút esetében. A többi lokáción is hasonló ábrákat kaptam, annyi különbséggel, hogy ott pontosabbak voltak a becslések, így gyorsabban konvergálnak a hibák a 0 felé (18. ábra).



17. ábra Vaskút végtelen kapacitás változó teljesítmény hatása a becslés 2020 éves hibájára.



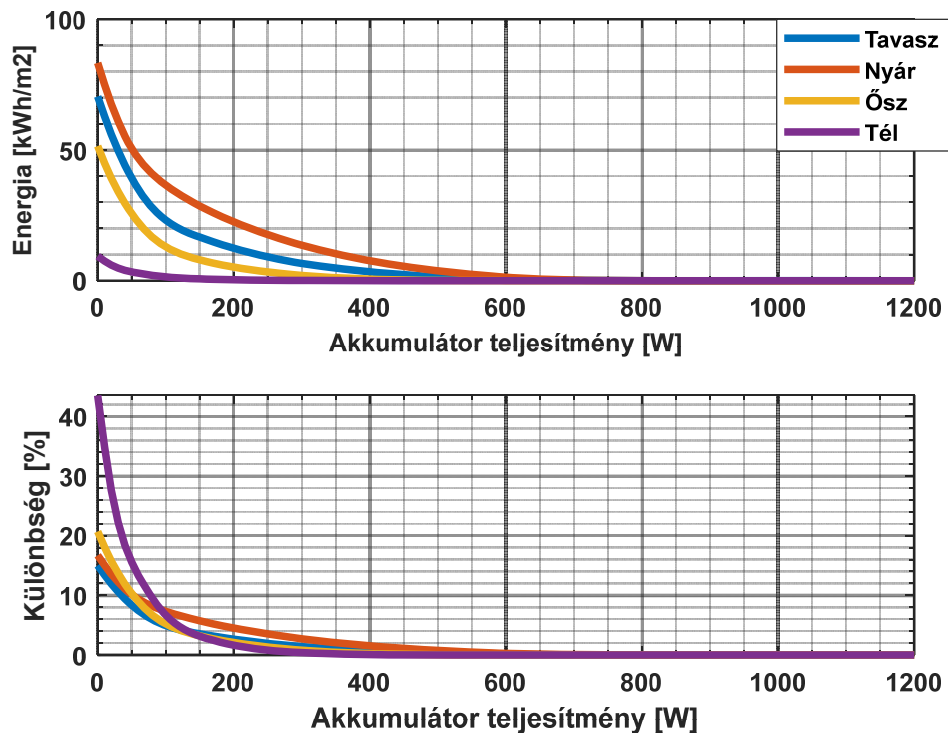
18. ábra Végtelen kapacitású tároló változó teljesítmény hatása az éves ATVE hibára több lokációra vizsgálva

ATVE hiba alakulását foglalja össze a következő ábra, végtelen kapacitás esetén, illetve a teljesítményét az átalakítónak ATVE-X jelöli, ahol X Watt-ban értendő.

| Lokáció | Év | ATVE-0 [%] | ATVE-100 [%] | ATVE-250 [%] | ATVE-500 [%] | ATVE-1000 [%] |
|----------------|------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Berettyóújfalu | 2020 | 13.4 | 1.3 | 0.1 | 0.0 | 0.0 |
| Berettyóújfalu | 2021 | 12.8 | 1.4 | 0.2 | 0.0 | 0.0 |
| Berettyóújfalu | 2022 | 12.8 | 1.4 | 0.1 | 0.0 | 0.0 |
| Csepreg | 2018 | 19.1 | 6.5 | 1.8 | 0.1 | 0.0 |
| Vaskút | 2020 | 25.7 | 9.2 | 3.5 | 0.6 | 0.0 |
| Vaskút | 2021 | 24.5 | 8.6 | 3.2 | 0.6 | 0.0 |
| Vaskút | 2022 | 25.3 | 9.2 | 3.5 | 0.6 | 0.0 |
| Vép | 2018 | 19.8 | 7.3 | 2.3 | 0.3 | 0.0 |
| Vép | 2019 | 18.8 | 6.4 | 1.9 | 0.2 | 0.0 |

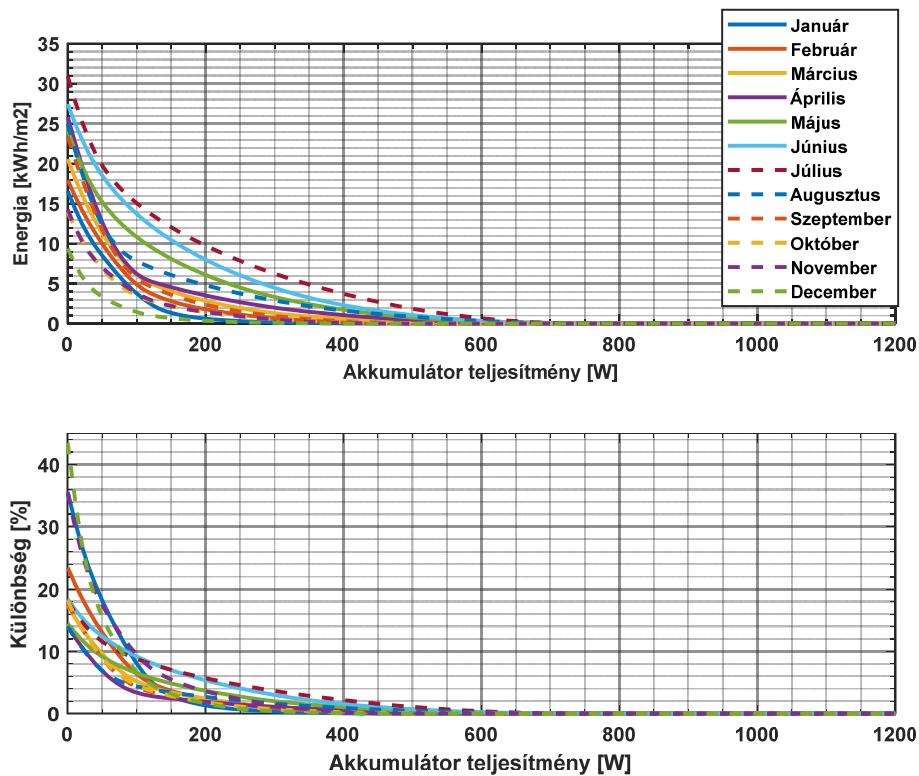
19. ábra Teljesítmény átalakító hatása az éves ATVE hibára

Eddig az éves adatsorokat vizsgáltam, viszont felmerülhet a kérdés, hogy a hibák alakulásának van-e szezonalitása (pl. évszakok, hónapok) ezt mutatja 20. ábra és a 21. ábra.



20. ábra TVE-N hiba szezonális vizsgálatának vizsgálata a teljesítmény átalakító függvényében végtelen [Wh] akkumulátorkapacitás mellett, Vaskút 2020

Az látszik, hogy ha évszakokként vizsgáljuk (20. ábra), akkor „abszolút értékben” vizsgálva van eltérés, ami nem meglepő mivel más mennyiségű energia érkezik egy felületre viszont, ha relatív nézem (az évszakot saját magához viszonyítom), akkor is van egy 15-20%-os eltérés az évszakok között. A téli időszakban legnagyobb a relatív hiba, amit a 21. ábra is alátámaszt, a hiba növekedése feltehetőleg az árnyékolás hatásából adódik, viszont ennek megerősítéséhez a már korábban említett erőmű és környezeti modell lenne szükséges.

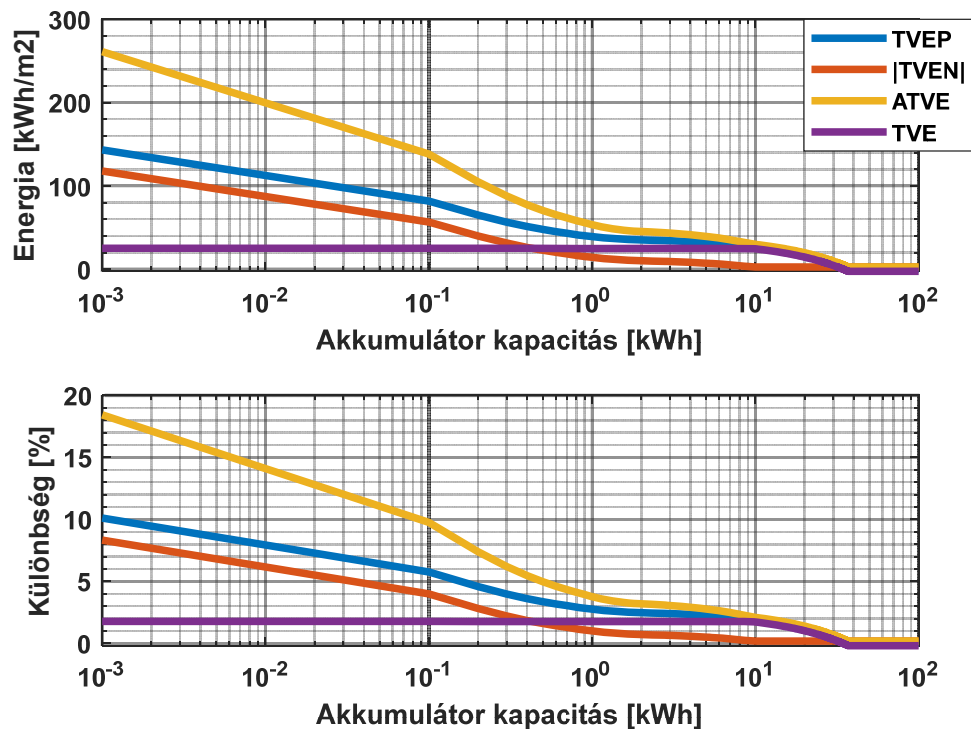


21. ábra TVE-N hiba havi vizsgálata a teljesítmény átalakító függvényében, akkumulátorkapacitás végtelen [Wh], Vaskút 2020

Ha havi felbontásban nézzük (21. ábra), akkor „abszolút” értékben kisebb lesz az eltérés az egyes hónapok között, mint évszakok szerint (20. ábra), viszont a relatív eltérés megnövekedett 35-40%-ra. Mindemellett, ha egy 100W teljesítményű végtelen kapacitású energiatárolót beiktatunk, (ami közelíti a 11. ábra szórás értékeit), akkor a relatív hibák egymáshoz viszonyítása mind szezonálisan, mind havi esetben is kb. 5% környékire redukálódik a vaskúti rendszer esetén.

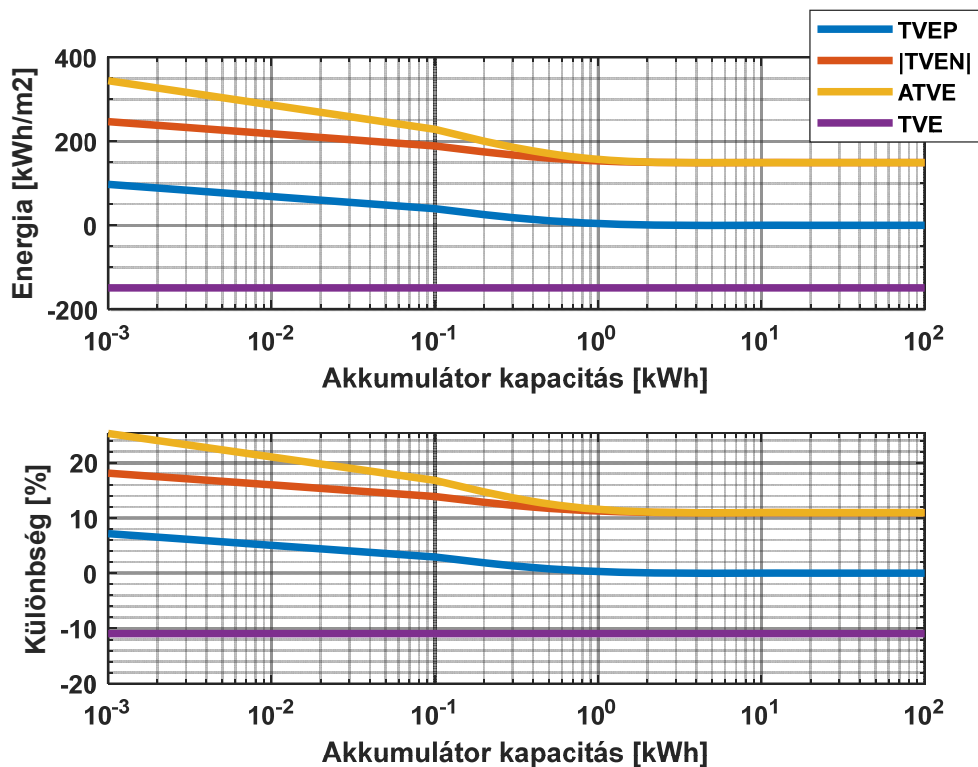
Energiatároló kapacitásának hatása

Az energiatárolók másik legfontosabb paramétere a kapacitása, aminek a vizsgálatához először azt feltételeztem, hogy az átalakító teljesítménye végtelen. Illetve az egész évet egyben kezelem, vagyis a vizsgált intervallum elején egy üres energiatárolót kapcsolok a rendszerre, majd a vizsgált intervallum végén kikapcsolom és a két időpont között más módon nem befolyásolom.



22. ábra Vép 2019 éves eredőben a hibák csökkenése változó kapacitás és végtelen teljesítmény mellett

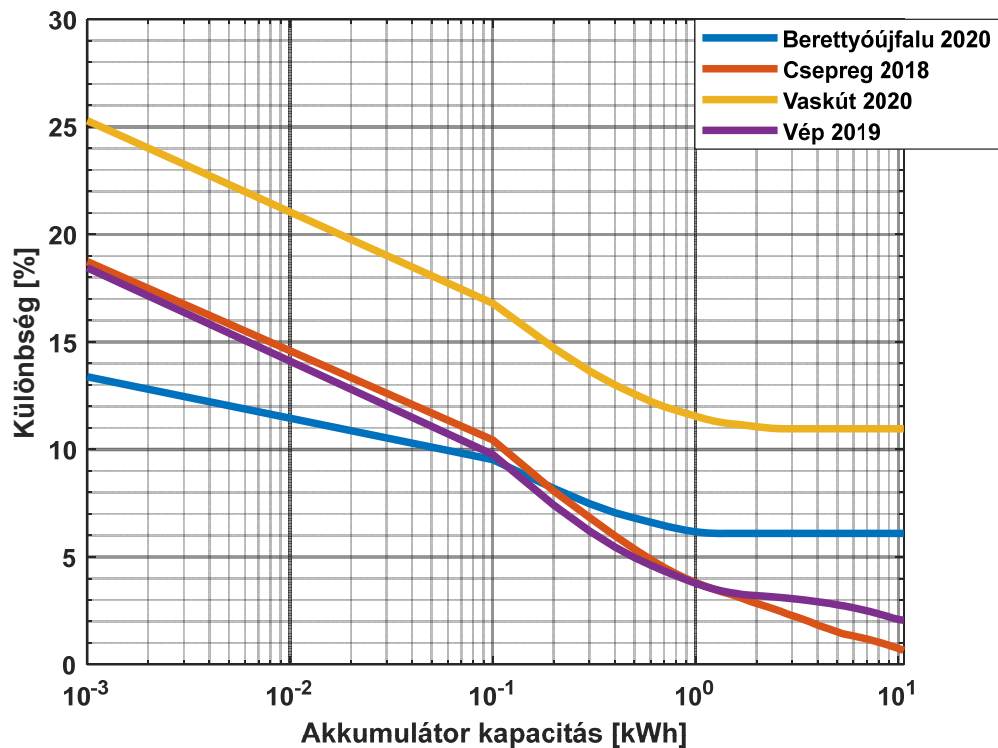
A 22. ábra mutatja a hibák alakulását az energia tároló kapacitása (~0kWh – 100kWh) függvényében logaritmikuskálán a vépi rendszer esetén. Megfigyelhető, hogy 1kWh kapacitásig meredeken csökken majd 1-10kWh között kisebb meredekséggel csökken, majd 40kWh környékén eléri végértékét. A csökkenés meredekségének megváltozásának a fő okai a 12. ábra és 14. ábra alapján érthetőek meg. A napi energiakülönbségek a legrosszabb esetben sem érik el a 2kWh-át, így eddig a kapacitásig gyorsan csökken a hiba. A vépi rendszer esetében megállapítható, hogy éves szinten 1.78%-kal több (kb. ~25kWh) energia ért 1 m² felületet, mint a becslés alapján. Ez egyben azt is jelenti, hogy ezt az energia mennyiséget, egy kellően nagy méretű akkumulátorral elintegrálhatjuk, a második szakaszon ez történik.



23. ábra Vaskút 2020 éves eredőben a hibák csökkenése változó kapacitás és végtelen teljesítmény mellett

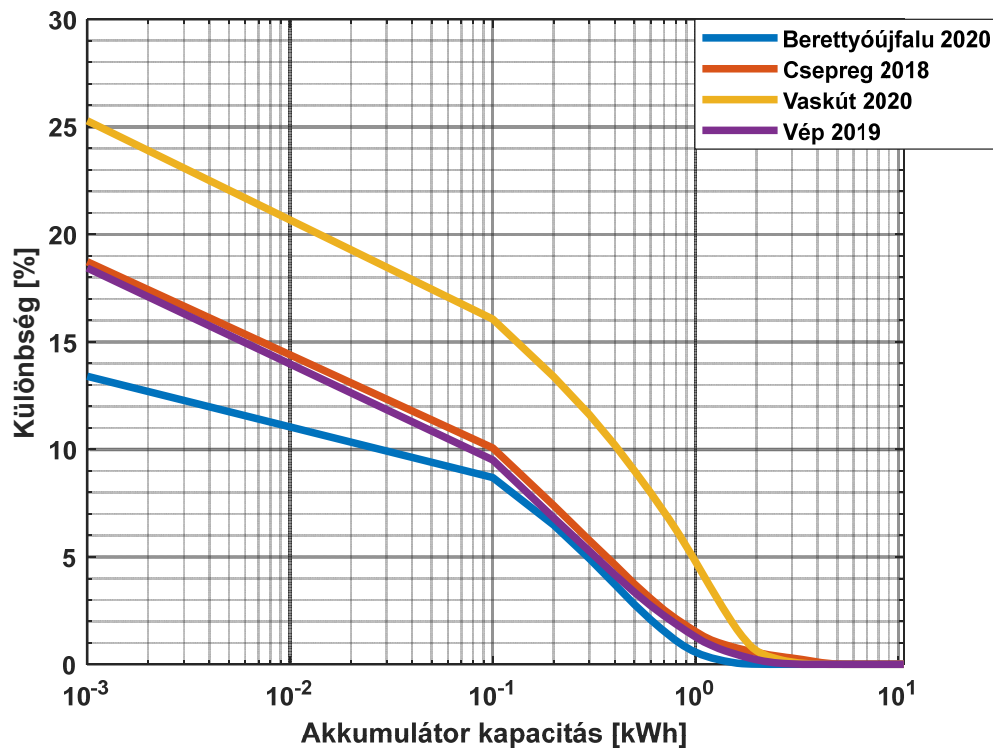
A 23. ábra hasonló tendenciákat mutat a Vaskúti rendszer esetében is, mint a 22. ábra Vép esetében. A hibák csökkenésének tendenciái ugyanúgy megfigyelhetők, viszont itt látszik, hogy a végtelen nagy kapacitás esetén sem érhetjük el a 0 hibát, mivel itt éves szinten kb. 11%-kal túl van becsülve a termelésünk (14. ábra), ezt a különbséget maximum más energia forrásából tudnánk fedezni.

A menetrendezés szempontjából elég az első szakaszt vizsgálok, mivel a napon belüli eltérést szeretném minimalizálni.



24. ábra Több lokációra éves ATVE hibák csökkenése változó kapacitás és végtelen teljesítmény mellett

Fontos megjegyezni, hogy a kapacitás változtatásának vizsgálata során az energia tárolót semmilyen módon nem befolyásoltam (24. ábra). A gyakorlatban ennek nem feltétlenül kell így lennie, megtehetem, hogy minden nap reggelén általam meghatározott kapacitásra legyen feltöltve az akkumulátor (25. ábra). Erre több megoldás is létezik, akár vásárolható energia a hálózatról, akár a menetrendet alakíthatom úgy, hogy csak azután termeljen a hálózatra miután a szükséges energia mennyiséget felhalmozta az akkumulátorban (amennyiben a technikai lehetőségek engedik). Akár minden napra, havi bontásban vagy szezonálisan megállapítható egy optimális töltöttségi szint, ami hatalmas paraméterteret ad. Az egyszerűsége törekedve a 25. ábra 50%-os töltöttség esetén mutatja a hibák alakulását.



25. ábra Több lokációra éves ATVE hibák csökkenése változó kapacitás és végtelen teljesítmény mellett előre meghatározott töltöttségi szinttel

A 24. ábra és a 25. ábra összehasonlítva mutatja be, hogy néhány kWh kapacitású akkumulátorral a ATVE hiba éves szinten 1% alattira csökkenthető, mivel a második esetben éjszaka pótolható az energiahiány a hálózatról. Ez a megoldás részben elméleti, mivel az éjszaka vásárolt áramot is menetrendezni szükséges, ami függ az energiatárolónak a nap végi állapotától, ami még a menetrend elkészítésekor nem áll rendelkezésre.

Teljesítmény és kapacitás

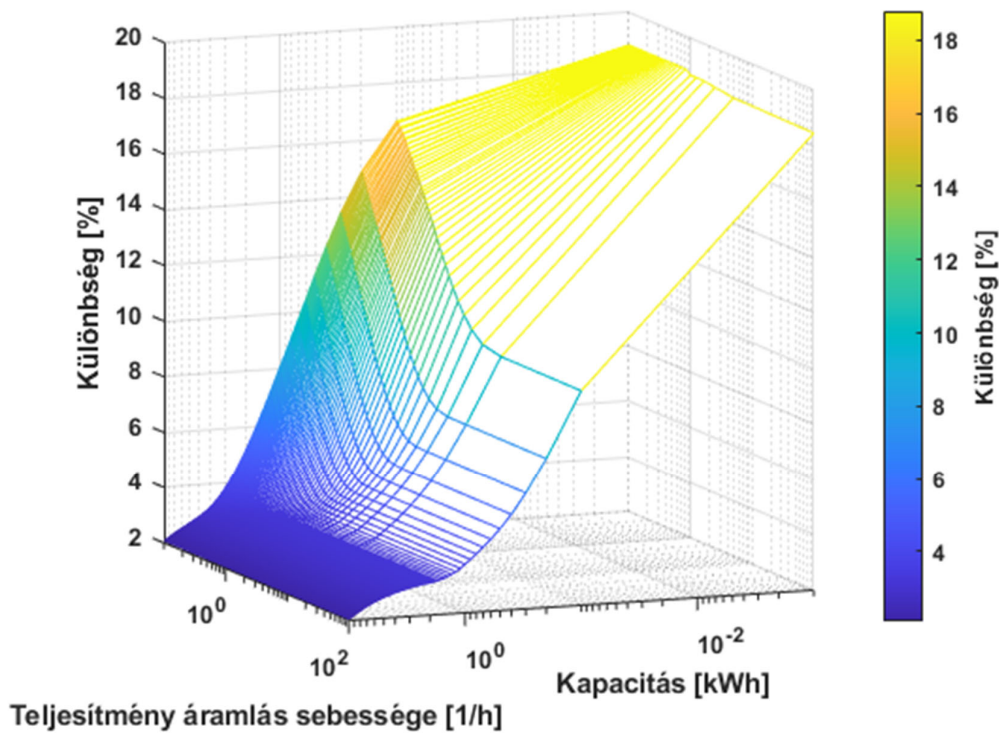
Az előző bekezdésekben látható mind a végtelen energiatároló és véges teljesítményű energiaátalakító esetében, mind a végtelen teljesítményű átalakító és véges kapacitás esetén, hogy az éves energia különbségéből adódó hibát leszámítva bármelyik megoldás képes a menetrendi hibát jelentősen csökkenteni. Ténylegesen egyik modell sem reális, így a két paraméter együttes hatást is vizsgálom.

Az akkumulátorok energiaátalakítóinak általában nem a teljesítményét adják meg, hanem azt, hogy mennyi idő alatt lehet az akkumulátort teljesen feltöltött állapotból lemeríteni, és fordítva. Az energia töltési és merítési teljesítmények akár

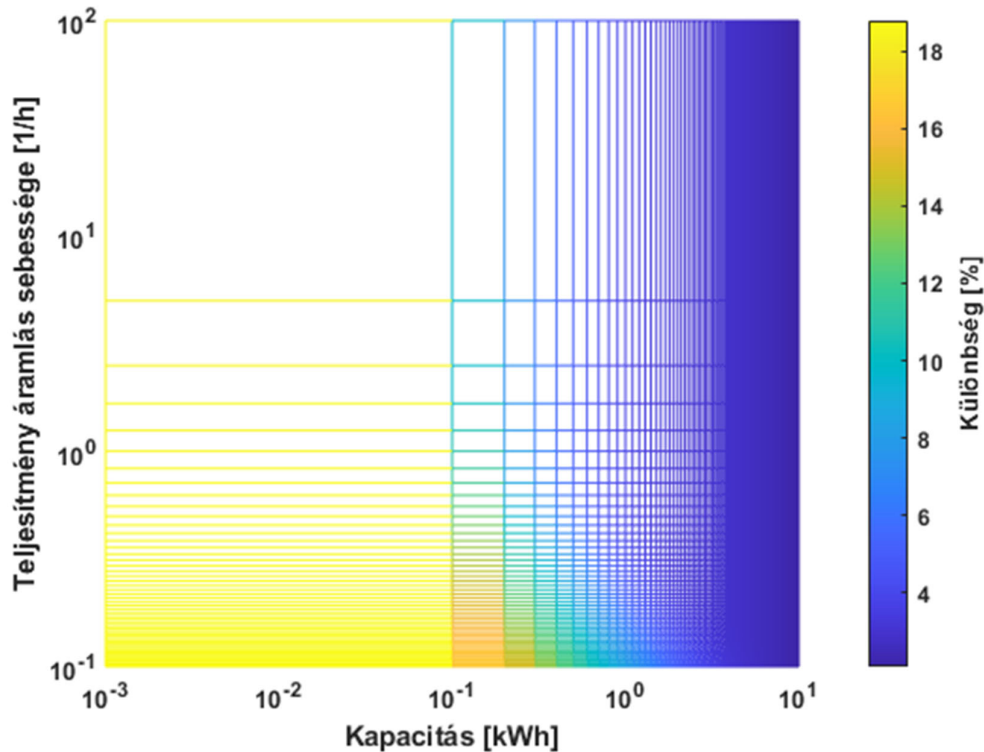
különbözhetnek is. Így a szimulációban a teljesítmény helyett ezt az idő intervallumot, adom meg, hogy az akkumulátorok összehasonlíthatóak legyenek, és az egyszerűség végett a szimuláció során a teljesítmény átalakító szimmetrikus (töltési, kisütési) paraméterekkel rendelkezik.

Az ábrák értelmezhetőségének megkönnyítése érdekében, a töltési idő helyett a teljesítmény áramlás sebességét [1/h] ábrázolom. Így a kisebb értékek tartoznak a hosszabb töltési időhöz, ami viszont a kisebb teljesítményhez. (pl. 1 kWh kapacitású esetben, transzfer sebesség = 0.1/óra → töltési idő = 10 óra → teljesítmény 100W, míg 0.05/óra → 20óra → 50W).

A szimuláció azzal a peremfeltétellel érvényes, hogy a vizsgált időszak elején egy kisütött energiatárolóval indul a rendszer.



26. ábra Vép 2019 éves ATVE alakulása akkumulátor hatására 3D

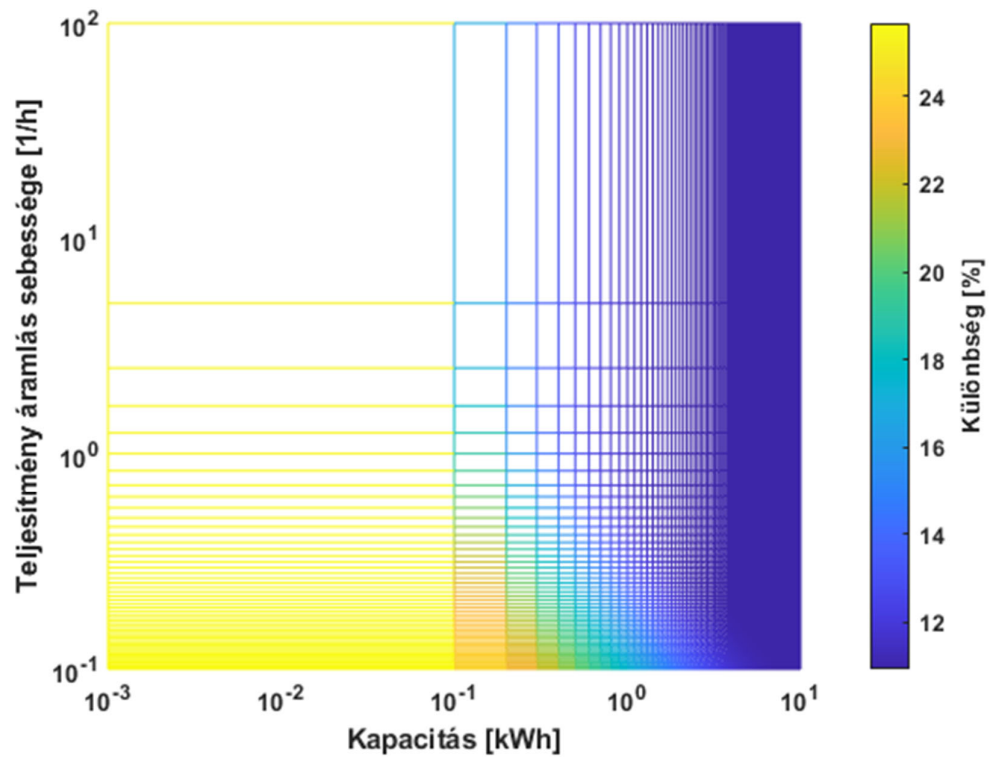


27. ábra Vép 2019 éves ATVE alakulása akkumulátor hatására 2D

Megfigyelhető, hogy adott kapacitású akkumulátor esetén a teljesítmény növelése egy darabig csökkenti a hibát, majd utána nem. Ugyanez a jelenség játszódik le, ha a teljesítmény áramlás sebessége mentén vizsgáljuk az ábrát. Látható, hogy nagyobb kapacitás esetén, nagyobb gradienssel csökken a hiba, ami annak a következménye, hogy egy nagy kapacitású akkumulátor kis teljesítmény áramlási sebességgel is relatív nagy teljesítmény kompenzálásra alkalmas (pl. 10 kWh kapacitású esetben, 0.1/óra → 10 óra → 1kW), ami összehasonlítva a (10. ábra) besugárzás hiba sűrűségfüggvényével a 800W/m²-nél nagyobb különbség kis valószínűséggel fordul elő, sőt 1100W/m²-nél nagyobb különbség nem is volt.

Továbbá látható, hogy az éves energiakülönbséget sem éri el az ATVE, ennek oka, hogy ha az akkumulátorból nem lehet több energiát betáplálni vagy kivenni, akkor nem lehetséges kompenzálni sem, ezt összekapcsolva a peremfeltétellel, hogy lemerült tárolóval vizsgáljuk az évet, azt eredményezi, hogy a vizsgált időszak első szakaszában energiát kéne kivenni a tárolóból, viszont a tárolóban nincs még felhalmozott energia.

Ugyanezek a jelenségek figyelhetők meg Vaskút esetében is 28. ábra.



28. ábra Vaskút 2020 éves ATVE alakulása akkumulátor hatására 2D

4 Diszkusszió

Dolgozatomban bemutatásra került a napelemes rendszerek általános felépítése és működése és az ezeket érintő kihívások. Mint legjelentősebb, a termelést befolyásoló besugárzás előrejelzésének nehézségeivel és alkalmazott módszereivel foglalkoztam. Majd az előzőekben leírtakat felhasználva megvizsgáltam a becslés és mérések alapján a menetrendi hibát, majd bemutattam a menetrendi hibát csökkentő lehetőségeket, valamint ezek közül az akkumulátoros energiatárolásnak a menetrendi hibára gyakorolt hatását vizsgáltam meg részletesen. Összeségében elmondható, hogy a szolgáltatott előrejelzési adatok használhatóak a menetrend kialakítására, jellegre a mérési adatok követik a predikciókat, viszont a helyi időjárás sajátosságait kevésbé tudja figyelembe venni, ezért menetrendi kompenzációra szükség van. Végeredményben elmondható, hogy fajlagos értelemben egy néhány kWh kapacitású akkumulátor a menetrendi hibát jelentősen csökkenti.

Továbbiakban tervezem más szolgáltatóktól is környezeti előrejelzéseket gyűjteni, amiket össze tudok hasonlítani a már meglévő adatokkal. Dolgozatom során eddig múltbéli adatok vizsgálatára volt lehetőségem, ezt szeretném tényleges jövőbeli időjárás előrejelzési adatokkal is megvizsgálni. A legjelentősebb fejlesztési lehetőség egy komplex naperőmű modell előállítás: ami figyelembe veszi az árnyéklás, inverter, degradáció és az egyéb fellépő veszteségek hatásait. Ezzel az erőmű modellel az eddigi szimulációim átskálázhatóak lesznek a teljes naperőműre. A menetrendi szabályok figyelembevételével és az akkumulátor modell pontosításával, lehetőség nyílik a gazdasági vizsgálatokra is. Végül pedig egy menetrendező algoritmus megalkotása cél, ami az előrejelzések alapján a naperőmű és akkumulátor sajátosságait figyelembe véve, állítja elő a menetrendet.

Irodalomjegyzék

- ADL-SR [WWW Document], n.d. URL <https://www.meier-nt.de/en/photovoltaics/products/adl-sr-en> (accessed 10.25.23).
- Ashan Induranga, D.K., Viduruwan Geekiayange, 2021. Reliability Comparison of Weather Data of PVGIS, NREL and Solcast for PV Solar Energy Generation Forecasting. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14453.50400>
- Bright, J.M., 2019. Solcast: Validation of a satellite-derived solar irradiance dataset. *Solar Energy* 189, 435–449. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.086>
- Gairaa, K., Khellaf, A., Chellali, F., Benkacali, S., Bakelli, Y., Bezari, S., 2015. Maximisation and Optimisation of the Total Solar Radiation Reaching the Solar Collector Surfaces, in: Dincer, I., Colpan, C.O., Kizilkan, O., Ezan, M.A. (Eds.), *Progress in Clean Energy, Volume 2: Novel Systems and Applications*. Springer International Publishing, Cham, pp. 873–886. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17031-2_57
- Hay, J.E., 1993. Calculating solar radiation for inclined surfaces: Practical approaches. *Renewable Energy, Solar radiation, environment and climate change* 3, 373–380. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(93\)90104-O](https://doi.org/10.1016/0960-1481(93)90104-O)
- Home ☀ SunEarthTools.com solar tools for consumers and designers [WWW Document], n.d. URL <https://www.sunearthtools.com/> (accessed 11.1.23).
- Ineichen, P., 2006. Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks. *Solar Energy, Urban Ventilation* 80, 468–478. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.04.018>
- Mattei, M., Notton, G., Cristofari, C., Muselli, M., Poggi, P., 2006. Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance. *Renewable Energy* 31, 553–567. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.010>
- Michalsky, J.J., 1988. The Astronomical Almanac’s algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar Energy* 40, 227–235. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(88\)90045-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90045-X)
- Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) [WWW Document], 2023. URL https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en (accessed 10.25.23).

- Sandia Module Temperature Model [WWW Document], 2023. . PV Performance Modeling Collaborative (PVPMC). URL <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/module-temperature/sandia-module-temperature-model/> (accessed 6.8.23).
- Solcast | Solar Api and Solar Weather Forecasting Tool [WWW Document], n.d. URL <https://solcast.com/> (accessed 10.25.23).
- SR20 pyranometer | Hukseflux | secondary standard pyranometer [WWW Document], n.d. URL <https://www.hukseflux.com/products/pyranometers-solar-radiation-sensors/pyranometers/sr20-pyranometer> (accessed 10.16.23).
- Stein, J., Hansen, C., Reno, M., 2012. Global horizontal irradiance clear sky models : implementation and analysis. (No. SAND2012-2389, 1039404). <https://doi.org/10.2172/1039404>
- What is a pyrhelimeter? | Hukseflux [WWW Document], n.d. URL <https://www.hukseflux.com/applications/solar-energy-pv-system-performance-monitoring/what-is-a-pyrhelimeter> (accessed 10.16.23).
- Ye, H., Yang, B., Han, Y., Chen, N., 2022. State-Of-The-Art Solar Energy Forecasting Approaches: Critical Potentials and Challenges. *Frontiers in Energy Research* 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.875790>