

SZAKDOLGOZAT

Tóth Máté

2024



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Szent István Campus

Műszaki Intézet

**Energiagazdálkodási szakmérnök
szakirányú továbbképzési szak**

**AKKUMULÁTOROS ENERGIATÁROLÓK ALKALMAZÁSÁNAK
LEHETŐSÉGEI A C&I SEKTORBAN**

Belső konzulens: Dr. Schrempf Norbert Attila
egyetemi docens

**Belső konzulens
intézete/tanszéke:** **Műszaki Intézet/FOMI**

Külső konzulens: Urbán Kristóf
Energetikai auditor

Készítette: **Tóth Máté**

Gödöllő

2024

MŰSZAKI INTÉZET ÉPÜLETGÉPÉSZETI ÉS ENERGETIKAI TANSZÉK
Energiagazdálkodási szakmérnök

SZAKDOLGOZAT

feladatlap

Tóth Máté (TM40Z1)

részére

A szakdolgozat címe:

Akkumulátoros energiatárolók alkalmazásának lehetőségei a C&I szektorban

Feladatkiírás:

A dolgozat fő témája az energiatárolóval kiegészített napelemes rendszer telepítésének és felhasználásának lehetőségei ipari környezetben. A rendszer optimális működtetésének meghatározása egy felépített szimulációs környezetben, egy esettanulmányon keresztül kerül bemutatásra. A vezérlés célja szerint bemutatásra és részletes vizsgálatra kerül az önfogyasztás optimalizálás vissz-wattos rendszer esetében, peak-shaving, változó energiaár esetén ár arbitrázs, valamint aFRR szolgáltatás nyújtása a kiegyenlítő energia piacon.

Közreműködő tanszék: Épületgépészeti és Energetikai Tanszék

Külső konzulens: *Urban Kristóf*, Planergy Solutions Kft., kristof.urban@planergy.hu

Belső konzulens: *Dr. Schrempf Norbert Attila*, MATE, Műszaki Intézet

Beadási határidő: 2024.04. hó 22. nap

Gödöllő, 2024. 03. hó 07. nap

 (tanszékvezető)	Jóváhagyom  (szakfelelős)	Átvettem  (hallgató)
--	---	--

A dolgozat készítőjének külső konzulense nyilatkozom arról, hogy a hallgató az előre egyeztetett konzultációkon megjelent.

Gödöllő, 2024. 04. hó 15. nap



(külső konzulens)

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK.....	1
1. BEVEZETÉS	3
2. ENERGIAPIACI ÁTTEKINTÉS	6
3. A KIEGYENLÍTŐ SZABÁLYOZÁSI TARTALÉK ÉS ENERGIAPIAC MŰKÖDÉSE.....	11
4. NAPELEMES RENDSZEREK	14
5. ENERGIATÁROLÁS	19
5.1 ENERGIATÁROLÁSI LEHETŐSÉGEK.....	19
5.1.1 Akkumulátorok.....	19
5.1.2 Szivattyús tározók.....	19
5.1.3 Hidrogén alapú energiatárolás.....	20
5.1.4 Kémiai tárolás.....	20
5.2 LÍTIUM-ION ALAPÚ AKKUMULÁTOROK	21
6. AKKUMULÁTOROS ENERGIATÁROLÓK ALKALMAZÁSA IPARI KÖRNYEZETBEN	23
6.1 ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEK.....	24
6.2 VISSZ-WATT VÉDELEMMEL TELEPÍTETT RENDSZEREK	26
6.2.1 Önfogyasztás optimalizálás.....	26
6.2.2 Peak-shaving (csúcsfogyasztás-levágás)	27
6.2.3 aFRR szolgáltatás nyújtás.....	30
6.3 HÁLÓZATI VISSZATÁPLÁLÁSSAL TELEPÍTETT RENDSZEREK	31
7. SZIMULÁCIÓS MÓDSZERTAN	32
7.1 MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGI SZIMULÁCIÓ	33
7.2 NAPELEMES RENDSZER MODELLJE.....	33
7.3 ENERGIAMENEDZSMENT ÉS AKKUMULÁTOR MODELL	35
7.4 MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGI KIMENETEK	39
8. ESETTANULMÁNY	41
8.1 IPARI PÉLDA	41
8.2 FOGYASZTÁSI ADATOK KIÉRTÉKELÉSE	43

8.2.1 Havi fogyasztási adatok elemzése	43
8.2.2 Heti fogyasztási adatok elemzése	44
8.2.3 napon belüli adatok elemzése	45
8.3 ÖNFOGYASZTÁS OPTIMALIZÁLÁS NAPELEMES ÉS AKKUMULÁTOROS RENDSZERREL.....	46
8.4 ÖNFOGYASZTÁS OPTIMALIZÁLÁS ÉS PEAK-SHAVING NAPELEMES ÉS AKKUMULÁTOROS RENDSZERREL	49
8.5 AFRR SZOLGÁLTATÁS NYÚJTÁSBAN LÉVŐ POTENCIÁL	51
8.5.1 Szabályozható fogyasztó	52
8.5.2 Vissz-wattos napelemes és akkumulátoros rendszer	54
9. ÖSSZEGZÉS.....	55
10. SUMMARY	56
11. IRODALOM ÉS FORRÁSJEGYZÉK	57
12. ÁBRAJEGYZÉK	59
13. TÁBLÁZATEGYZÉK	60
14. MELLÉKLET.....	61
14.1 ÖNFOGYASZTÁS OPTIMALIZÁLÁSHOZ TARTOZÓ TOVÁBBI SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK.....	61

1. BEVEZETÉS

Az COVID-19 járvány és az orosz-ukrán háború összefonódása globális energiaellátási válságot eredményezett. A járvány miatt csökkent az energiakereslet, miközben az orosz-ukrán konfliktus kihatott az energiahordozók szállítására és termelésére. Az oroszok-ukrán háborúból eredő szankciók korlátozták az orosz energiaexportot, ezáltal növelve az energiapiaci bizonytalanságot. A kettős kihívás eredményeként több országban növekedtek az energiaárak és csökkent az ellátásbiztonság, miközben a gazdaságoknak meg kell küzdeniük a járvány okozta gazdasági nehézségekkel is. Ennek eredményeként szükségessé vált a fenntartható és diverzifikált energiaforrások felé történő elmozdulás a globális stabilitás és fenntarthatóság érdekében.

Az energiaválság az ipari szektorra is jelentős hatással van. Az energiaköltségek emelkedése és az energiaellátás bizonytalansága miatt az ipari vállalkozásoknak számos kihívással kell szembenéznük:

1. Magasabb üzemeltetési költségek: Az energiaárak emelkedése miatt az ipari vállalatoknak többet kell fizetniük az energiáért, ami növeli a termelési költségeket és csökkenti a profitabilitást.
2. Termelési leállások és kiesések: Az energiaellátás bizonytalansága esetén az ipari egységek kénytelenek lehetnek csökkenteni a termelést vagy akár leállítani azt, ami befolyásolhatja a piaci versenyképességüket és hosszú távú üzleti egészségüket.
3. Ellátási láncproblémák: Az energiahiány és a magasabb energiaárak kihatnak az ipari termékek gyártásához szükséges alapanyagok és komponensek árára is, ami szintén problémákat okozhat az ellátási láncban.
4. Versenyképesség csökkenése: Azok a vállalkozások, amelyek nem tudják hatékonyan kezelni az energiaválság okozta kihívásokat, versenyképességüket veszélyeztethetik a piacon.
5. Innováció és fenntarthatóság: Az energiaválságok rávilágítanak az ipari szektor számára az innováció és az energiahatékonyság iránti növekvő igényre. Azok a vállalkozások, amelyek gyorsan alkalmazkodnak a fenntarthatóbb gyártási és

energiafelhasználási módszerekhez, valószínűleg jobban fogják kezelni az ilyen válságokat és versenyelőnyhöz juthatnak.

Az ipari szektor számára tehát elengedhetetlen a rugalmasság, az innováció és a fenntarthatóbb üzleti gyakorlatok bevezetése az energiaválságokkal való hatékonyabb megbirkózás érdekében.

Az ipari felhasználók az energiaválság problémáira való válaszként egyre inkább hajlanak a megújuló energiatechnológiák, különösen a napelemes és akkumulátoros rendszerek felé. Ezeknek a megoldásoknak több előnye is van:

1. **Függetlenség a hagyományos hálózattól:** A napelemes rendszerek segítségével az ipari egységek részben vagy teljesen függetlenek lehetnek a hagyományos elektromos hálózattól, csökkentve ezzel az energiaellátásbizonytalanságot.
2. **Energiaköltség-csökkentés:** A napelemes rendszerek hosszú távon csökkenthetik az energiafelhasználás költségeit, mivel a napenergia ingyenes és környezetbarát forrás. Az akkumulátorok segítségével a napközben megtermelt energiát akár a naplemente után is felhasználhatják.
3. **Üzleti fenntarthatóság:** Az ipari vállalatok napelemes és akkumulátoros rendszerek bevezetésével hozzájárulhatnak a fenntarthatóságukhoz és a környezetvédelmi céljaikhoz. Ez pozitív imázst teremthet az ügyfelek és a befektetők szemében.
4. **Ellátásbiztonság növelése:** A napelemes rendszerek segítségével az ipari egységek kiegészíthetik hagyományos energiaellátásukat, ezáltal növelve az ellátásbiztonságukat, különösen váratlan hálózati problémák vagy energiaválságok idején.
5. **Innováció és versenyelőny:** Az ilyen megújuló energiatechnológiák alkalmazása lehetővé teszi az ipari szektor számára, hogy innovatívabb és versenyképesebb legyen a piacon, különféle költséghatékonyabb és fenntarthatóbb üzleti megoldásokkal.
6. **Fontos azonban megjegyezni, hogy a napelemes és akkumulátoros rendszerek telepítése számos technikai, pénzügyi és jogi kihívással járhat.** Az ipari felhasználóknak gondoskodniuk kell a megfelelő tervezésről, telepítésről és karbantartásról, valamint figyelembe kell venniük az adott területre vonatkozó szabályozási kereteket.

Jelen dolgozatomban a napelemes és akkumulátoros rendszerekkel kapcsolatos méretezési kérdéseket, nehézségeket fogom körbejárni. A cél, hogy egy egyedi, adott ipari telephely körülményeit, fogyasztási szokásait figyelembe vevő optimális rendszerméret és optimális működtetési mód kerüljön meghatározásra (önfogyasztás optimalizálás, csúcsfogyasztás-levágás, valamint a FRR kiegyenlítőpiaci részvételben lévő lehetőségek). Mivel minden projekt egyedi az eltérő fogyasztási szokások, műszaki és pénzügyi lehetőségek miatt ezért ökölszámokkal nem lehet méretezni, az nem ad teljes képet a lehetőségekről, rosszabb esetben akár meg nem térülő beruházás is lehet. Az egyedi igényeket figyelembe véve a cél egy szimulációs keretrendszer kifejlesztése, mely gyorsan és nagy pontossággal képes a különböző méretű rendszerek és működési módok szimulációjára. Ehhez szükséges a napelemes rendszerek, energiatárolók működésének és szimulációs modellépítésének az ismerete, a magyar villamosenergia rendszer alapvető működésének, a rendszerszintű kiegyenlítésnek, ipari fogyasztók számára villamosenergia szolgáltatás nyújtásnak áttekintése, majd ezeket összefoglalva a napelemes és akkumulátoros rendszer lehetséges használati módjainak a kiválasztása. A modellek megalkotása és a működési körülmények implementálása után elvégezhetőek az optimális rendszerméret kiválasztására vonatkozó szimulációk, részletes műszaki és pénzügyi kalkulációk végezhetőek.

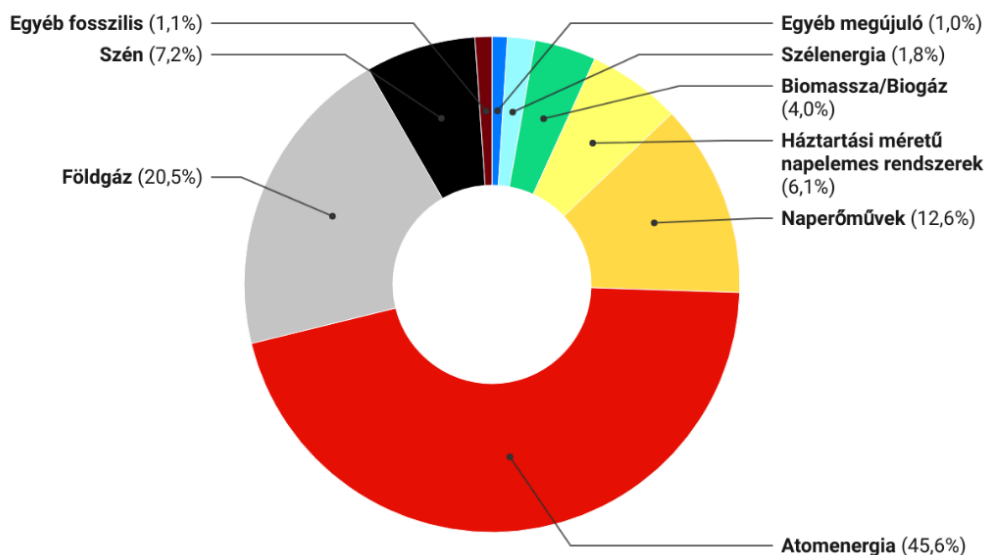
2. ENERGIAPIACI ÁTTEKINTÉS

Az energiagazdálkodás és energiamedzsment területein belül az energiátárolás szerepe egyre inkább felértékelődik. Egyre nagyobb igény mutatkozik az energia rövid és hosszútávú tárolására. Ez a trend szorosan összefügg a megújuló energiaforrások, mint a nap- és szélenergia térhódításával, amelyek a zöld átállás keretében egyre nagyobb szeletet hasítanak ki az energiatermelésből. Magyarországon is megfigyelhető a napenergia robbanásszerű növekedése; 2023-ban az összes beépített napelemes kapacitás már majdnem elérte a hat gigawattot (mely telepített napelemes teljesítmény korábban Magyarország 2030-as célja volt), ami új kihívások elé állítja a hazai energiagazdálkodást. 2023. decemberi adatok alapján az ipari naperőművek 3332 MW-ot, a háztartási méretű kiserőművek 2317 MW-ot tettek ki. A naperőművek és a háztartási méretű kiserőművek összes termelése éves szinten a teljes magyarországi villamosenergia-termelés 18,7%-át tette ki 2023-ban. (http8)

1. ábra. Magyarország villamosenergia-termelése 2023-ban

(forrás: <https://villanyautosok.hu/2024/02/17/igy-termelt-aramot-magyarorszag-2023-ban/>)

Magyarország villamosenergia-termelése 2023-ban

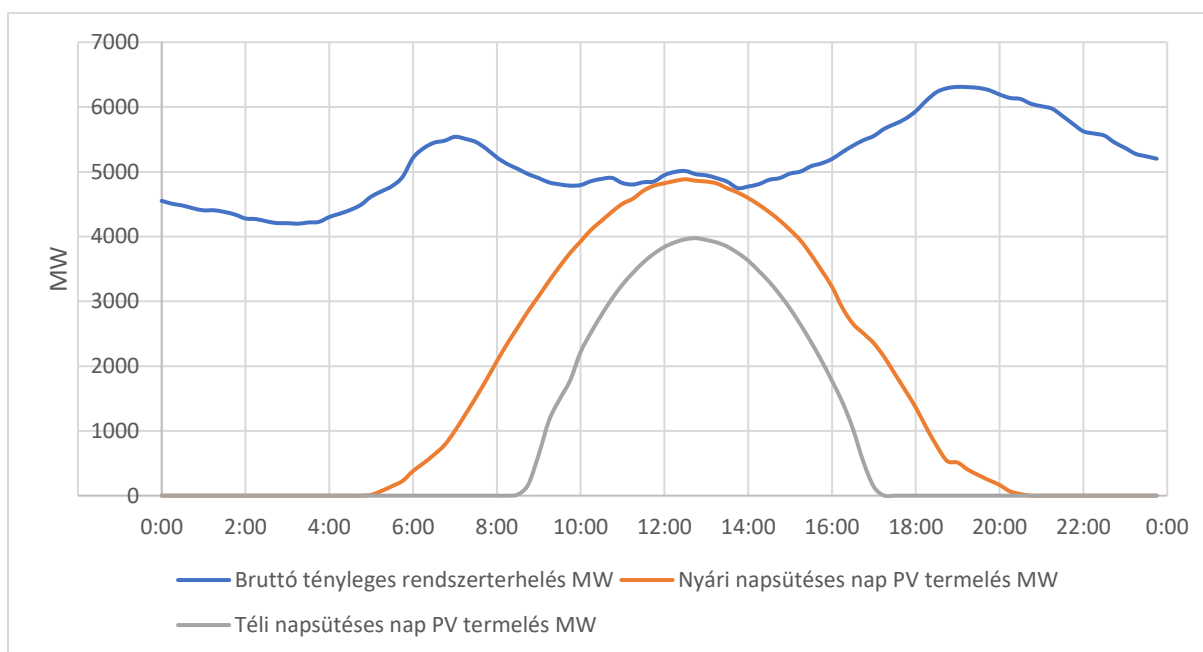


Grafikon: Villanyautosok.hu • Forrás: MEKH • A készítéshez használt program: Datawrapper

Az időjárásfüggő energiatermelés, mint amilyen a napenergia is, jelentősen befolyásolja az energiaellátást, hiszen a napsütéses órák változékonysága és a nappali fogyasztási csúcsidezőszakok közötti eltérések kezelése komoly feladatot jelent. Emellett a szezonális ingadozások – különösen a téli hónapok alacsonyabb napenergia-termelése – további

kihívásokat jelentenek az energiarendszer számára. Hazai viszonyok között nagyjából fennáll, hogy egy azonos naperőműpark a nyári hetekben kb. hétszer annyi villamos energiát képes megtermelni, mint télen. (Fazekas O. (2022)) A megújuló energiaforrásokra való támaszkodás az energiaellátás átalakításában egy fontos megoldás, azonban az előbbi példából is látszik, hogy egyfajta forrásra támaszkodni nem lehet. Megújuló energiák esetén (a vízerőművek kivételével, mely képes sokkal kiszámíthatóbban és folyamatosan energiát előállítani) több fajta energiaforrás felhasználásával portfólióban kell gondolkodni, így az egyes termelő egységek termelési bizonytalansága portfólió szinten kiegyenlíthető.

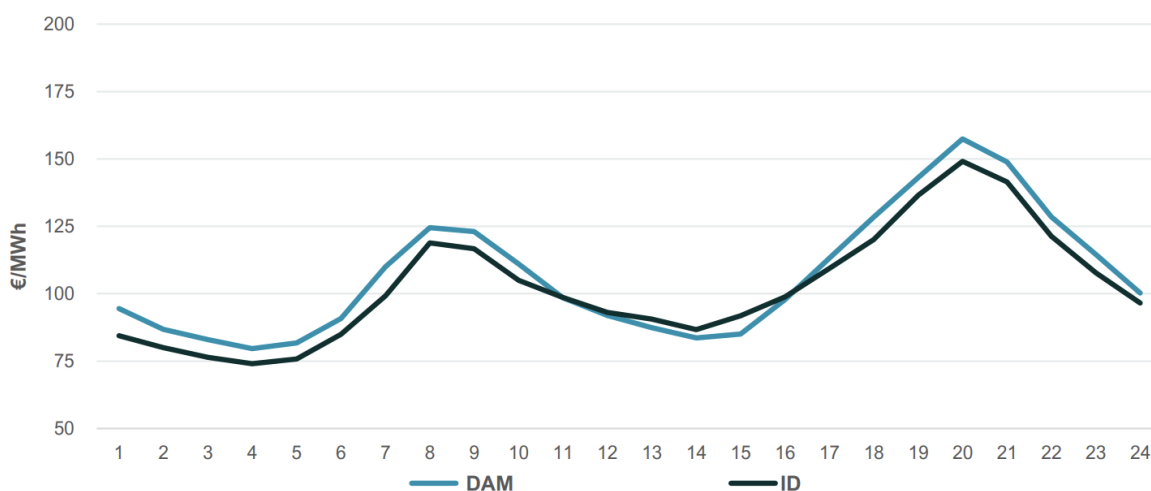
2. ábra. Napi országos rendszerterhelés és 5649 MW napelemes termelés jellege (GMT+2)
(forrás: saját szerkesztés, <https://mavir.hu/web/mavir/rendszerterheles> alapján)



A 2. ábrán is látható, hogy tiszta időben a déli órákban termelik a legtöbb energiát, ezzel szemben a napi villamosenergia-fogyasztási csúcsok a reggeli és az esti órákban jelentkeznek. Ez magával hozta azt a jelenséget is, mely 2023-ban már rekordszámban fordult elő, hogy a déli órákban a HUPX másnapi piacon negatív áramár alakult ki (74 órában volt negatív az áramár, szemben a 2022-es 2 és a 2021-es 8 órával), a minimum -500 EUR/MWh volt. [http1] Általánosságban is elmondható, hogy a HUPX árak alakulása az országos villamosenergia fogyasztással korrelál, ezáltal a déli órákban jellemzően alacsonyabb az áramár, így a szabadpiacra termelő naperőművek, vagy a HUPX órás árakhoz indexált energiaszerződéssel rendelkező ipari vissz-wattos rendszerek megtérülése energiatároló alkalmazása nélkül jelentősen meghosszabbodhat.

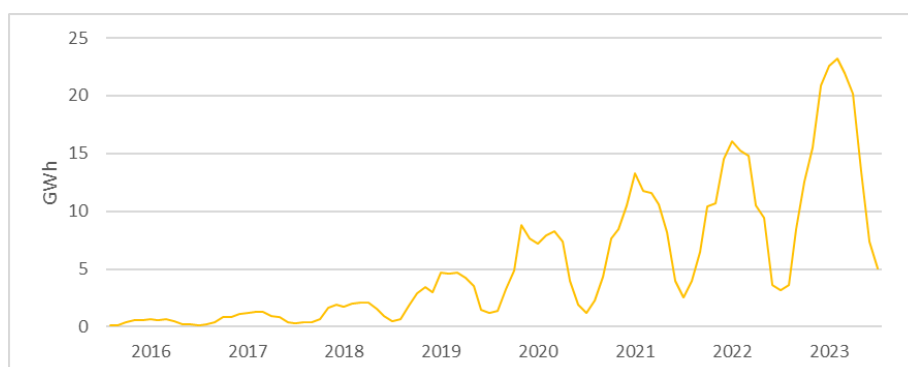
3. ábra. HUPX másnapi és aznapi piacok éves átlagos napon belüli árainak alakulása
(forrás: https://hupx.hu/uploads/Piaci%20adatok/DAM/%C3%A9ves/HUPX_Spot_2023.pdf)

Hourly Average Prices

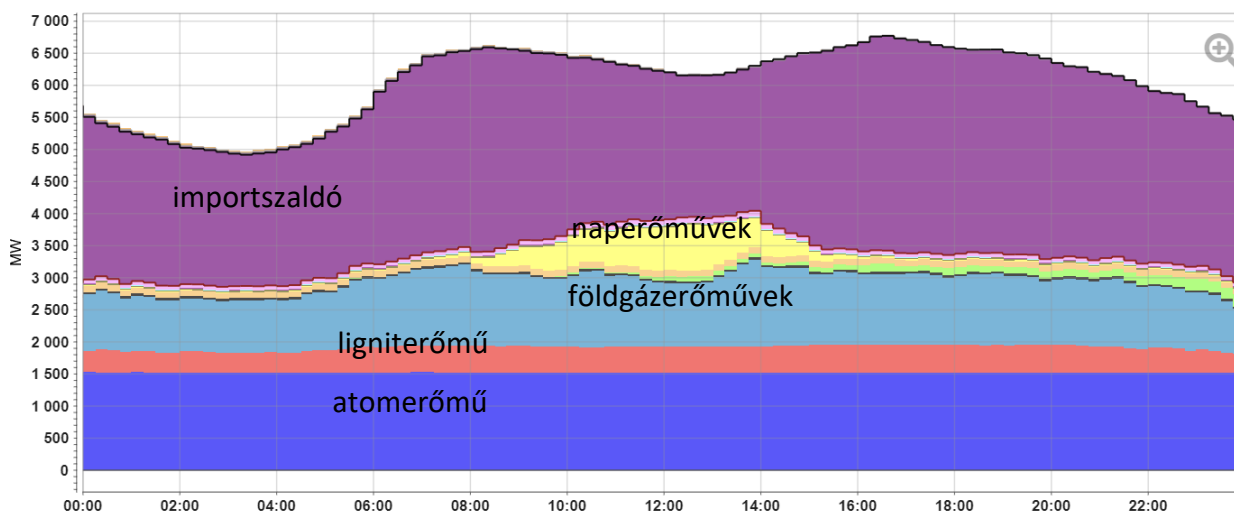


Azonban a naperőművek és napelemes rendszerek országos szintű egyre nagyobb mértékű terjedésének hatása az egyes projektek megtérülésén túl országos rendszerszinten is jelentkezik. A napelemes rendszerek alap működésükből eredően napon belüli nagy teljesítményingadozással járnak, melyet kezelni kell. Az országos- és elosztóhálózatok fejlesztése és a rugalmassági képességek fejlesztése egyaránt szükséges. Magyarország alaperőművekkel kevesebb, mint a fogyasztás kétharmadát képes fedezni, így alap esetben nagy mértékű importra szorul. Azonban, ahogy a 6-os ábrán is látható, jó idő esetén napközben ez a trend már megfordul, ilyenkor a naperőművek termelésének következtében már az ország villamosenergiát exportál. Ahhoz, hogy ilyen esetben a hazai megtermelt villamosenergia minél nagyobb része az országon belül kerülhessen felhasználásra az országos szintű energiátárolási képességek fejlesztése válik szükségessé.

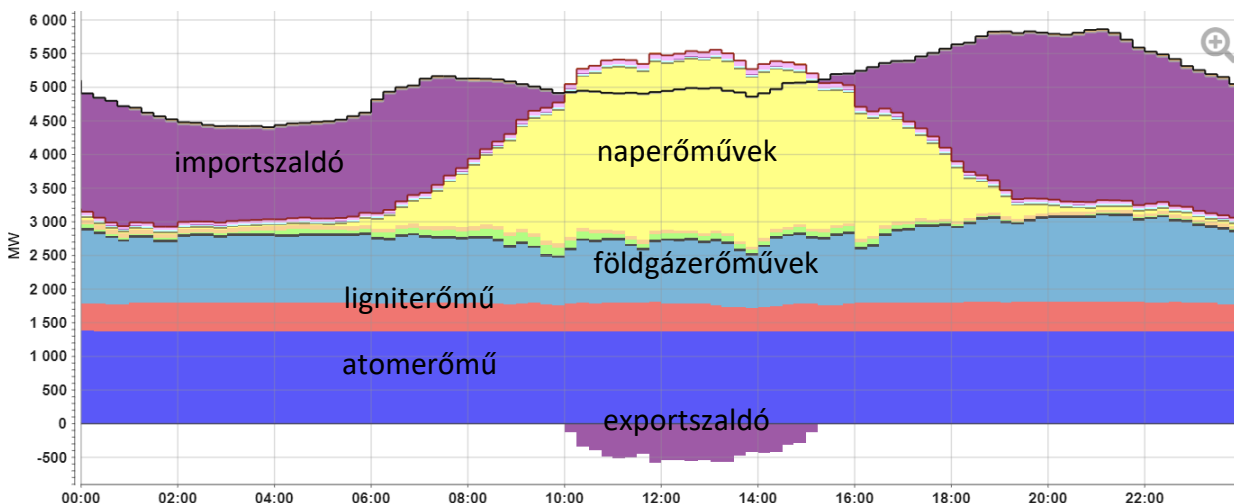
4. ábra. Hazai naperőművek és HMKE rendszerek által termelt havi teljes energiamennyiség 2016-2023 között
(forrás: <https://www.mekh.hu/evkozi-adatok> alapján)



5. ábra. 2023.12.20-ai napi diagram nettó villamos terhelésekkel
(forrás: <https://mavir.hu/web/mavir/rendszerterheles>)



6. ábra. 2023.07.20-ai napi diagram nettó villamos terhelésekkel
(forrás: <https://mavir.hu/web/mavir/rendszerterheles>)



Az alaperőművek és az időjárásfüggetlen, szabályozható erőművek kulcsfontosságú szerepet játszanak az ellátásbiztonság fenntartásában. Azonban ezek a források önmagukban egyre kevésbé képesek ellensúlyozni a megújuló energiaforrásokból fakadó bizonytalanságokat, így az energiatárolás különböző formái kerülnek előtérbe, mint potenciális megoldások. Dolgozatom nem tűzi ki célul, hogy a megújuló energiatermelési és energiatárolási lehetőségeket országos szinten részletezze; ehelyett az ipari fogyasztók szemszögéből vizsgálom meg az akkumulátoros energiatárolók telepítésének lehetőségeit, különös tekintettel arra, hogy milyen előnyökkel járhat ez, ha ezzel napelemes rendszert egészítenek ki. Az Európai Unió 2019-es Negyedik Energiacsomagja is célul tűzi ki, hogy a fogyasztókra vonatkozó villamosenergia-piaci szabályokat aktualizálni kell annak érdekében, hogy a

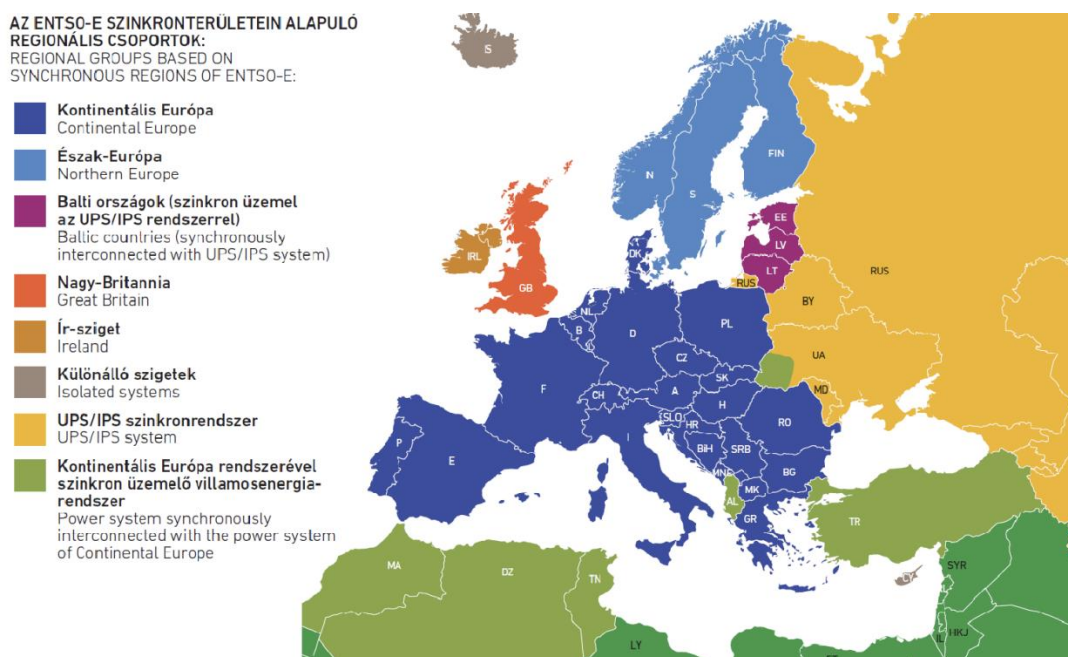
megújuló energiaforrások és az új technológiák folyamatosan és egyre növekvő részarányának rugalmas és gyors integrálását lehetővé tegye az ellátásbiztonság folyamatos fenntartásával. (Fazekas O. (2022))

Ez a megközelítés új perspektívát nyit az energiagazdálkodásban, ahol a megújuló forrásokból származó energia tárolása és tudatos felhasználása elősegítheti az ipari szektor energiaellátásának stabilizálását, a költségek optimalizálását, és hozzájárulhat a zöld átállás gyakorlati megvalósításához.

3. A KIEGYENLÍTŐ SZABÁLYOZÁSI TARTALÉK ÉS ENERGIAPIAC MŰKÖDÉSE

A villamosenergia rendszerben több termelő egység dolgozik együtt több fogyasztó ellátására, hiszen gazdaságossági és biztonsági okokból régen kialakultak már az együttműködő erőművekkel és a villamos hálózattal a villamosenergia-rendszerek, amelyek úgynevezett szinkronzónákba szerveződtek. Egy szinkronzónán belül a hálózati feszültség frekvenciája helytől függetlenül mindenhol szinkronban van. Magyarország az európai kontinentális szinkronzónába tartozik, mely egyben a világ legnagyobb szinkronzónája. A szinkronzónák további szabályozási zónákra vannak osztva. Magyarország önálló szabályozási zónát alkot, melyet a MAVIR (Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító) irányít. (Palej 2014)

7. ábra. Villamosenergia-rendszerek Európában
(forrás: PTE egyetemi oktatási anyag)



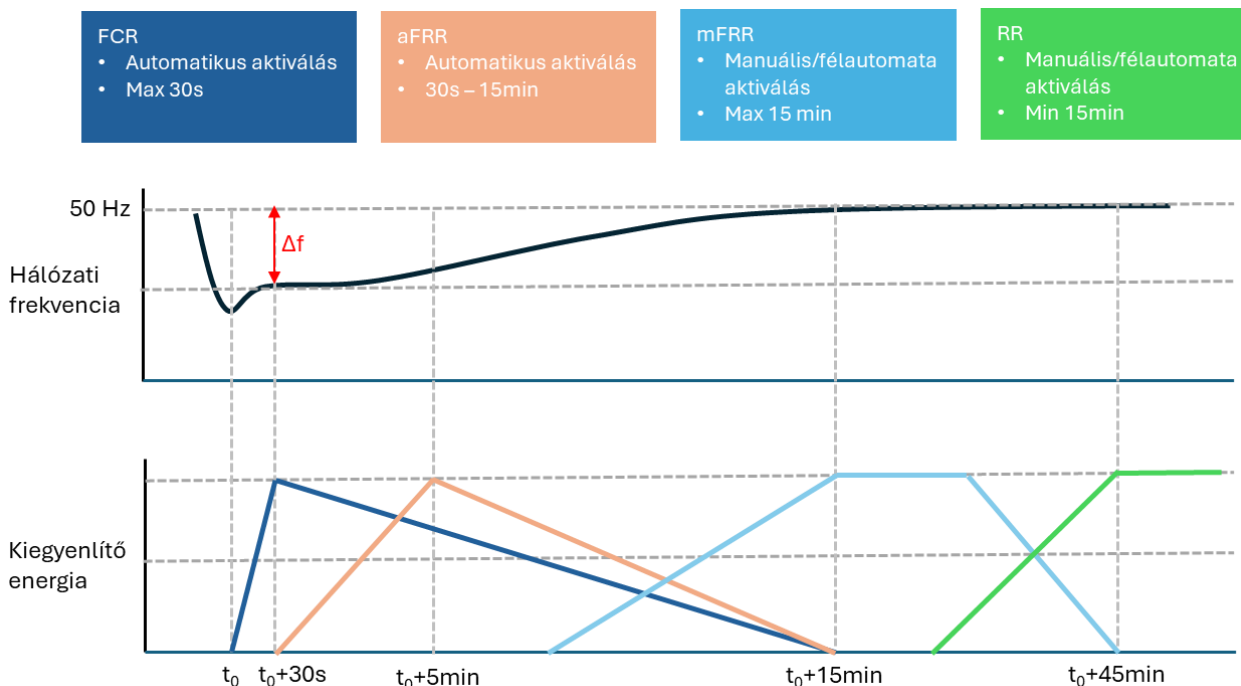
A rendszerirányító célja, hogy országos szinten a villamosenergia fogyasztás és termelés a hálózaton egy előírt frekvencián (50Hz) minden időpillanatban egyensúlyban legyen. Ennek érdekében a villamosenergia termelést és a fogyasztást is előre menetrendezni kell. A cél, hogy a hazai termelés, a fogyasztás, az export és az import minden időpillanatban egymással egyensúlyban legyen. Probléma akkor adódik, hogyha a tervezetthez képest valamilyen okból megváltozik a termelés, a fogyasztás vagy mindkettő. Ez előfordulhat, hogyha a megújuló energiatermelő erőművek az időjárás változása miatt nem az előre menetrendezetthez képest

termelnek, ha valamilyen alaperőműben hirtelen meghibásodás történik, vagy a fogyasztók fogyasztása nem az előre leadott módon történik. A piaci szereplők becslési hibájának vagy a nem várt helyzetek következtében kialakuló teljesítménykülönbség kiegyenlítése és az egyensúly fenntartása a MAVIR feladata. A folyamatos egyensúly fenntartása érdekében a kiegyenlítő szabályozási szolgáltatások beszerzése előre meghatározott irányelvek mentén piaci alapon történik. (Palej 2014) (Aszódi – Yamaji – Tóth (2019))

Egy szinkronzóna szabályozási zónáján belül a frekvencia névleges értékének beállítására és szabályozására van egy előre meghatározott megfelelő hierarchikus szabályozás. Ehhez az ENTSO-E által meghatározott irányelvek mentén különböző szabályozási termékek állnak rendelkezésre, melyet az átviteli rendszerirányító szerez be és vesz igénybe. Különböző időtávú tendereken keresztül szerzi be a szükséges mennyiséget a meghatározott kiegyenlítő szabályozási kapacitásokból, majd ezt követően szintén piaci alapon kerül lekötésre a kiegyenlítő szabályozási energia. Mindkettő típusú terméknek létezik napon belüli piaca is. Jelenleg a kiegyenlítő szabályozási tartalékok és energia döntően a hazai piacokról kerül beszerzése, azonban itt is elindult egy európai harmonizációs folyamat, melyet a villamosenergia-piacok kiegyensúlyozására vonatkozó EU-irányelvnek megfelelően a tagállamok elkezdtek implementálni (PICASSO - Platform for the International Coordination of Automated Frequency Restoration and Stable System Operation). A fő célja a kiegyenlítő szabályozási piacok integrálása és harmonizálása, a határon túli szabályozási szolgáltatások megvalósítása. Ezáltal az erőforrások hatékonyabban felhasználhatóak és növelhető az ellátásbiztonság a költségek mérséklése mellett. (Fazekas O. (2022))

A villamosenergia-rendszer egyensúlyának fenntartása érdekében négyféle tartaléktípus létezik. Ezek frekvenciatartási és helyreállítási tartalékok, ugyanis a termelés és a fogyasztás kiegyenlítetlenségéből adódó teljesítménykülönbség a hálózati frekvencia változását idézi elő.

8. ábra. Kiegyenlítő szabályozási tartaléktípusok
(Fazekas O. (2022) alapján)



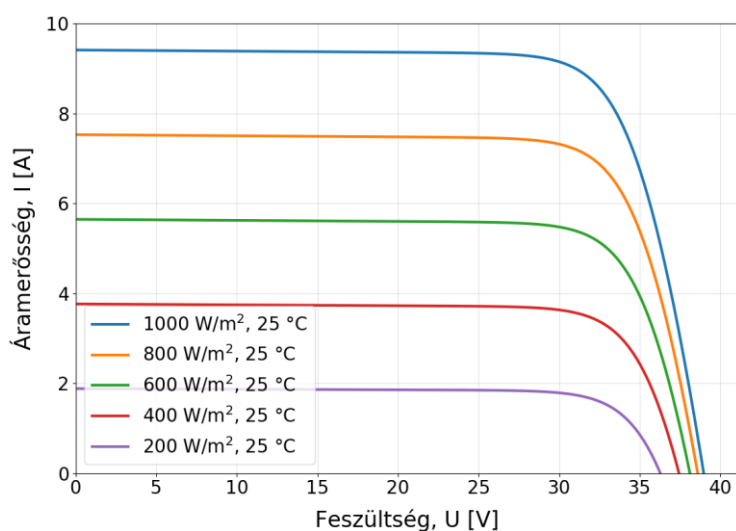
Időben a leggyorsabb a frekvenciatartási tartalék (FCR – Frequency Containment Reserve). Ennek a feladata a hirtelen bekövetkező kiegyensúlyozatlanság következtében kialakult frekvenciaváltozás megállítása. A frekvenciaváltozást érzékelve 30 másodpercen belül automatikusan aktiválódik. A névleges frekvencia visszaállításáért a hierarchikus rendben következő két tartalék felel. Ezek közül a gyorsabb az automatikus (aFRR – automatic Frequency Restoration Reserve), a lassabb a manuális (mFRR - manual Frequency Restoration Reserve) frekvenciahelyreállítási-tartalék. A reakcióidőn kívül különbség van még a terhelésváltoztatási-sebességben is. Az előbbi egy automatikusan vezérelt egység, mely percek alatt képes elérni a kívánt teljesítményszintet, míg utóbbi manuálisan a MAVIR utasítására indítható / változtatható, az igényelt teljesítményt pedig az utasítást követően 15 percen belül kell elérni. A rendszer egyensúlyi helyzetének visszaállítása után a gazdaságosabb üzem megvalósítása érdekében létezik még a helyettesítő tartalék típus is (RR – Replacement Reserve), melyek hosszabb felfutási idővel, de kisebb működési egységköltséggel jellemezhetőek. (Fazekas O. (2022))

Ahhoz, hogy egy országban melyik tartaléktípusból mennyit kell előre beszerezni szintén ENTSO-E irányelv alapján valósul meg.

4. NAPELEMES RENDSZEREK

A napelemek a naptól érkező elektromágneses sugárzást felhasználva állítanak elő villamos energiát. A beeső sugárzás hatására fém és félvezető vagy egy p és egy n típusú félvezető csatlakozásának környezetében elektron-lyukpárok keletkeznek, és a szétváló töltések hatására feszültség jön létre, melyet fotofeszültségnek nevezünk. A rákapcsolt terhelésen átfolyó áram nagysága arányos a panelt érő sugárzás intenzitásával. (http5)

9. ábra. Napelem panelek feszültség-áram karakterisztikája különböző besugárzási értékek esetén (forrás: https://sunformation.blog.hu/2020/02/14/napelem_jelleggorbek_938)

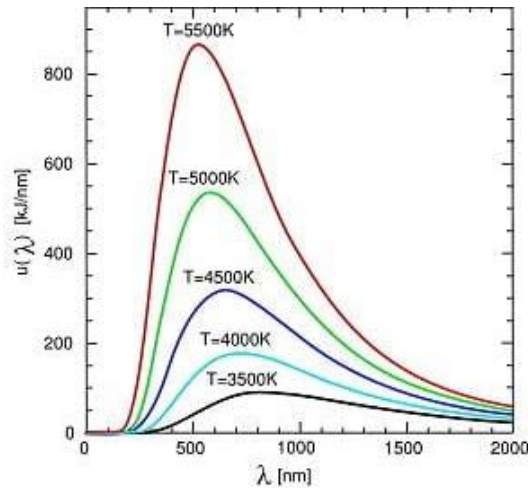


A napsugárzás hőmérsékleti sugárzás, a fizikában feketetest sugárzásként ismert. A feketetest-sugárzás egy idealizált test – az abszolút fekete test – sugárzása. Fekete test ideális formában sohasem fordul elő a természetben, de számos csillagászati objektum megközelítőleg fekete testként viselkedik, így a Nap sugárzása is feketetest sugárzásként közelíthető. (Hömöstre 2014)

Ez a fizikai törvény azt mondja ki, hogy egy test emissziós és abszorpciós képessége, azaz sugárzó és elnyelő képessége egyenes arányban áll egymással (minden test, amely sugárzást nyel el, képes azt ki is bocsájtani). Ez a tulajdonság független a test anyagától. Stefan és Boltzmann fizikusok bizonyították be először, hogy a test által kisugárzott teljesítmény a hőmérséklet negyedik hatványával arányos. Azaz, minél magasabb hőmérsékleten sugároz egy test, annál több energiát sugároz ki és egységnyi hőmérséklet emelkedés igen jelentős energiátöbbletet jelent. A 10. ábrán pár példán látható az egyes hőmérsékletekhez tartozó

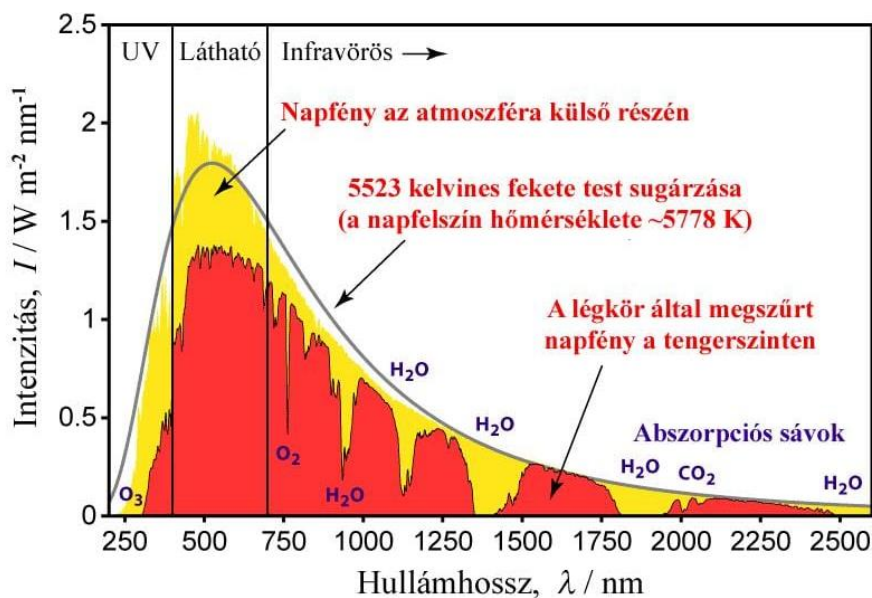
kisugárzott energiamentiség. (Például egy test, amely $T=3500\text{ K}$, azaz 3297 °C -on sugároz, csak a töredékét sugározza egy $T=5500\text{ K}$ hőmérsékleten sugárzó testnek)

10. ábra. Különböző hőmérsékletekhez tartozó feketetest sugárzás
(forrás: <https://nvsolar.hu/tudastar/a-napelemek-mukodesenek-fizikai-alapjai>)



A Nap felszíni hőmérséklete $T = 5795\text{ K}$ és a sugárzása megfelel a fent említett törvényszerűségnek. A 11. ábrán látható a napsugárzás fénspektruma.

11. ábra. A nap sugárzási spektruma és a feketetest sugárzás
(forrás: <https://nvsolar.hu/tudastar/a-napelemek-mukodesenek-fizikai-alapjai>)



A piros terület mutatja azt az energiát, amely a Földfelszínre leérkezik. A Földet érő napsugárzás egy részét még tiszta időben is visszaveri, illetve elnyeli a légkör. A földi légkör egy négyzetméterére merőlegesen beeső sugárzási teljesítmény 1370 W , ez a mennyiség a napállandó.

A napelem panelekben az energiaátalakítás alapja, hogy a sugárzás hatására mozgásképes töltött részecskék jönnek létre, amiket az elektrokémiai potenciálok, illetve az elektron kilépési munkák különbözőségéből adódó beépített elektromos tér rendezett mozgásra kényszerít, vagyis elektromos áram jön létre. Ez a jelenség bármilyen megfelelő fény spektrummal rendelkező fényforrás esetén is lezajlik, nem szükséges kizárólagosan napfény. (http3)

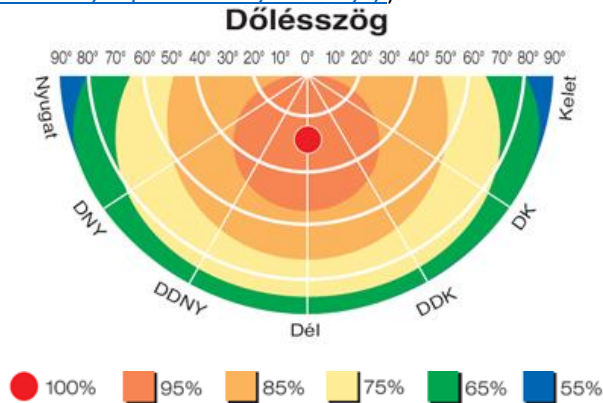
Anyagukat tekintve a két főbb napelem típust különböztethetünk meg. A mono- és polikristályos technológiával készülő napelemek napjainkban a legelterjedtebb napelem-technológiának számítanak. A szilícium félvezetőn alapuló elemeket 1954-ben mutatták be. (http6)

1. Monokristályos szilícium napelemek: A monokristályos panelek drágábbak, de hatékonyak. A legkorszerűbb panelek hatásfoka 18%, laboratóriumi körülmények között 25% (az elméleti határ 33,7% az egy p-n átmenettel rendelkező napelemek esetében). Legnagyobb teljesítményét merőlegesen beeső napfénynél képes leadni, így gyakran használják napkövető berendezések részeként.
2. Polikristályos szilícium napelemek: Némileg olcsóbbak, ám kevésbé hatékonyak. Hatásfokuk 13-18% között van, az átlagos hatásfok kb. 15%. A gyengébb (reggeli, esti, szórt) fényt is viszonylag jó hatásfokkal képes hasznosítani.

A napelemes rendszerből kinyerhető teljesítmény több tényezőtől is függ. Elsősorban a sugárzás beesési szögétől és intenzitásától. Az intenzitást nem tudjuk befolyásolni, viszont a beesési szögre lehet bizonyos ráhatásunk. A beépítés szerint lehet a rendszer fix vagy napkövető jellegű. Fix rendszer esetén a napelemek tájolása nem változtatható, így a nap folyamán a nap járása szerint a panelre érkező sugárzás beesési szöge folyamatosan változik. A fixen beépített napelem megfelelő tájolás esetén (déli irány, Magyarországon 35 fokos dőlésszög) reggeltől estig tud áramot termelni tiszta idő esetén. (http5)

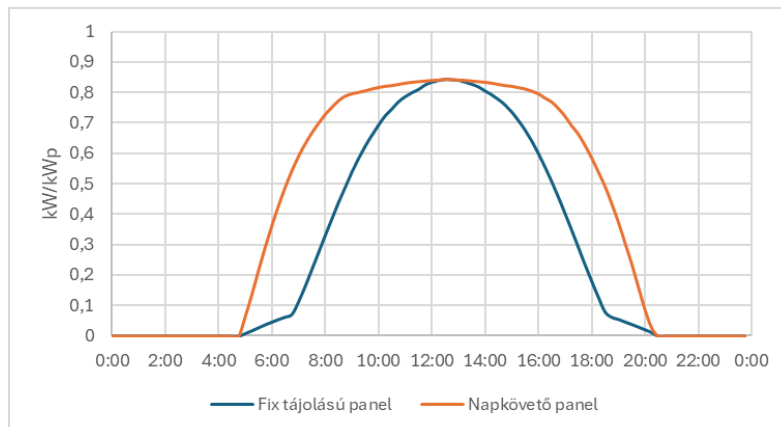
12. ábra. A napelempanel tájolásának és dőlésszögének hatása a villamosenergia-hozamra, a maximálishoz képest

(forrás: <https://www.napelemek.net/napelemek-teljesitmenye/>)



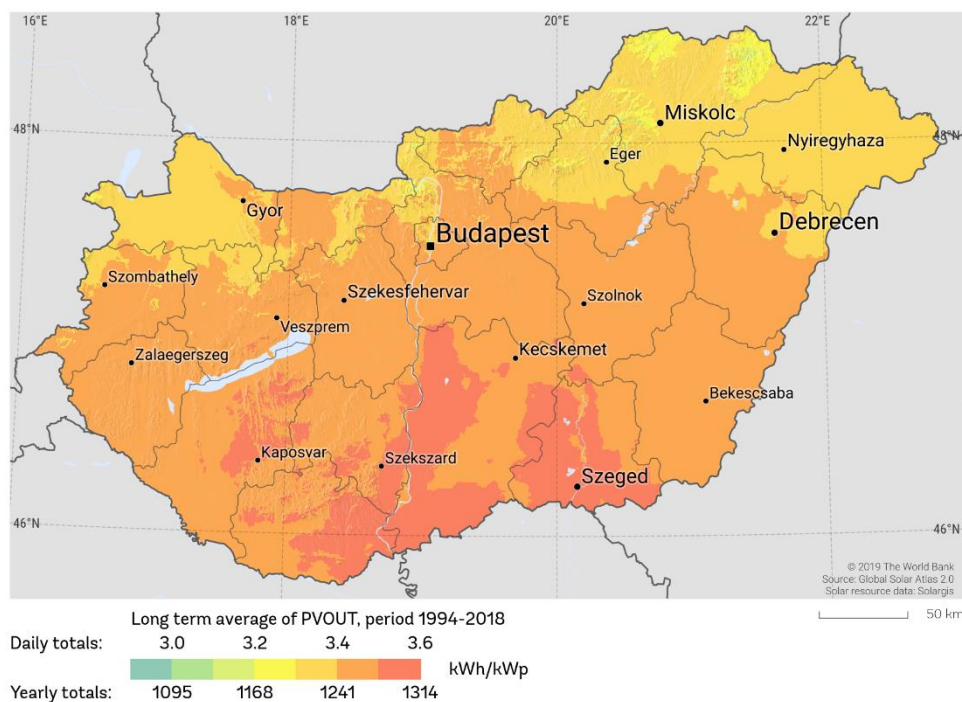
Ahhoz, hogy egész nap az időjárás által megengedett maximális teljesítménnyel lehessen energiát termelni, meg kell oldani, hogy a beesési szöget a nap folyamán a maximális termeléshez tartozó érték közelében tudjuk tartani. Ezt kéttengelyes mozgató mechanizmussal lehet biztosítani, ugyanis a nappal folyamán vízszintesen forgatnunk, függőlegesen bólintanunk kell a napelemet úgy, hogy a napsugár beesési szöge a lehető legkisebb mértékben térjen el a merőlegetől. Ehhez plusz elektronikát és mechanikus elemeket kell felhasználnunk, és a telepítési hely megválasztására is nagyobb gondot kell fordítani, továbbá karbantartási költségekre is számítani kell. Ellenben a fix beépítésnél elegendő a ház tetőszerkezetét felhasználnunk a napelemek tartójának. (http5)

13. ábra. Fix tájolású és napkövető mechanizmussal ellátott 1kWp rendszer napi teljesítménygörbéje (saját forrás, TMY adatok alapján PVLIB használatával)



A napkövető rendszerekkel a magyarországi éghajlati viszonyok mellett 30-40%-kal nagyobb teljesítmény érhető el. Fixen telepített napelemes rendszer által az éves, 1 kWp beépített teljesítményre vonatkozó megtermelhető energia Magyarországon a 14. ábrán látható.

14. ábra. Éves fajlagos magyarországi hozamtérkép
(forrás: <https://globalsolaratlas.info/download/hungary>)



Annak megvalósítása érdekében, hogy a napelemes rendszer az elektromos hálózathoz csatlakoztatható legyen, és a megtermelt energiát fel lehessen használni, a panelek által előállított egyenáram átalakítására van szükség. Ez inverter segítségével valósítható meg, mely az egyenáramot a hálózattal szinkronban lévő 50Hz-es szinuszos váltakozó árammá alakítja át.

A mai korszerű inverterek azonban ennél sokkal több feladatot is ellátnak:

- optimalizálják az áramtermelést
- biztonsági és védelmi funkciókat látnak el
- adatgyűjtést és távfelügyeletet biztosítanak
- esetlegesen a saját fogyasztók egy részét is vezérelni tudják
- Akkumulátor csatlakoztatását és vezérlését is lehetővé teszik

Az így előállított energia közvetlenül felhasználható, vagy tárolható az akkumulátoros energiátároló rendszerekben későbbi felhasználás céljából. Az energiátárolók kritikus szerepet töltenek be a termelés és a fogyasztás közötti időbeli eltérések kezelésében, lehetővé téve az energiatermelés optimalizálását és a hálózati függőség csökkentését.

5. ENERGIATÁROLÁS

A villamosenergia tárolása kulcsfontosságú az energiahálózatok hatékonyságának és stabilitásának javításában, valamint a megújuló energiaforrások, mint például a nap- és szélenergia, kiszámíthatatlanságának ellensúlyozásában. Számos módszer létezik a villamosenergia tárolására melyeknek eltérő előnyei és hátrányai miatt más és más telepítési és használati célja van.

5.1 Energiatárolási lehetőségek

5.1.1 AKKUMULÁTOROK

Az akkumulátorok a legelterjedtebb energia tárolási megoldások közé tartoznak. Különböző típusú akkumulátorok léteznek, beleértve a lítium-ion, ólom-sav, nátrium-kén és redox-flow akkumulátorokat. Manapság a legelterjedtebb akkumulátor típus a Lítium-ion alapúak, ez jelenleg a legnagyobb volumenben gyártott és felhasznált akkumulátortípus. Számos méretben alkalmazhatóak, kezdve az elektronikai eszközök áramellátásának biztosításától a MW-os nagyságrendben telepített akkumulátor telepekig. Az energiaellátás szempontjából háztartási és ipari fogyasztók számára telepített napelemes rendszer mellé megfelelő választás lehet, valamint országos szinten pár tíz MW-os teljesítményig rendszerszintű szolgáltatások nyújtására is alkalmas lehet.

5.1.2 SZIVATTYÚS TÁROZÓK

Az akkumulátoroknál nagyobb léptékű energiatárolás megvalósítására szolgál. A beruházás méreténél és komplexitásánál fogva országos rendszerszintű energiatárolásra használják elsősorban. Könnyen kezelhető vele a megújuló erőművek termelése és az országos fogyasztásban jelentkező eltérés kiegyenlítésének igénye. Működési elve a helyzeti energia különbségen alapul. Adott két víztározó medence, egy alacsonyabban és egy magasabban fekvő. Amikor többlet termelés van a hálózaton, akkor egy szivattyú segítségével vizet juttatnak fel a magasabban fekvő tározóba, amikor fogyasztási többletigény van, akkor a felső tározóból a vizet egy turbinán keresztül leeresztve villamos energia állítható elő újra.

5.1.3 HIDROGÉN ALAPÚ ENERGIATÁROLÁS

A hidrogén alapú energiatárolás egy ígéretes megoldásnak számít a jövőre vonatkozóan, mely egy új, zöld energiaforrásként jelenik meg az energiaiparban is. már ma is hasznosítják a tömegközlekedés, így a vonat- és légi közlekedésben, a fémmegmunkálás és a telekommunikációs rendszerek segédáramforrásaként, illetve az élelmiszeriparban és a mezőgazdaságban is. Elektrolizáló berendezéssel elektromos árammal vízből hidrogén és oxigén állítható elő. A hidrogén szeparálható és későbbi felhasználás céljából tárolható. Tárolni gázként nagy nyomáson, vagy cseppfolyós formában is lehet. Azonban mindkettő bonyolult és költséges megoldásnak számít jelenleg. A hidrogénből üzemanyagcellákkal oxigén hozzáadásával hő és villamosenergia is előállítható (a reakciótermék víz lesz), vagy maximum 10%-os arányban a földgázhoz is hozzákeverhető-

5.1.4 KÉMIAI TÁROLÁS

Különböző kémiai folyamatokat alkalmaznak az energia tárolására és felszabadítására. Ezek közé tartoznak például az elektrolízis, a redox folyamatok és a hidrogén tárolása kémiai üzemanyagok formájában.

Ezek a módszerek különböző előnyökkel és korlátozásokkal rendelkeznek, és a helyi energiaigények, a rendelkezésre álló infrastruktúra és a technológiai fejlettség alapján kell kiválasztani őket. Az energia tárolásának fejlesztése kulcsfontosságú az energiahatékonyság növelésében és a megújuló energiaforrások integrálásában az energiaellátási rendszerekbe.

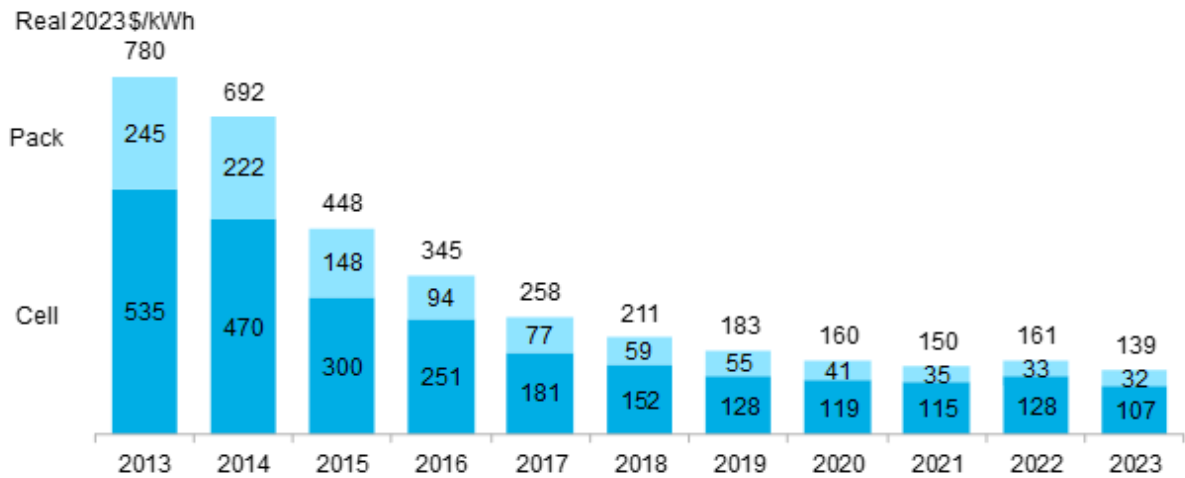
5.2 Lítium-ion alapú akkumulátorok

A lítium a periódusos rendszer legkönnyebb fémje, ugyanakkor a legnagyobb elektrokémiai potenciállal is rendelkezik. Ennek következtében jelenleg az egyik legnagyobb energiasűrűségű akkumulátor alapanyagának számít. Az első lítiumelemekkel kapcsolatos elméleteket már 1912-ben felvetette Gilbert Newton Lewis amerikai kémikus, azonban csak az 1970-es években jelent meg az első kereskedelmi forgalomban kapható, nem tölthető lítiumelem. Az első lítium alapú akkumulátorra azonban még éveket kellett várni. A legnagyobb kihívást a cellák instabilitása és ennek a megoldása jelentette. Gyakran előfordult, hogy az elektróda és az elektrolit közötti szeparátor megszakadt, zárlatot okozva. Ennek következményeként a cella felforrósodott, a lítium megolvadt és egy olyan folyamat indult el, ami a cella felrobbanásához vezetett.

Az első stabil cellákat akkor sikerült megalkotni, amikor a lítiumot valamilyen vegyület formájában alkalmazták elektrolitként, míg oxid formájában a cella katódjaként szolgált. Az anód szén vagy grafit elektróda volt. 1991-ben a Sony volt az első vállalat, amely piacra dobta a lítiumion akkumulátort, amely később a vezető akkumulátorfajtvává vált. A lítium ion cellákra a magas, 3,6 V-os cellafeszültség, a nagy energiasűrűség, nagyjából 20-80%-os töltöttségi tartományban a lineáris töltési-kisütési karakterisztika és a jó energetikai hatások jellemző. (http7)

A folyamatos kutatás-fejlesztésnek köszönhetően, a megjelenést követő években a lítium akkumulátorok fajlagos előállítási költsége 2500 USD/kWh, addig a 2000-es évek elejére a költség 800 USD/kWh-ra csökkent, miközben egy jellemző 18650-es méretű cella névleges kapacitása is nőtt. Manapság az ilyen lítiumion akkumulátorok ára tovább csökken (2023-ban egy cella fajlagos előállítási költsége már csak 100 USD/kWh), miközben a 3000 mAh-át is túllépi egy cella névleges kapacitása és ez a tendencia folytatódni látszik.

15. ábra. Lítium-ion akkumulátorok árának alakulása cella és pakk szinten
(forrás: <https://cleantechnica.com/2023/12/01/record-low-ev-battery-prices/>)



Több kedvező tulajdonság mellett természetesen hátrányai is vannak a lítium alapú akkumulátoroknak. A kezdeti instabilitás jelentősen csökkent, de a töltés és kisütés felügyeleti elektronikát igényel, ugyanis a cella nagyon érzékeny a túlmerítésre és a túltöltésre (alacsony és magas feszültségszintek), valamint a nagy árammal történő töltésre és kisütésre. Ilyen esetekben nagyon könnyen maradandóan károsodhat, rosszabb esetben, vagy további használat esetén kigyulladhat. Túlmelegedés és ezt követő kigyulladás esetén technikailag robbanásról is beszélhetünk, ugyanis a cellán belül végbemenő kémiai reakció sebessége olyan gyors, hogy a burkolatnak nincs ideje kiengedni a keletkező gázokat (a prizmatikus cellákat is úgy tervezik, hogy egyik végük szándékosan gyengébb, így robbanás esetén nem az egész cella robban szét, hanem irányítottan az egyik végénél történik robbanás). Lítium-ion alapú akkumulátorok oltása is problémás, ugyanis túlmelegedés esetén az égéshez szükséges minden feltétel teljesül cellán belül is, és az égés víz alatt is folytatódik. Speciális habokkal próbálkoznak jelenleg, de kiforrott, gyors oltási technológia még nem létezik.

A lítiumion akkumulátorok számos összetételben, méretben és formában léteznek, amely sokszínű felhasználást tesz lehetővé a hordozható eszközöktől kezdve a nagyméretű akkumulátortelepekig.

6. AKKUMULÁTOROS ENERGIATÁROLÓK ALKALMAZÁSA IPARI KÖRNYEZETBEN

Az ipari felhasználók számára a fenntartható és költséghatékony energiaellátás kritikus jelentőségű. Az akkumulátoros energiatároló és a napelemes rendszer kombinációjának telepítése lehetőséget kínál az ipari szektor számára az energiaellátás diverzifikálására, költségek csökkentésére és a környezeti lábnyom minimalizálására. Ebben a fejezetben bemutatásra kerül az akkumulátorral kiegészített napelemes rendszer használatának lehetőségei, előnyei, kihívásai és gazdasági szempontjai.

Akkumulátorral kiegészített napelemes rendszer előnyei:

- **Energiaköltségek csökkentése:** Az akkumulátoros és napelemes rendszerek csökkentik a hálózatról vásárolt energia mennyiségét.
- **Energiafüggetlenség és megbízhatóság:** Az energiatárolók növelik az energiafüggetlenséget, csökkentik a hálózati zavarokra való érzékenységet, és biztosítják az energiaellátás folytonosságát kritikus ipari folyamatok esetén.
- **Környezeti fenntarthatóság:** A megújuló energiaforrások használata jelentősen csökkenti az üvegházhatású gázok kibocsátását, támogatva a zöld célok elérését és a környezettudatos márkakép kialakítását.

Kihívások és megfontolandó tényezők:

- **Kezdeti beruházási költségek:** A napelemes rendszerek és az energiatárolók jelenleg magas kezdeti beruházási költségeket jelentenek, bár ezek idővel megtérülnek az üzemeltetési költségek csökkenésén keresztül.
- **Időjárásfüggőség:** A napelemes rendszerek teljesítménye közvetlenül függ az időjárási körülményektől, ami bizonytalanságot jelenthet az energiaellátásban. Ezt azonban egy megfelelően méretezett energiatárolóval csökkenteni lehet.

A projekt gazdasági életképességének értékelésekor fontos figyelembe venni az energiaköltségek megtakarítását, a rendszer amortizációját, az állami támogatásokat és adókedvezményeket, valamint a beruházás megtérülési idejét. Az ipari felhasználók számára az akkumulátoros energiatárolók és a napelemes rendszerek kombinációja jelentős előnyöket

kínálhat az energiaellátás megbízhatóságának, költséghatékonyságának és környezeti fenntarthatóságának terén. A sikeres implementációhoz azonban alapos tervezésre, a rendelkezésre álló technológiák és gazdasági tényezők gondos mérlegelésére van szükség.

6.1 Alkalmazási lehetőségek

Jelenleg a hálózatfejlesztések hosszú időt vesznek igénybe, ezáltal visszatáplálásra benyújtott hálózati igények engedélyezése sok esetben csak több évvel később valósulhat meg. Ez megjobban felértékeli az ipari szektorban a saját célra termelő vissz-wattos rendszerek (SCTE) és az azt kiegészítő akkumulátoros rendszerek jelentőségét. Vissz-wattos és visszatáplálós rendszerek esetén több lehetőség is rendelkezésre áll az akkumulátorral kiegészített napелеmes rendszerek üzemeltetésére vonatkozóan.

Az ipari fogyasztók a villamosenergia szolgáltatásban nem az egyetemes szolgáltatáshoz tartoznak. Külön kell szerződniek Elosztói Engedéllyessel, valamint energiakereskedővel. Az Elosztói Engedélyes nem választható, területtől függ, hogy kivel kell szerződnie, míg az energiakereskedő szabadon megválasztható. Az elosztói szolgáltató feladata a villamos energia eljuttatása a fogyasztási helyre és a csatlakozási ponton a szerződött vételezési teljesítmény biztosítása. Ezért a szolgáltatásért az elosztói szolgáltatónak kell fizetni a rendszerhasználati díjakat. A rendszerhasználati díj több tételből áll, melynek csatlakozási típustól függően (kis-, közepes-, nagyfeszültségű) vannak fix, teljesítményarányos és forgalomarányos összetevője is.

Az energiakereskedőn keresztül a villamosenergia beszerzése valósul meg. Az energiakereskedővel kötött szerződés értelmében kell a felhasznált villamos energia díját kifizetni, mely lehet fix, vagy időben változó ár (például a HUPX DAM vagy IDM piachoz indexált).

A 2024. január 01-től érvényes rendszerhasználati díjakat az alábbi táblázat foglalja össze.

1. táblázat. 2024. január 01-től érvényes rendszerhasználati díjak

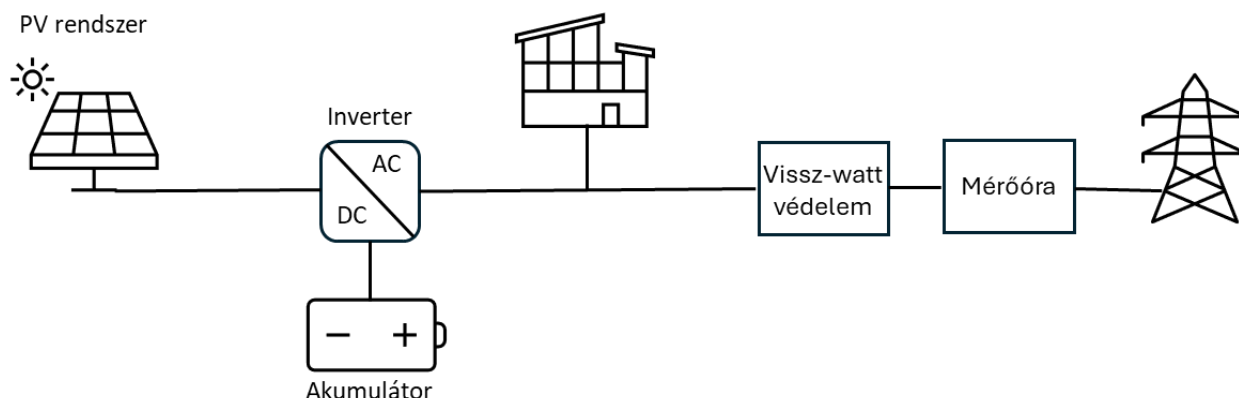
(forrás: <https://www.mvmhalozat.hu/aram/oldalak/1456>)

Csatlakozás feszültség szintje	Átviteli díj	Elosztási díj elemek				
		Elosztói alapidíj	Elosztói teljesítmé nydíj	Elosztói forgalmi díj	Elosztói meddő energia díj	Közvilágítási elosztási díj
	Ft/kWh	Ft/csatl. pont/év	Ft/kW/év	Ft/kWh	Ft/kVArh	Ft/kWh
Nagyfeszültségű	6,8	433 176	2 376	1,12	2,89	
Nagy/Középfeszültség ű	6,8	216 588	8 004	2,55	3,50	
Középfeszültségű	6,8	216 588	15 924	7,52	3,50	
Közép/Kisfeszültségű I.	6,8	7 224		22,74	4,85	14,98
Közép/Kisfeszültségű III.	6,8	72 192	16 608	14,05	4,85	
Kisfeszültségű I.	6,8	1 446	0	16,60	4,21	
Kisfeszültségű II.	6,8	474		9,38		
Kisfeszültségű III.	6,8	72 192	13 248	21,33	4,85	

6.2 Vissz-watt védelemmel telepített rendszerek

Jelenleg Magyarországon az iparban a saját célra termelő vissz-wattos rendszerek használata és telepítése a legelterjedtebb, ezért a továbbiakban ez kerül részletesebben bemutatásra.

16. ábra. Saját célra termelő napelemes és akkumulátoros rendszer sematikus ábrája
(forrás: saját szerkesztés)



6.2.1 ÖNFOGYASZTÁS OPTIMALIZÁLÁS

Ön fogyasztás optimalizálás esetén a napelemes rendszer által megtermelt energia minél nagyobb arányú felhasználásának elérése a cél. Vissz-wattos napelemes rendszer energiatárolóval való kiegészítése révén csökkenthető a vissz-watt veszteség, ezáltal tovább csökkenthető a hálózatról vételezett energia mennyisége. Amikor a napelemek többet termelnek, mint ami az aktuális fogyasztás, abban az esetben a napelemes rendszert le kell szabályozni az aktuális fogyasztási küszöbre, ugyanis a hálózatra történő visszatáplálás nem engedélyezett. Akkumulátor alkalmazásával ez az energia eltárolható és később, amikor a napelemes termelés már önmagában nem tudná fedezni a fogyasztást, akkor felhasználható. Ez a fogyasztási szokásoktól függően lehet a déli többlettermelés felhasználása az esti órákban vagy éjszaka, vagy akár a hétfői termelés egy részének felhasználása a hétfői üzemkezdetkor. Ebben az esetben a beruházással elérhető megtakarítás a vételezés energiadíjából és a forgalomarányos rendszerhasználati díj tételeinek csökkenéséből erednek.

A központi energiamenedzsment működése az alábbi szabályok szerint valósul meg:

1. A napelemes termelés első sorban a fogyasztásba integrálódik. Ha a napelemes termelés kisebb, mint az aktuális fogyasztás, akkor minden energia a fogyasztásban kerül felhasználásra.

2. Ha a napelemes termelés nagyobb, mint az aktuális fogyasztás és az energiatároló nincsen teljesen feltöltve, akkor a többlet termelés az energiatárolóban kerül eltárolásra.
3. Ha a napelemes termelés nagyobb, mint a fogyasztás, és az energiatároló teljesen fel van töltve, akkor a napelemes rendszert le kell szabályozni, ez itt is veszteséget jelent.
4. A tároló oldaláról: Ha a napelemes rendszer termelése kisebb, mint az aktuális fogyasztás és a tároló nincsen teljesen lemerülve, akkor az aktuális fogyasztás szintjéig (vagy a tároló által kiadható maximum teljesítményig) a tárolóból is felhasználásra kerül az eltárolt energia.
5. Minden egyéb esetben, amikor a fogyasztás nem fedezhető teljes egészében (vagy egyáltalán nem) a napelemes és akkumulátoros rendszerrel, a szükséges energia a hálózatról kerül vételezésre.

A jelenlegi napelem és akkumulátor árak mellett már elmondható, hogy az akkumulátor nemhogy jelentősen megnövelné a beruházás megtérülését ilyen felhasználás mellett, hanem sok esetben már csökkenti is a beruházás megtérülését azzal szemben, mintha csak napelemes rendszer kerülne telepítésre.

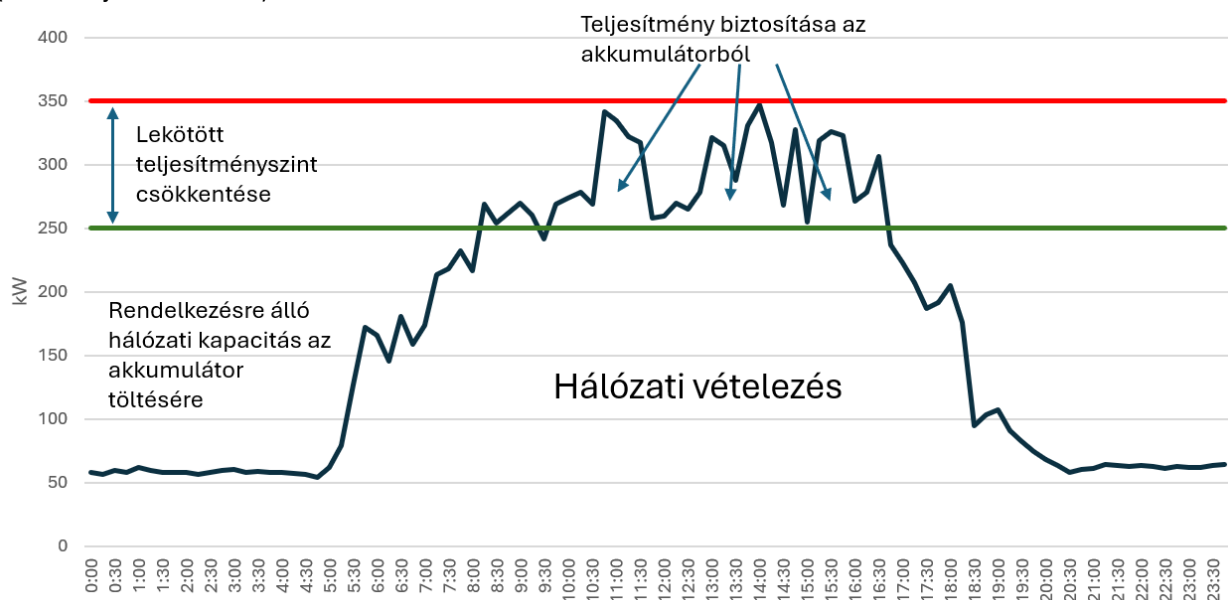
6.2.2 PEAK-SHAVING (CSÚCSFOGYASZTÁS-LEVÁGÁS)

A "peak shaving" alapvetően egy olyan stratégiát jelent, amelyet az energiafelhasználók alkalmaznak annak érdekében, hogy csökkentsék az energiafogyasztásuk csúcserőértékeit (angolul: peak demand). A "peak demand" azon időszakokat jelöli, amikor az energiafelhasználás a legmagasabb az adott időszakban vagy az adott napon. A hazai szolgáltatási környezetben, az ipari felhasználók Elosztói Engedéllyessel való szerződésében a lekötött teljesítmény értéke is rögzítésre kerül. Ez az a teljesítmény érték, amelynek a rendelkezésre állását minden időpontban biztosítani kell a csatlakozási ponton. Általában a legnagyobb fogyasztási időszakokban jelentkező teljesítményfelvételi csúcsok alapján határozzák meg az éves lekötés értékét. Kisfeszültségen a 3x80A-t meghaladó csatlakozás, közép- illetve nagyfeszültségű csatlakozás esetén a fogyasztók idősoros elszámolású körbe tartoznak, ezáltal az ipari fogyasztók legnagyobb része is. Ebben az esetben az éves lekötésre az alábbi szabályok vonatkoznak (MVM HSzSz I. melléklet):

1. Egy hónapban a lekötött teljesítmény túllépése esetén pótdíjat kell fizetni, melynek értéke a túllépés minden kW-jára az elosztói teljesítménydíj éves díjtételének negyede.
2. Ha a lekötött teljesítmény túllépése előzetesen bejelentésre került, és azt az Elosztói Engedélyes jóváhagyta, akkor a pótdíj havi értéke a túllépés minden kW-jára az elosztói éves teljesítménydíj 1/10-e. Erre egy naptári évben maximum 3 alkalommal kerülhet sor.

Ez alapján van mozgástér éves szinten a lekötést optimalizálni (költségek szempontjából optimalizált lekötési tervet készíteni). Ez egyrészt megvalósítható azzal, hogy a fogyasztók az energiaigényesebb tevékenységeket időzítik át vagy leállítják a csúcsidőszakokban. Ez lehet például az energiaigényes gépek vagy berendezések működtetésének átütemezése olyan időszakokra, amikor az energiafogyasztás alacsonyabb, vagy az energiahatékonyabb technológiák vagy rendszerek bevezetése az energiafogyasztás csökkentése érdekében. Másrészt, ha van telepített napelemes és akkumulátoros rendszer, akkor megfelelő vezérléssel a teljesítménylekötés optimalizálása ezzel is megvalósítható. Ez esetben a lekötött teljesítménydíj tétele csökkenthető éves szinten.

17. ábra. Peak-shaving illusztrálása egy napos fogyasztási profilon
(forrás: saját szerkesztés)



Ide kapcsolódik a változó energiaárú szerződés esetén megvalósítható energiaár arbitrázs is. Ebben az esetben amikor olcsó az energia ára, akkor többlet vételezéssel eltárolásra kerül az akkumulátorban majd, amikor napon belül drágább az áramár, akkor a tárolóból felhasználásra kerül, így a villamosenergia árkülönbsége által érhető el megtakarítás.

Akkumulátoros és napelemes rendszer esetén a központi energiamedzsment működése az alábbi szabályok szerint valósul meg:

1. Az akkumulátor elsődleges feladata a fogyasztási csúcsoknál a lekötött teljesítményszint feletti fogyasztás biztosítása annak érdekében, hogy a hálózati fogyasztás a lekötött mennyiséget ne lépje át.
2. Az akkumulátornak a várható fogyasztási csúcsok előtt feltöltött állapotban kell lennie, amely megvalósítható a napelemes rendszerről, illetve a hálózatról is, az aktuális fogyasztás felett a lekötött teljesítményszint mértékéig.
3. A hatékony működéshez elengedhetetlen a fogyasztás minél pontosabb tervezése, ezáltal sokkal könnyebben optimalizálható a működés. Illetve, ha előre tudott, hogy milyen időszakokban nem kell majd az akkumulátort peak-shavingre használni, akkor tovább optimalizálható a rendszer működtetése azáltal, hogy például önfogyasztás-optimalizálásban is részt vehet az akkumulátor (elkerülve azt, hogy az akkumulátor kvázi kihasználatlanul csak rendelkezésre álljon, mert nem ismert pontosan előre, hogy mikor lesz igény a lekötött teljesítményen felüli fogyasztás esetén az a tároló használatára).

Ez az eset már komplexebb az előzőleg bemutatott önfogyasztás optimalizálásnál, így a rendszer méretezése, az előzetes pénzügyi kalkulációk és a rendszer későbbi működtetése körültekintőbb és részletesebb tervezést igényel.

6.2.3 AFRR SZOLGÁLTATÁS NYÚJTÁS

Ipari fogyasztóknak lehetőségük van az aFRR kiegyenlítőszolgáltatásban részt venni. Ehhez egy aggregátorhoz kell csatlakozniuk, akik több egységet is összefognak. Ez azért szükséges, mert jelenlegi szabályozási környezetben 5 MW szabályozási tartománnyal nem rendelkező egység csak aggregátoron keresztül vehet részt a kiegyenlítőszolgáltatásban. Az aggregátor több egységet összefogva, a minimum szabályozási tartományt elérve tudja a portfóliót akkreditálni. A fogyasztóval történő egyedi megállapodások szerint (mikor, milyen teljesítményszintekkel) az aggregátornak kell portfólió szinten kezelni a beadott ajánlatokat a kiegyenlítőkapacitásra és a kiegyenlítőenergiára vonatkozóan. Behívás esetén a MAVIR az aggregátor szabályozóközpontjába küldi el az utasító jelet, onnantól kezdve az aggregátor feladata, hogy aktuálisan a MAVIR által kért utasított eltérést a portfólión belül konkrétan melyik egységekkel hajtja végre. Az aggregátornak kell a megfelelő rendelkező jelet továbbítania jelen esetben a megfelelő ipari fogyasztó felé, ahol a kívánt teljesítményszint módosítást végre kell hajtani. Az időben és teljesítményben nem megfelelően végrehajtott utasítás kötbérfizetési kötelezettséggel jár. (Fazekas O. (2022))

Ipari fogyasztók ilyen módon részt vehetnek a kiegyenlítőszolgáltatás nyújtásban akár egy vezérelhető fogyasztóval is, és/vagy természetesen a telepített napelemes és akkumulátoros rendszer képességeit felhasználva is, az alábbi módokon:

1. Energia FEL irányban: a csatlakozási ponton vételezett energia csökkentése által. Ez megvalósulhat vezérelhető fogyasztó teljesítményfelvételének csökkentésével, vagy a fogyasztás hálózati vételezés helyett napelemes és akkumulátoros rendszerből történő biztosítása által.
2. Energia LE irányban: a csatlakozási ponton vételezett energia növelése által. Ez megvalósulhat vezérelhető fogyasztó teljesítményfelvételének növelésével, vagy a többlet hálózati vételezés akkumulátorban történő eltárolásával.

A kiegyenlítő szolgáltatási utasítás teljesítését minden esetben úgy kell értelmezni és végrehajtani, hogy ebben az esetben az előre leadott fogyasztási menetrendhez képest kell végrehajtani.

A bevételek egy része a kapacitáslekötésből eredő rendelkezésre állási díjból jön, a másik része a tényleges igénybevétel alapján, ha behívásra kerül sor. Az aggregátor feladata, hogy az adott

időszakban lekötni kívánt kapacitásra és behívható energiára a tendereken ajánlatot adjon be. A MAVIR a beérkezett ajánlatokat ár szerint sorba rendezi, úgynevezett Merit Order List-et állít elő (MOL). Ezután a kívánt kapacitáslekötési szintig a kapacitás MOL, míg a behívni kívánt energiamennyiség az energia MOL alapján az olcsóbb ajánlatoktól a drágább ajánlatokig haladva köti le/hívja be az egységeket.

Azonban a pontos pénzügyi elszámolás, és az ipari fogyasztó részesedése a kiegyenlítőpiaci bevételekből egyedi megállapodás tárgyát képezi az aggregátor és a fogyasztó között. Emiatt általánosságban pontos pénzügyi terv a profitmegosztás részleteinek ismerete nélkül nem készíthető, azonban ebben a felhasználási módban lévő potenciál vizsgálható.

6.3 Hálózati visszatáplálással telepített rendszerek

Alapvető különbség a vissz-wattos rendszerekkel szemben, hogy a hálózatra történő visszatáplálás engedélyezett. Az energiakereskedővel kötött szerződés szerint a visszatáplált energiát átvételi áron a kereskedő megveszi. Az átvételi ár azonban jellemzően alacsonyabb a vételezési árnál, ebből az árkülönbségből fakadóan energiatároló telepítése továbbra is indokolt lehet, azonban az átvételi és a vételezési ár aránya a megtérülésre jelentős hatással van. Ezért minden ilyen esetben részletes tervezésre és pénzügyi tervre van szükség, ahhoz, hogy minden szempontból optimális rendszert lehessen választani.

aFRR szolgáltatás nyújtás szempontjából a visszatáplálás lehetősége nagyobb rugalmasságot ad a FEL irányú szabályozhatóságot illetően, ugyanis így visszatáplálás által (akkumulátorból, napelemes termelésből) is biztosítható a szükséges energiamennyiség.

7. SZIMULÁCIÓS MÓDSZERTAN

A bemutatásra kerülő szimulációs környezet ipari napelemes és akkumulátoros rendszerek méretezését/modellezését teszi lehetővé. Akkumulátorral kiegészített ipari napelemes rendszerek méretezése egy komplex mérnöki probléma, mely elsősorban az akkumulátorok nemlineáris viselkedésére, valamint degradációjára vezethető vissza. Egyszerűsített számításokkal könnyen félrevezető eredmények születhetnek, ezáltal műszaki és gazdasági szempontból is hátrányos beruházási döntés születhet.

A szimulációs környezet segítségével az ipari létesítmény fogyasztási adatain alapulva, valamint a beruházás céljának megfelelően műszaki és gazdasági szempontokból meghatározható az optimális méretű napelemes és akkumulátoros rendszer. A szimuláció Digital Twin (digitális ikertestvér) modelleken alapul, azaz a valós működést nagy pontossággal leíró összefüggésekkel/modellezési eljárásokkal a valós rendszer működése kellően magas pontossággal szimulálható, ezáltal biztosítva, hogy a méretezés/rendszertervezés során az adott egyedi körülményeket figyelembe vevő optimális rendszer kerüljön meghatározásra. A modellek megalkotása és a szimulációk futtatása Python, valamint Matlab/Simulink szoftverek segítségével történt.

A szimulációk kimenete egy komplex műszaki és gazdasági elemzés, mely amellet, hogy megjelöli az optimális rendszerméretet egy teljes képet is ad a lehetőségekről, ezáltal láthatóvá téve például a megtérülésben okozott eltérést, ha az optimálistól eltérő méretű rendszer kerül megvalósításra.

A szimuláción alapuló méretezés folyamata:

1. Adatbekérés
 - a. A szimuláción alapuló méretezéshez szükség van legalább az elmúlt egy év historikus fogyasztási adatsorára, 15 perces felbontással.
 - b. A pénzügyi kalkulációkhoz szükséges az adott hely energiaszerződésének paraméterei, többek között a szerződött energiaár, mely lehet fix vagy HUPX indexált, a csatlakozás típusa a rendszerhasználati díjak meghatározásához, valamint a lekötött teljesítmény.
2. További szükséges bemeneti adatok:

- a) Az adott helyre vonatkozó besugárzás számításához szükség van az ipari helyszín koordinátái
- b) Napelemmel kapcsolatos gazdasági kalkulációhoz a napelem telepítés bruttó fajlagos költség
- c) Akkumulátorral kapcsolatos gazdasági kalkulációhoz az akkumulátor bruttó fajlagos költség
- d) Nettó jelenérték számításhoz a számítás időhorizontja és a referencia kamatláb

7.1 Műszaki és gazdasági szimuláció

Az első lépés az adott lokációra érvényes várható besugárzás, ezáltal a várható napelemes termelés meghatározása. Ehhez figyelembe kell venni a lokáció koordinátáit és a napelem panelek lehetséges elhelyezését (tájolás, dőlésszög). A besugárzás számításához használható a TMY (tipikus meteorológiai év) adatsor.

A napelemes és akkumulátoros szimulációkhoz szükséges egy akkumulátor modell megalkotása, valamint egy EMS (Energy Management System – Energiamenedzsment rendszer) implementálása. Az EMS felel minden időpillanatban a megtermelt energia célnak megfelelő felhasználásáért. Ez az előre definiált működésnek megfelelően vezérli az akkumulátort és a napelemet (esetlegesen arra alkalmas fogyasztókat) az energia megfelelő módon történő felhasználása érdekében.

7.2 Napelemes rendszer modellje

A szimuláción alapuló méretezéshez szükség van a telepítendő napelemes rendszer várható termelési görbéjének részletes meghatározására. A napelemes rendszer hozama nagy mértékben függ a lokációtól, a beépítési környezettől, ezért olyan modellezési eljárás szükséges, mely minden egyedi paramétert figyelembe tud venni. Ehhez a szimulációk során a PVLIB (Photovoltaic Library) lett használva, mely egy nyílt forráskódú szoftvercsomag, amelyet a napelemes-rendszerek teljesítményének modellezésére, elemzésére és optimalizálására használnak. Ez a modul számos funkciót és modellt kínál a komplett napelemes rendszerek éves hozamgörbéjének előrejelzésére. A PVLIB rendelkezik Matlab és Python környezetben is felhasználható beépülő könyvtárral. A PVLIB használatának előnye, hogy sok előre definiált részletes, paraméterevezhető függvényt/modellt tartalmaz az időjárási adatok feldolgozására, a napelempanelek és inverterek modellezésére.

Egy napelemes rendszer termelési görbéjének meghatározása az alábbiak szerint történik:

1. **Adott lokációra érvényes meteorológiai adatok feldolgozása.** Ehhez a legegyszerűbben az adott helyre vonatkozó tipikus meteorológiai éves (TMY – Typical Meteorological Year) adatsort lehet használni. Ez egy évre vonatkozóan órás felbontással tartalmazza a besugárzási, hőmérséklet, páratartalom, szél és felhőzet adatokat. Ezek és a napelemes rendszer telepítésére vonatkozó adatok (tájolás, dőlésszög) felhasználásával meghatározható a napelem paneleket érő direkt és szórt fajlagos besugárzás.
2. **Napelemes rendszer DC oldali termelési görbéjének meghatározása.** A PVLIB közel 25000 panelra vonatkozó adatbázissal rendelkezik, mely tartalmazza a panelek hőmérsékletfüggő feszültség-áram karakterisztikáit. A rendszerre vonatkozó fajlagos direkt és szórt besugárzás, valamint a hőmérséklet és szél adatok felhasználásával és a választott panel paramétereit megadva kiszámítható a tervezett napelemes rendszer éves, órás felbontású hozamgörbéje.
3. **AC oldali teljesítmény számítása.** Ahhoz, hogy a megtermelt DC áram felhasználható legyen át kell alakítani a hálózattal szinkronban lévő AC áramra. Ehhez az inverter modellezése is szükséges. Itt fontos figyelembe venni az inverter hatásfokát (mely sok esetben teljesítményfüggő), valamint azt is, hogy sok esetben a DC oldal az AC-hoz képest túl van méretezve. Ilyen esetben az AC oldali maximális teljesítményt, mint korlátot is figyelembe kell venni.

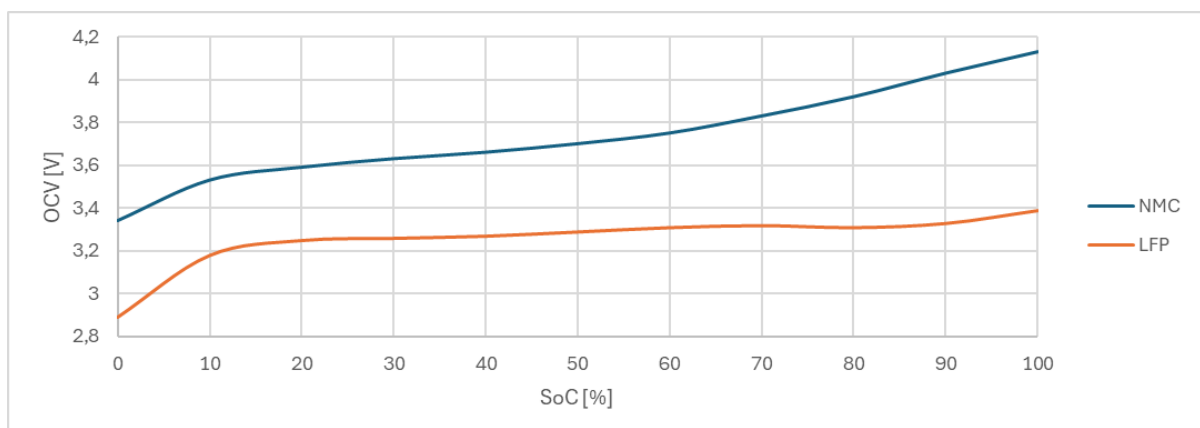
7.3 Energiamenedzsment és akkumulátor modell

Matlab/Simulinkben szimulációs környezetben felépített digital twin modellen futnak le az akkumulátoros szimulációk. A teljes modell fő eleme az akkumulátor modell. A modellezésre több lehetőség is van, melyek közül a megfelelő modellt kell kiválasztani. A modellezés célja az, hogy pontos villamos helyettesítő képet adjon az akkumulátor cellákról. A cellák elektrokémiai végeselemes modellje adja a legnagyobb pontosságot, azonban ezek a modellek nagyon kicsi időlépéssel futnak, ezáltal a szükséges számításai kapacitás és a szimulációs idő egy éves időtartamra vonatkozóan rendkívül nagy lenne, mely a megvalósítani kívánt alkalmazásban nem megfelelő.

Egy másik megközelítés az akkumulátor cellák villamos modellezése a rendszer egyenleteinek matematikai leírásán keresztül. Valós karakterisztikákat/paramétereket használ a cellára vonatkozóan a modell felállításakor, viszont sokkal egyszerűbb, mint a végeselemes megközelítés, így a szimulációs futásidő jelentősen rövidebb. Ezzel már elérhető olyan szimulációs idő, mely egy többesetes rendszer méret optimalizációt éves időtávon lehetővé tesz.

Villamos szempontból történő megközelítés esetén az akkumulátor cella egy vezérelt feszültségforrásnak tekinthető, melynek belső ellenállása (impedanciája) van. Erre azért van szükség, ugyanis egy Lítium-ion cella üresjárású feszültsége a töltöttségi szint függvényében változik. A 18. ábrán két elterjedt típusú lítium-ion cella üresjárású feszültséggörbéje látható a töltöttségi szint függvényében (NMC: Lítium-Nikkel-Mangán-Kobalt; LFP: Lítium-Vas-Foszfát).

18. ábra. NMC és LFP cella jellemző üresjárású feszültségkarakterisztikája a töltöttségi szint függvényében (forrás: adatlap karakterisztikák)



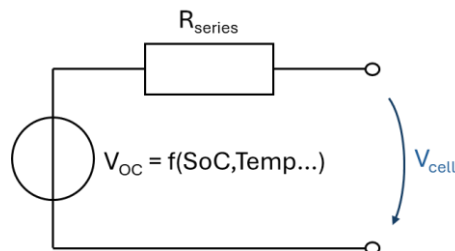
A töltöttségi szint (SoC – State of Charge) az egyik legfontosabb állapotjelző, mely megmutatja, hogy az adott áramterhelés mellett várhatóan mikor csökken nullára a felhasználható kapacitás (mikor fog lemerülni). Értékét jellemzően százalékban vagy 0-1 közötti viszonyzámban van megadva. A modellben az SoC értéke Coulomb-counter módszerrel számítható a (6.1) képlet alapján.

$$SoC(t) = SoC_{init} - \frac{1}{Q_n} \int_0^t i_d(t) dt \quad (6.1)$$

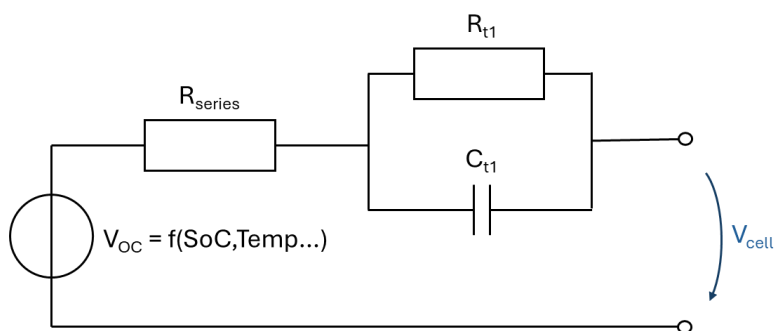
ahol Q_n az akkumulátor cella névleges kapacitása, i_d pedig az akkumulátor cella árama, feltételezve, hogy értéke kisütéskor pozitív, töltéskor negatív.

A belső impedancia modellezésekor azt kell megfontolni, hogy milyen időbeli viselkedést kell a szimulációk során figyelembe venni. A komplexitás szerint növekvő sorrendben van lehetőség, csak a belső ellenállást figyelembe venni (IR modell), vagy az impedanciát különböző időállandójú R-C tagokkal figyelembe venni (OTC - one time constant, vagy TTC – two time constant modellek).

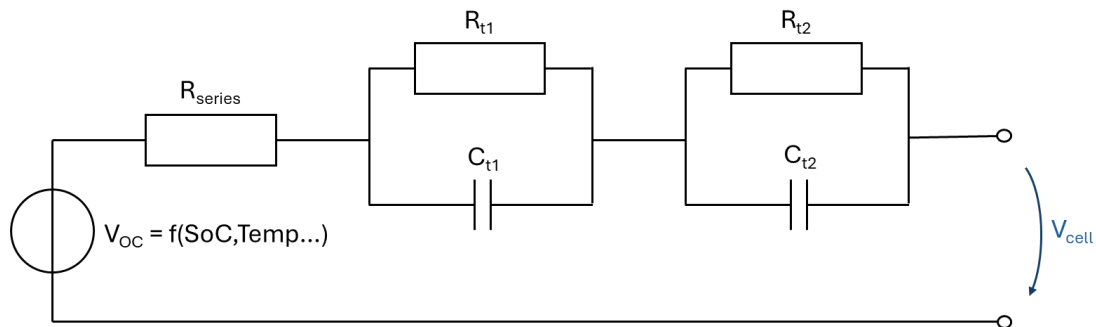
19. ábra. Akkumulátor cella IR modellje
(forrás: Szabó – Gyulai (2016) alapján)



20. ábra. Akkumulátor cella OTC modellje
(forrás: Szabó – Gyulai (2016) alapján)



21. ábra. Akkumulátor cella TTC modellje
(forrás: Szabó – Gyulai (2016) alapján)



Az IR modell a legegyszerűbb, ezzel lehet a leggyorsabb futásidőt elérni, azonban ez nem képes a cella dinamikus viselkedését modellezni. Ebben az esetben egy egységugrás áramterhelésre a modellben a cella kapocsfeszültségében szintén egy egységugrás tapasztalható, ami a valóságban azonban nem áll fenn.

Ha a gyors tranziensek hatásának figyelembevétele is fontos, abban az esetben az OTC, ha a gyors és lassú tranzienseket is szeretnénk modellezni akkor a TTC modell használata szükséges. Ezekben a modellekben az impedancia egy alap R és egy vagy kettő vele sorba kötött R-C tagból áll. Az R-C tagok időállandóján keresztül a pontos dinamikus viselkedés megfelelően behangolható, és egységugrás jellegű terhelésváltozás esetén a kapocsfeszültségben nem fog ugrás jelentkezni.

A modell kiválasztásánál a legfontosabb szempont, hogy mire vonatkozóan szeretnénk eredményeket kapni. Egy évre vonatkozóan, a teljes napelemes és akkumulátoros rendszerre vonatkozó energetikai és pénzügyi számításokra megfelelő választás lehet az egyszerűbb IR modell is. Azonban, ha az akkumulátor degradációját, a degradációval járó kapacitás csökkenést és belső ellenállás változást és ezek hatásának figyelembevétele is fontos, akkor egy komplexebb modell választása szükséges. A modell felépítéséhez és a szimulációkhoz a TTC villamos helyettesítő kép lett használva. (Szabó – Gyulai (2016))

A modell paraméterei méréseken, adatlapi karakterisztikákon alapulnak, hogy kellő pontossággal írja le az akkumulátor viselkedését/degradációját.

A modell fő paraméterei:

- Üresjárási feszültség a töltöttségi szint függvényében (OCV vs. SoC) (Open circuit voltage vs. State of Charge)
- Belső ellenállás a töltöttségi szint függvényében (IR vs. SoC) (Internal resistance vs. State of Charge)
- Látszólagos kapacitás a töltési/kisütési áram függvényében (Capacity vs. C-rate) (C-rate: az akkumulátor cella névleges kapacitásához hasonlítva adja meg a töltési/kisütési áramot; 94Ah cella esetén 1C kisütés 94A-rel történő kisütést jelent; 0,5C 47A-t jelent)
- Komplexebb modell esetén a belső impedancia használatához az R-C időállandók meghatározása (OTC vagy a TTC modell).
- Lehetőség van a hőmérsékletfüggés figyelembevételére is, bár jelen alkalmazási környezetben, ahol az akkumulátorok temperálva vannak, ez elhagyható.
- Az akkumulátorok használat közben degradálódnak. Ez két paraméterre van jelentős hatással. A használat során a látszólagos kapacitás folyamatosan csökken, a belső ellenállás, ezáltal a belső veszteségek nőnek. Általában a gyártók az end of life kapacitást, azaz az akkumulátor élettartamának végét a látszólagos kapacitásnak a névleges kapacitás 70%-ra csökkenésével határozzák meg. A modell mind a két hatást figyelembe veszi.

A modellben az EMS logika határozza meg a rendszer működésének célját. Ez tartalmazza az energiaszabályozás mindenkoros irányának meghatározásához szolgáló döntési algoritmus egyenleteit. Ez a 6. fejezetben ismertetett alkalmazási lehetőségek alapján minden egyes esetben más.

7.4 Műszaki és gazdasági kimenetek

Az egyes felhasználási módokhoz tartoznak egyedi kimenetek is, melyek az adott működtetésre, piaci részvételre vonatkoznak, de ezeken kívül vannak olyan általános műszaki és gazdasági mérőszámok, melyeket minden esetre ki lehet számolni, így az összehasonlíthatóságukat lehetővé teszi.

- 1) **Akkumulátor élettartam és éves ciklusszám:** A szimulációk során az éves ekvivalens ciklusszám kerül kiszámolásra. Mivel az akkumulátorok sosem úgy vannak használva, hogy teljesen feltöltődnek majd lemerülnek, ezért szükséges az ekvivalens ciklusszámlálás. Ez lényegében az akkumulátorba beáramlott és az akkumulátorból kivett energiamennyiségek számolásán alapul. Ez alapján és a gyártói ciklusszámgaranciák alapján számolható az adott igénybevételnek megfelelő várható élettartam.
- 2) **Villamosenergia megtakarítás:** Ez mutatja meg az éves villamosenergia megtakarítást az adott rendszerkombinációra vonatkozóan a beruházás előtti állapothoz képest. Százalékban és forintban is megadható.
- 3) **Vissz-watt veszteség:** A napelemes rendszer által megtermelt fel nem használt energia aránya a teljes megtermelt energiához képest. Ez az az energiamennyiség, amit se nem önfogyasztásra, se nem az akkumulátorban eltárolásra nem lehet felhasználni. Mivel vissz-wattos rendszernél a hálózatra nem lehet visszatáplálni ez veszteségként jelentkezik.
- 4) **Éves megtermelt napenergia:** Az adott méretű PV rendszer által egy év alatt megtermelt teljes energiamennyiség.
- 5) **Akkumulátor által szolgáltatott energia:** Egy év alatt az akkumulátor által szolgáltatott energia (csak az az energiamennyiség, ami az akkumulátorból kiáramlik fogyasztáscsökkentésre).
- 6) **Teljes beruházási költség:** A napelemes rendszer és az akkumulátor teljes bruttó beruházási költsége.
- 7) **Nettó jelenérték (NPV) és belső megtérülési ráta (IRR):** A nettó jelenérték (NPV) a legfontosabb pénzügyi mutató. Pénzügyi szempontból a nettó jelenérték maximuma

jelenti az optimális rendszerméretet. A belső megtérülési ráta (IRR) meghatározása során azt a diszkontrátát keressük, amellyel az adott időtávra számolva a nettó jelenérték nulla.

- 8) **Statikus/dinamikus fedezeti pont:** A statikus fedezeti pont számítás során a rendszer által elért éves villamosenergia költségmegtakarítást, mint pozitív cash-flowt és a teljes beruházási költséget használjuk fel. Kiszámítható, hogy az éves megtakarítással hány év alatt térül meg a teljes beruházás. A dinamikus fedezeti pont számítás szintén a nettó jelenérték számításhoz kapcsolódik. A dinamikus fedezeti pont az az év, amikor az adott diszkontráta mellett a nettó jelenérték zérus.
- 9) **LCOE – Levelized Cost of Energy:** Élettartamra/Időtartamra vetített fajlagos energiaköltség. Megmutatja, hogy a rendszer az adott időtáv alatt fajlagosan milyen áron szolgáltatja a villamos energiát. Közvetlenül felhasználható összehasonlításra a szerződött energiaárral, ha ez alacsonyabb, akkor a beruházás megéri.

A részletes elemzés és szimulációk alapján kialakítható a pontos pénzügyi terv. Ez magában foglalja az energiatermelés becslését, önfogyasztási arányokat, és a lehetséges villamosenergia-költség megtakarításokat.

A szimulációs eljárás előnyei:

- **Energiahatékonyság:** Az átfogó kiértékelés és szimulációk révén maximalizálható az energiatermelést és optimalizálható a rendszer teljesítménye.
- **Költségmegtakarítás:** A részletes pénzügyi terv segít az energiaköltség megtakarításainak pontos felmérésében.
- **Hosszú távú megtérülés:** A pontos elemzés és tervezés segít elkerülni a felesleges költségeket, biztosítva a beruházás hosszú távú megtérülését.

8. ESETTANULMÁNY

8.1 Ipari példa

Az esettanulmány során egy ipari helyszín egy éves fogyasztási adatai lettek felhasználva a módszertan bemutatására. Az ipari telephely Pest megyében található, az éves fogyasztása ~ 1,2 millió kWh. A csatlakozás típusa KÖF/KIF III. Az energiaszerződés alapján az energiaár fix, 75 HUF/kWh. A visszatáplálás nem engedélyezett, így csak saját célra termelő napelemes és akkumulátoros rendszert lehet telepíteni.

Az kiértékelés két fő fázisból áll. Első lépés a fogyasztási adatok és a villamos energia beszerzésére vonatkozó szerződések kiértékelése. Az egy évre vonatkozó 15 perces fogyasztási adatokból megismerhető a helyszín fogyasztási szokása, következtetéseket lehet levonni a napon és héten belüli fogyasztási szokásokról, többek között, hogy van-e több műszakos munkavégzés, hétvégén van-e termelés. Illetve napon belül mikor jelentkeznek a fogyasztási csúcsok. Ezek mind hatással vannak a napelem által termelt energia felhasználható mennyiségére, ezáltal az energiahatékonyságot célzó beruházás gazdaságosságára és végső soron a megtérülésre. Ebből már következtetéseket lehet levonni arra vonatkozóan is, hogy napelemes rendszer telepítése esetén szükség lehet-e akkumulátorra. Ha napon belül a fogyasztási csúcs nem esik egybe a napelemes rendszer csúcstermelésével, vagy például hétvégén jelentősen alacsonyabb a fogyasztás, mint hétközben, ezek mind az akkumulátor telepítésének szükségességét indokolják. Az energiaszerződésben rögzített lekötött teljesítmény és a maximum vételezési teljesítmény alapján vizsgálható, hogy milyen mozgástér van a lekötés optimalizálására.



A második lépésben több napelemes és akkumulátoros rendszerméretet, valamint önfogyasztás optimalizálást, peak-shaving-et és aFRR szolgáltatás nyújtást vizsgálva meghatározható az egyes alkalmazásokban lévő potenciál, ezáltal javaslat adható az optimális rendszerméretre és működtetésre vonatkozóan.

A szimulációkhoz használt bemeneti adatok:

- 1) Napelemes rendszer fajlagos bruttó telepítési költsége: 350 000 HUF/kWp (tartalmazza a panelek, tartószerkezet, inverterek, kábelezés és telepítés minden felmerülő költségét)

- 2) A választott akkumulátorok egy adott gyártó portfóliójából származó valós termékek. Technológiája lítium-vasfoszfát (LiFePo4). A mérettől függően a bruttó fajlagos árak a 320-400 Euró/kWh tartományban mozognak (tartalmazza a tárolószekrényt/konténert, invertert, kábelezés és telepítés minden felmerülő költségét).
- 3) Pénzügyi számítások során használt bemeneti paraméterek:
 - a) Referencia kamatláb nettó jelenérték és LCOE számításhoz: 6%
 - b) Nettó jelenérték és LCOE időhorizontja: 15 év
 - c) EUR/HUF árfolyam: 400 HUF/EUR
- 4) Telepítésre vonatkozó körülmények:
 - a) Telepítési helyszín (az esettanulmányban nem valós ipari létesítmény) Budapest (erre vonatkozó tipikus meteorológiai adatsor lett felhasználva)
 - b) Napelemes rendszer tájolása: a példában ideális déli tájolás és 35°-os panel dőlésszög
 - c) DC:AC arány: 120%
- 5) Fogyasztási helyre vonatkozó adatok
 - a) Ipari fogyasztó historikus fogyasztási adatsora 15 perces felbontással, 1 évre vonatkozóan (2022)
 - b) Energiaszerződés adatai:
 - i) csatlakozás típusa: KÖF/KIF III
 - ii) Villamosenergia ára: fix 75 HUF/kWh
- 6) Piaci környezettel kapcsolatos adatok
 - a) aFRR kapacitás és energia historikus adatsorok: 2023.06. – 2023.12.

KIINDULÓ ÁLLAPOT

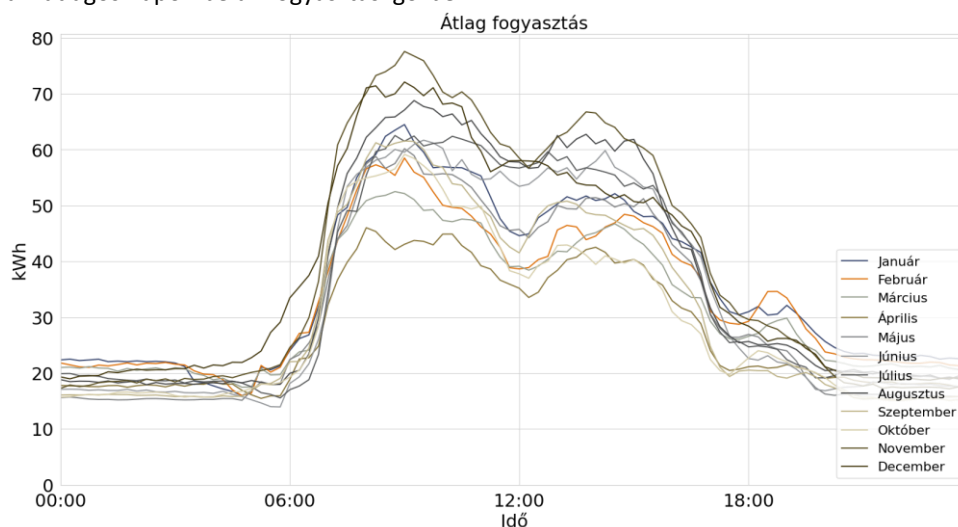
Mértékadó éves fogyasztás	1 170 336 kWh/Év
95,85 HUF/kWh bruttó energiaárral számolva	112,18 millió HUF/év
 Munkanapokon az átlag teljesítményfelvétel	164,32 kW
 Hétfvégén az átlag teljesítményfelvétel	57,56 kW

8.2 Fogyasztási adatok kiértékelése

8.2.1 HAVI FOGYASZTÁSI ADATOK ELEMZÉSE

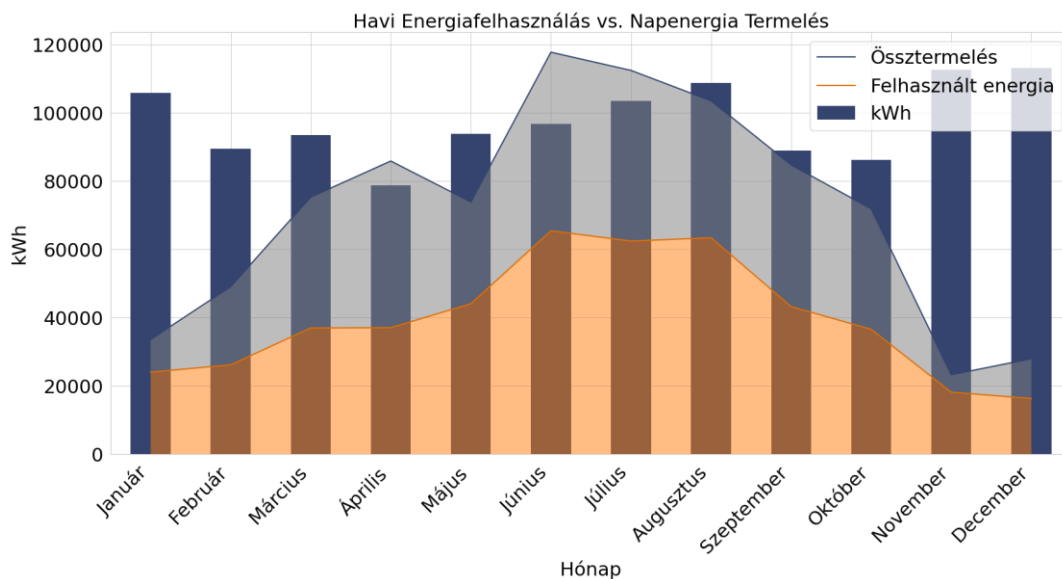
A havi fogyasztási adatok elemzéséből információ nyerhető az éves szezonálisra vonatkozóan. Jellemzően melyik évszakban/hónapokban magasabb a fogyasztás és ez milyen viszonyban van az éves napelemes hozamgörbével.

22. ábra. Havi átlagos napon belüli fogyasztási görbe



A napon belüli fogyasztás az egész év során jellegre megegyezik. Ugyanazokban az időpontokban jelentkeznek havi szinten a fogyasztási csúcsok.

23. ábra. Egy 700 kWp-es rendszer által termelt energia integrálhatósága a fogyasztásba havi szinten

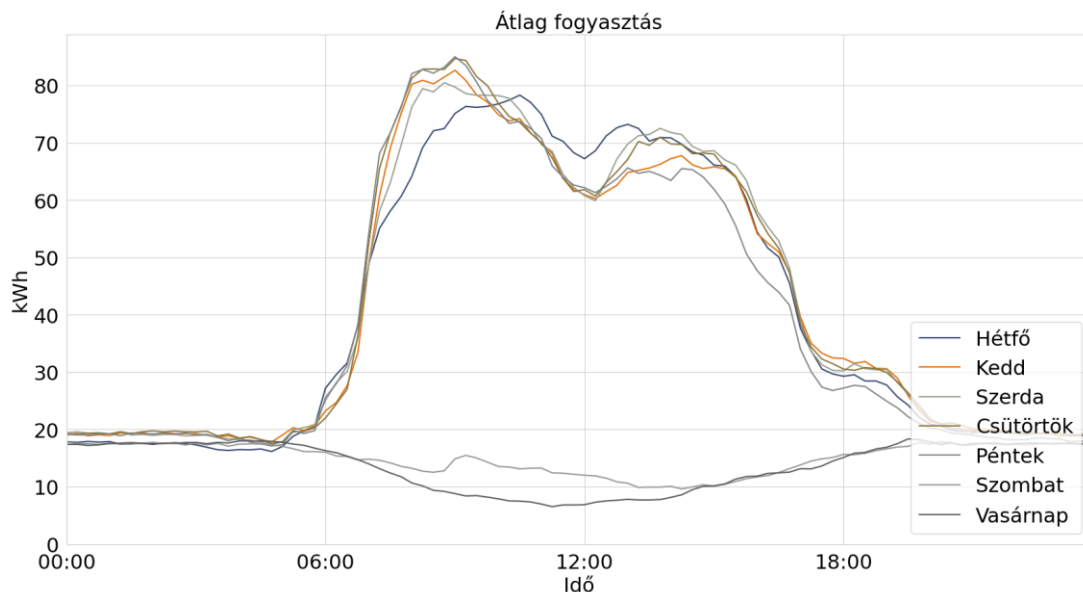


A diagramok alapján megállapítható, hogy a téli és a nyári hónapokban nagyobb fogyasztás jellemző, míg tavasszal és ősszel alacsonyabb. A nyári magas fogyasztás mindenképpen kedvező egy napelemes rendszer szempontjából.

8.2.2 HETI FOGYASZTÁSI ADATOK ELEMZÉSE

A heti adatok elemzése során vizsgálható a fogyasztás értékének napok közötti eltérése, azaz, hogy vannak-e olyan napok, ahol az átlagfogyasztáshoz képest jelentős mértékben eltér akár pozitív vagy negatív irányba (pl. hétfői leállás). A másik fontos szempont az adott nap fogyasztásának szórása, azaz a napi fogyasztási értékek átlagosan mennyivel térnek el az átlagtól, valamint a napon belüli fogyasztás eloszlása (jellemzően a műszakok száma).

24. ábra. Napi átlagfogyasztási görbék a hét különböző napjain



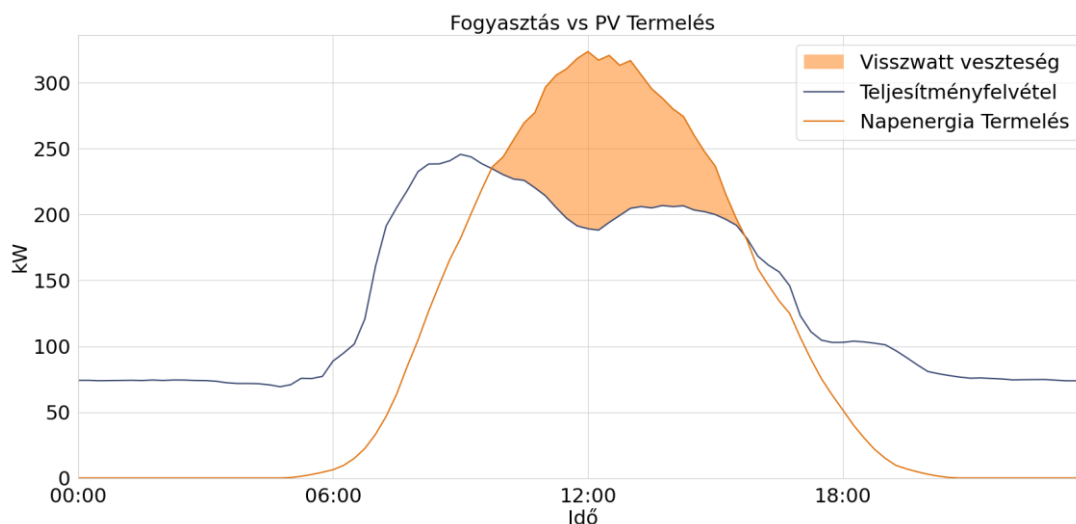
Megállapítható, hogy:

- A hét napjai között egyenetlen fogyasztás figyelhető meg. Hétfégén a fogyasztás jelentősen alacsonyabb, mint hétköznap.
- Munkanapokon éjjel jellemzően zsinórfogyasztás van. Reggel 6 óra és este 19 óra között a fogyasztás jelentősen megnő, jellemző egy reggeli és egy koradélutáni csúcs.

8.2.3 NAPON BELÜLI ADATOK ELEMZÉSE

A napon belüli adatok elemzése során vizsgálható, hogy a fogyasztás jellege mennyire követi a napenergia termelés jellemző karakterisztikáját. Akkor illeszkedik jól, ha a fogyasztás dél körül a legmagasabb, de a napsütéses órákon kívül alacsony. Nagyobb eltérés esetén akkumulátor nélkül nem lesz hatékony a rendszer működése. A másik vizsgálati szempont, hogy vannak-e kiugróan magas csúcsok a fogyasztásban.

25. ábra. Napon belüli átlagos fogyasztási görbe és a napelemes termelési görbe viszonya

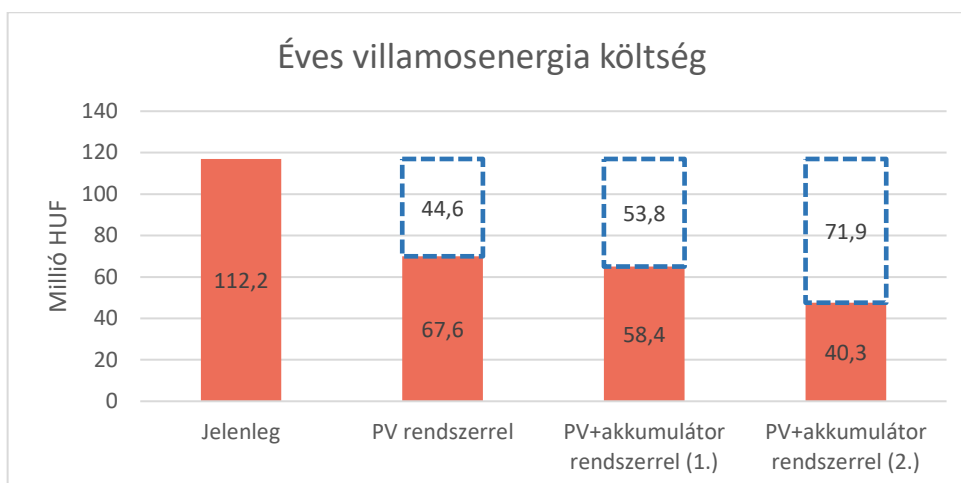


Az ábra alapján megállapítható, hogy a fogyasztási profil alapvetően jól illeszkedik a napelemes termelés jelleggörbéjéhez (napközben magasabb a fogyasztás), a PV termelés nagy része integrálható a fogyasztásba, így a megtermelt energia jelentős részét azonnal fel tudja használni a fogyasztó. Megfigyelhető azonban, hogy ennek ellenére a PV termelés maximuma nem esik egybe a fogyasztás maximumával, sőt pont a déli órákban a fogyasztás kisebb mértékben csökken is. A legnagyobb jellemző csúcs a fogyasztásban 09:15 körül található, melynek nagysága 61.2 kWh (ami 244.8 kW teljesítményfelvételnek felel meg). A teljes vizsgált időszak tekintetében a legnagyobb fogyasztás december 14. reggel nyolc körül található, melynek értéke 147.4 kWh (ami 589.6 kW teljesítményfelvételnek felel meg). A napon belüli második jellemző fogyasztási csúcs pedig délután kettő körül figyelhető meg.

8.3 Önfogyasztás optimalizálás napelemes és akkumulátoros rendszerrel

A szimulációk során összesen 120 napelemes és akkumulátoros rendszer kombináció lett vizsgálva a korábban ismertetett módszertanok szerint. Az eredmények alapján három megvalósításra javasolt rendszer lett kiválasztva (előre definiált súlyozott célfüggvények alapján) elsődlegesen nettó jelenérték és megtérülési idő szerint.

26. ábra. Éves villamosenergia-költségek és a várható megtakarítás alakulása



A megjelölt optimális rendszerek az alábbi paraméterekkel rendelkeznek:

2. táblázat. Önfogyasztás optimalizálás esetére javasolt optimális rendszerméretek

Optimális rendszerméret				
	Csak napelem	Napelem + akkumulátor (1)	Napelem + akkumulátor (2)	
Napelemes rendszer teljesítménye	700	600	800	kWp
Akkumulátor kapacitása	-	473	1161	kWh
Akkumulátor névleges teljesítménye	-	150	450	kW
Villamosenergia-megtakarítás	39,8	<u>45,9</u>	61,1	%
Villamosenergia-megtakarítás	44,6	53,8	71,9	millió Ft/év
Éves töltési/kisütési ciklusok száma	-	204	189	db
Megtermelt napenergia	826,4	708,4	944,3	MWh/év
Akkumulátor által szolgáltatott energia	-	98,2	223,9	MWh/év
Nettó jelenérték (15 év, 6%)	401,3	465,6	565,2	millió Ft
Vissz-watt veszteség	42,9	24,1	24,4	%
Teljes beruházási költség	255	270,5	428,6	millió Ft

Statikus fedezeti pont	5,2	5	6	év
Belső megtérülési ráta (% , 15 év alatt)	20,2	21	17,8	%
LCOE	54	51,8	61,8	Ft/kWh

Az optimális rendszerhez tartozó műszaki és gazdasági paraméterek mellett a teljes vizsgált tartomány eredményei is rendelkezésre állnak. Ez a legérthetőbb módon úgynevezett hőtésképf formátumban jeleníthető meg könnyen, ahol a színek jelzik az adott mérőszámok esetén a kombinációk jóságát. Zöld jelöli az optimális tartományt, a piros a kerülendő (ezek általában a mérőszámtól függően pénzügyi vagy műszaki szempontból rossz választásnak számítanak). A táblázatok alapján könnyen vizsgálható az is, hogyha az ajánlott optimális mérettől valamilyen ok miatt el kell térni (például nem áll rendelkezésre megfelelő terület a napelemekhez), akkor milyen irányban érdemes elmozdulni, és a változásnak milyen hatása lesz a gazdaságosságra.

Egy példában a nettó jelenértékhez tartozó táblázat kerül bemutatásra, a többi mérőszámhoz tartozó táblázat a 10. fejezetben, mellékletként található.

A táblázat felépítése:

- Vízszintes tengely mentén a napelemes rendszer mérete látható kWp-ben
- A függőleges tengely mentén az akkumulátor méretek (termék, kWh, kW)
- Az adott PV és akkumulátor méret metszetében található cella az adott mérőszámhoz tartozó értéket tartalmazza (nettó jelenérték esetén a nettó jelenértéket millió HUF-ban)

A 26-os ábrán látható, hogy nettó jelenérték szempontjából van egy optimális rendszerméret tartomány. Akkumulátor választása esetén azonban érdemes vizsgálni, hogy az akkumulátor hozzáadásával milyen járulékos nettó jelenérték többletet lehet elérni. Ez a legjobban a 27-es ábrán figyelhető meg, ahol az akkumulátor hozzáadásával elért addicionális nettó jelenérték van megjelenítve. Amennyiben a hozzáadott érték negatív, az azt jelenti, hogy az akkumulátor csökkenti a projekt összértékét. Az ábrákon feltüntetett értékek millió HUF-ban értendők, 15 évre és 6% diszkontrátára vonatkoznak.

27. ábra. Beruházások nettó jelenértéke

Napelem teljesítmény [kWp]		200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
Akkumulátor nélküli esetben		196,5	336,7	400,3	402,9	379,3	342,8	298,7	249,7	197,2	142
287 kWh	120 kW	186,7	352,5	385,4	316,1	258,3	199,5	138,3	75,7	11,3	-53,5
473 kWh	150 kW	178,8	354,4	465,6	373,7	313,6	253,3	192,2	129,6	65,5	0,7
630 kWh	240 kW	163,2	346,7	483,6	415,4	351,8	291,8	230,4	168,5	104,9	40,6
860 kWh	300 kW	142,9	337,1	490,9	500,4	431,5	371,5	310,9	248,9	186,5	122,5
946 kWh	300 kW	132,3	330	487,4	529,9	459,2	397,8	337,3	275,8	213,4	150,1
1161 kWh	450 kW	106,1	312,5	474,9	565,2	533,7	471,4	413	352,8	291,1	228,8
1290 kWh	630 kW	90,2	301,8	465,9	561,4	583,5	521,3	462,7	403,1	342,7	280,7
1419 kWh	450 kW	74,1	290,5	456,4	554,9	579,1	569,2	512,3	453,1	393	331
1548 kWh	600 kW	57,7	278,2	446,2	546,7	571,7	562,7	535,9	498	441,3	380,1
1720 kWh	600 kW	36,5	262,2	433,7	535,7	561,9	553,8	529,5	492,3	447,3	398,1
1935 kWh	750 kW	8,5	239	414,8	517,9	544,9	537,4	514,7	478,2	433,5	383,7
2150 kWh	750 kW	-18	217,2	398,5	502,4	529,9	522,9	500,1	465	420,5	370,3

28. ábra. Akkumulátor hozzáadott nettó jelenértéke

Napelem teljesítmény [kWp]		200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
Akkumulátor nélküli esetben		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
287 kWh	120 kW	-9,8	15,8	-14,9	-86,8	-121	-143,3	-160,4	-174	-185,9	-195,5
473 kWh	150 kW	-17,7	17,7	65,3	-29,2	-65,7	-89,5	-106,5	-120,1	-131,7	-141,3
630 kWh	240 kW	-33,3	10	83,3	12,5	-27,5	-51	-68,3	-81,2	-92,3	-101,4
860 kWh	300 kW	-53,6	0,4	90,6	97,5	52,2	28,7	12,2	-0,8	-10,7	-19,5
946 kWh	300 kW	-64,2	-6,7	87,1	127	79,9	55	38,6	26,1	16,2	8,1
1161 kWh	450 kW	-90,4	-24,2	74,6	162,3	154,4	128,6	114,3	103,1	93,9	86,8
1290 kWh	630 kW	-106,3	-34,9	65,6	158,5	204,2	178,5	164	153,4	145,5	138,7
1419 kWh	450 kW	-122,4	-46,2	56,1	152	199,8	226,4	213,6	203,4	195,8	189
1548 kWh	600 kW	-138,8	-58,5	45,9	143,8	192,4	219,9	237,2	248,3	244,1	238,1
1720 kWh	600 kW	-160	-74,5	33,4	132,8	182,6	211	230,8	242,6	250,1	256,1
1935 kWh	750 kW	-188	-97,7	14,5	115	165,6	194,6	216	228,5	236,3	241,7
2150 kWh	750 kW	-214,5	-119,5	-1,8	99,5	150,6	180,1	201,4	215,3	223,3	228,3

A további mérőszámokhoz tartozó részletes eredmények a Melléklet 14.1-es fejezetében láthatóak.

8.4 Önfogyasztás optimalizálás és peak-shaving napelemes és akkumulátoros rendszerrel

A fogyasztási adatokból kiderül, hogy a legnagyobb teljesítményfelvétel az év során 590 kW. A biztonság felé eltolva egy 600kW -os vételezési teljesítménylekötés esetén az éves lekötési díj: $600 \text{ kW} \times 16\,608 \text{ HUF/kW/év} = 9\,964\,800 \text{ HUF}$. Ez tekinthető bázisnak a peak-shaving megvalósítása szempontjából. Ez a 112 millió forintos éves villamosenergiaköltséggel és az önfogyasztás optimalizálással elérhető megtakarításokkal szemben jelentősen kisebb, így az akkumulátort nem érdemes önmagában csak a teljesítménylekötés csökkentése érdekében peak-shaving üzemmódban használni. (Ez a magyarországi jelenlegi szabályozási környezetben igaz, külföldön, ahol más szabályok mentén kell rendszerhasználati díjat fizetni önmagában is megfelelő használati mód lehet.)

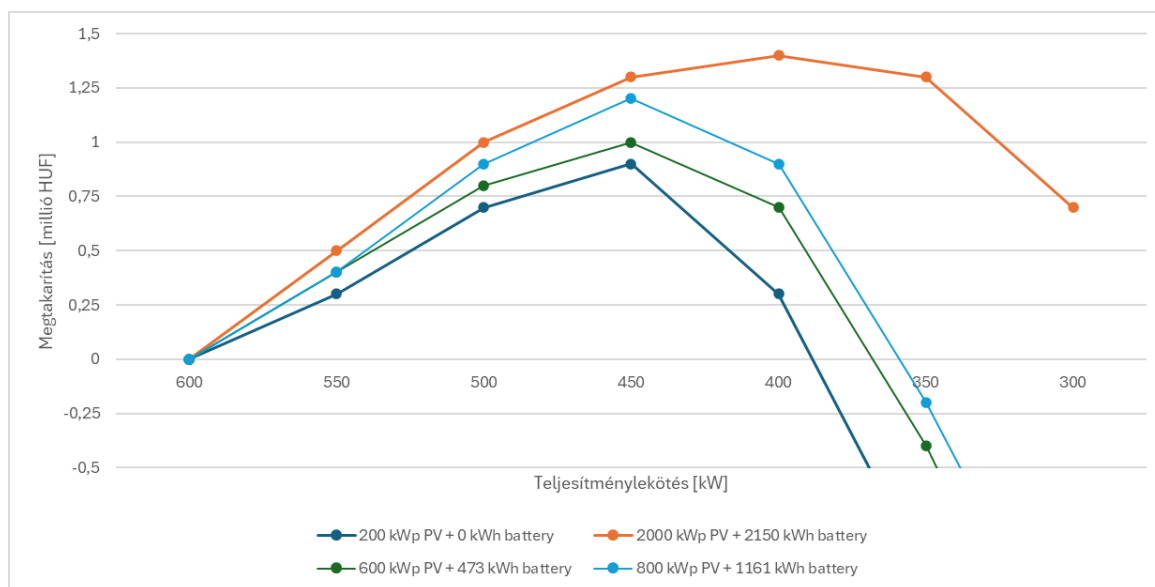
A szimulációs modell felépítése során ebből kifolyólag egy kombinált működési modell került implementálásra. Ennek a lényege, hogy alapvetően a hálózati fogyasztás minél nagyobb arányú csökkentésére használjuk a napelemes és az akkumulátoros rendszert, azonban a várható fogyasztás ismeretében az akkumulátorban lévő energiát időben kissé eltolva (amikor a nagy fogyasztású időszakok vannak) integráljuk a fogyasztásba. Természetesen előfordulhat, hogy egy csökkentett lekötött teljesítményszintet így is meghalad a hálózati vételezés, amiért az adott hónapban az ismertett szabályok szerint pótdíjat kell fizetni.

Az önfogyasztás optimalizáció során már bemutatott szimulációs esetek mellé egy újabb dimenzió jött be a lekötött teljesítmény értéke által. Diszkrét lépésekben 600kW-tól 50kW-onként csökkentve a lekötött teljesítmény egészen 300kW-ig, így összesen 7×120 eset került a szimulációk során vizsgálatra. Ugyanolyan hőtérképek vannak ebben az alkalmazásban is, mint az előzőben, viszont bejött egy újabb mérőszám, ami az adott szimulációs esetben a lekötés és a büntetések éves díja, illetve a bázis 600kW-os teljesítménylekötéshez képest elérhető megtakarítás. A következőkben ismertetett eredmények az önfogyasztás optimalizáláson felüli (a 8.3-as fejezetben ismertetett eredmények) további megtakarítást jelent.

Az összes szimulációs eset eredményei a 29. ábrán vannak összefoglalva. Minden egyes lekötési értékhez tartozó 120 napelemes és akkumulátoros rendszer esetén a minimum megtakarítás a 200 kWp PV + 0kWh akkumulátor esetén jelentkezik, míg a maximum elérhető

megtakarítás a 2000 kWp PV + 2150 kWh akkumulátor esetén van. Ezért elsődlegesen ehhez a két rendszerhez tartozó megtakarítási értékek lettek ábrázolva, minden más rendszer méret esetén a minimum és a maximum által kijelölt tartományon belülre esik. (Értelemszerűen vannak negatív értékek is, ez annyit jelent, hogy ezzel a kombinációval összességében többet kell fizetni, elsősorban a büntetési tételek miatt, mintha a 600kW lenne lekötve). Ezen kívül feltüntetésre került az önfogyasztás optimalizálás esetén (8.3 fejezet) javasolt két napelem + akkumulátor rendszer esetén is az elérhető plusz megtakarítási értékek.

29. ábra. Peak-shavinggel addicionálisan elérhető megtakarítás



A maximális elérhető megtakarítás 1,4 millió forint, viszont ez olyan méretű rendszer esetén jelentkezik, ami az önfogyasztás optimalizálást is figyelembe véve pénzügyileg már nem éri meg. A diagram alapján a 8.3 fejezetben javasolt két rendszerrel elérhető maximális éves megtakarítás a lekötött teljesítmény optimalizálásával 600kW helyett 450kW lekötött teljesítmény esetén érhető el.

- 1) 600 kWp PV + 473 kWh akkumulátor esetén elérhető megtakarítás: 1 millió HUF/év
- 2) 800 kWp PV + 1161 kWh akkumulátor esetén elérhető megtakarítás: 1,2 millió HUF/év

8.5 aFRR szolgáltatás nyújtásban lévő potenciál

Az aFRR kiegyenlítő szolgáltatásban való részvétel és az ezzel elérhető bevételek számításához egy komplexebb szimulációs módszertan felépítése szükséges. Elsősorban a kiegyenlítő piacra vonatkozó historikus adatok felhasználásával egy „mi lett volna ha” típusú elemzés készíthető. Ennek a lényege, hogy a MAVIR által publikált FEL és LE irányba is beadott kapacitás és energia ajánlatokból a MOL listák rekonstruálhatók, és a szintén historikusan elérhető ténylegesen lekötött kapacitás és behívott energia adatok és a MOL listák segítségével megkapható, hogy melyik ajánlatok lettek befogadva és ezáltal kifizetve. A szimulációk során előre meg lett határozva egy kereskedési és működési logika által, hogy milyen időszakokban mekkora kapacitással és energiával tudna az aggregátor az ipari fogyasztó egységeit felhasználva aFRR szolgáltatásban részt venni, és az árazási stratégia mentén ezek az ajánlatok be lettek illesztve a MOL listákba. Ezután a valóban lekötött kapacitás és behívott energia alapján a MOL lista szerint kiderül, hogy az adott ajánlat elfogadásra került-e volna.

Az elmúlt időszakban a kiegyenlítő szolgáltatások piaca is eléggé volatilis volt, így a historikus adatok felhasználása során a vizsgálni kívánt időszakot megfelelő körültekintéssel kell kiválasztani. Ebből a megfontolásból a 2023. június – 2023. novemberi időszak lett kiválasztva, és egy évre átskálázva. Ez a 2022-es magas árkörnyezet után már a kiegyenlítőpiacon is egy nyugodtabb időszak volt. Minden felhasznált historikus adat a MAVIR és az ENTSO-E adatpublikációs oldalakról származnak.

- Kapacitás LE és FEL irány beadott ajánlatok és mennyiségek -> A MOL lista rekonstruálásához
- Energia LE és FEL irány beadott ajánlatok és mennyiségek -> A MOL lista rekonstruálásához
- MAVIR által lekötött kapacitás órás felbontásban
- MAVIR által behívott energia negyedórás felbontásban

Többféle módon is megvalósítható az aFRR szolgáltatás-nyújtásban való részvétel, jelen dolgozatomban az alábbi két féle lehetőséget vizsgáltam:

1. Egy szabályozható fogyasztó szabályozható tartományát felhasználva (mind a FEL és mind a LE irányú utasítás egy fogyasztó teljesítményének csökkentésével vagy növelésével van teljesítve)
2. Napelemes és akkumulátoros rendszer többlet rugalmasságát kihasználva

8.5.1 SZABÁLYOZHATÓ FOGYASZTÓ

Ebben az esetben csak egy szabályozható fogyasztó szabályozási képessége lett figyelembe véve. Az esettanulmányban használt ipari fogyasztó esetén az lett feltételezve, hogy a telephelyen található egy 150 kW-os fogyasztó, melynek a teljesítménye bizonyos időszakokban 100 kW-os tartományban változtatható.

Még ebben az esetben is, amikor csak egy fogyasztó teljesítményének változtatása révén történik részvétel az aFRR szabályozásban egy elég komplex modellt kell felállítani. A konkrét elérhető bevétel elég nagy tartományban mozog, ezért általános következtetéseket levonni az eredményekből nem lehet. A pontos üzemeltetési és kereskedési logika minden esetben egyedi megoldást jelent, ami az adott körülmények mellett lesz csak érvényes. Az elkészült modell továbbfejlesztése, komplexebb ajánlatadási logikák fejlesztését és tesztelését is lehetővé teszi.

Ebben a példában egy egyszerű logika mentén vezérelt ajánlatadást valósítottam meg. Az egyszerűség kedvéért azt feltételeztem, hogy minden nap egy adott kétórás időszámban (például 9-11 óra között) lehet szabadon rendelkezni a 100 kW-os szabályozható tartománnyal, ezáltal ekkor vehet részt kiegyenlítő szabályozásban. Erre az időtartamra mindig lett beadva kapacitás- és energiaajánlat is egy előre meghatározott árazási logika mentén. Külön lett vizsgálva, a FEL és a LE irány, azaz az első esetben ebben az időszámban a fogyasztó maximális teljesítményfelvételre van menetrendezve és a kiegyenlítőpiacon FEL irányú kapacitás-és energiaajánlatok vannak beadva (a fogyasztó így 100kW-al kisebb teljesítményre állítható behívás esetén), LE irányú szabályozás esetén a fogyasztó 50 kW-os teljesítményfelvételre van menetrendezve, és ezzel összhangban vannak beadva az ajánlatok (a fogyasztó 100 kW-al nagyobb teljesítményre állítható behívás esetén).

A napon belüli kétórás időszávot változtatva egy tartomány rajzolódik ki, mely azt jelenti, hogy ezek mellett a feltételek mellett milyen bevételekre tehet szert az aggregátor az ipari telephely fogyasztójának bevonásával az aFRR szolgáltatásba. Az ipari fogyasztó részesedése ebből az aggregátorral kötött szerződéstől függ.

3. táblázat. Szabályozható fogyasztóval elérhető pénzügyi eredmények aFRR LE irány esetén

LE irány	Kétórás stratégia minimuma	Kétórás stratégia maximuma
Kapacitás [millió HUF]	1,53	2,09
Energia [millió HUF]	0,75	2,46
Összesen [millió HUF]	2,28	4,55

4. táblázat. Szabályozható fogyasztóval elérhető pénzügyi eredmények aFRR FEL irány esetén

FEL irány	Kétórás stratégia minimuma	Kétórás stratégia maximuma
Kapacitás [millió HUF]	0,5	0,96
Energia [millió HUF]	1,08	8,57
Összesen [millió HUF]	1,58	9,53

A kapott eredményekből is látszik, hogy az ajánlatadási és üzemeltetési stratégia megválasztása nagyon fontos szempont a legnagyobb bevételek elérése érdekében az aFRR piacon.

8.5.2 VISSZ-WATTOS NAPELEMES ÉS AKKUMULÁTOROS RENDSZER

A szimulációk komplexitása és az ebből következő nagyságrendekkel hosszabb szimulációs futási idők miatt csak a 8.3-as fejezetben javasolt két optimális napelem + akkumulátor rendszerek esetén lettek a szimulációs modellek lefuttatva.

- 1) 600 kWp PV + 473 kWh akkumulátor
- 2) 800 kWp PV + 1161 kWh akkumulátor

Ebben az esetben is szintén egy egyszerűbb működési logika lett megvalósítva a 8.5.1-es fejezetben ismertetett elvek mentén. Viszont, mivel a telepített napelemes és akkumulátoros rendszer már önmagában nagyobb rugalmasságot ad, így a FEL és LE irányú szabályozásban való részvétel együtt volt figyelembe véve. Szintén napi kétórás időszávokban való kapacitás- és energia-ajánlatadás volt az alapja FEL és LE irányban is, egymást nem fedve.

5. táblázat. aFRR szabályozásban való részvétel esetén kapott eredmények vissz-wattos rendszer esetén

	600 kWp + 473 kWh		800 kWp + 1161 kWh	
FEL és LE irány	Kétórás stratégia minimuma	Kétórás stratégia maximuma	Kétórás stratégia minimuma	Kétórás stratégia maximuma
LE Kapacitás [millió HUF]	3,64	5,45	5,31	7,49
LE Energia [millió HUF]	2,37	4,88	3,33	6,97
Összesen LE [millió HUF]	6,37	10,33	8,64	14,46
FEL Kapacitás [millió HUF]	1,08	1,89	2,65	4,69
FEL Energia [millió HUF]	0,98	2,98	0,98	3,04
Összesen FEL [millió HUF]	2,06	4,78	3,63	7,73

A működési stratégia az önfogyasztás további optimalizálását is tartalmazta az aFRR pici részvétellel, az aFRR piaci bevételek mellett még további 10-15%-os villamosenergia megtakarítást is el lehet érni.

9. ÖSSZEGRZÉS

A dolgozatom fő célkitűzése az akkumulátoros energiatároló alkalmazásának a vizsgálata volt ipari környezetben. Ehhez először áttekintettem a jelenlegi energiapiaci helyzetet, különös tekintettel a napenergia arányának növekedésére és az ezzel járó kihívásokra.

Az ipari környezetben történő akkumulátorral kiegészített napelemes rendszerek vizsgálatát, műszaki és gazdasági elemzését egy könnyen használható, egyedileg testreszabható, különféle alkalmazási módok vizsgálatára képes szimulációs keretrendszer kifejlesztésével valósítottam meg. A digital twin modellek megalkotásához röviden bemutatásra került a napelemek működésének, energiatermelésének az elméleti háttere, valamint a különféle energiatárolási lehetőségek, ezen belül is a lítium-ion alapú energiatárolók. A modellezés python és Matlab/Simulink szoftverek segítségével valósult meg. Kitértem a modellek felépítése során használt eljárásokra, megfontolásokra, a modell működéséhez szükséges bemeneti adatokkal szembeni követelményekre, az adatok beszerzésének lehetséges forrásaira, valamint a műszaki és gazdasági kimeneti eredmények ismertetésére.

Három lehetséges alkalmazási módot azonosítottam az ipari vissz-wattos napelemes és akkumulátoros rendszerek alkalmazására. Ezek az önfogyasztás optimalizálás, peak-shaving és a rendszerszintű szolgáltatás nyújtás (aFRR). Részletesen elemeztem az egyes lehetőségek megvalósításának lehetőségét, az energiamenedzsment szoftver működésének alap logikáját, valamint, hogy milyen módon érhető el megtakarítás vagy bevétel az adott felhasználási esettel.

A modellek felépítése után a kitűzött céloknak megfelelő szimulációs eredmények kiértékelését végeztem el. Részletesen elemeztem a jelenleg leginkább felkapott önfogyasztás optimalizálás esetben kapott eredményeket és ezek alapján javasoltam két pénzügyi és műszaki szempontból is optimális napelemes és akkumulátoros méretet. A peak-shaving és aFRR esetén a két előző pontban javasolt rendszerrel elérhető további megtakarításokat/bevételeket mutattam be, mely az energiamenedzsment rendszer további optimalizálásával és komplexebb kereskedési logikával lehetséges.

A megalkotott szimulációs keretrendszer alkalmas ipari napelemes és akkumulátoros rendszerek optimális méretének meghatározására, az egyedi igényeknek és a megcélzott piaci részvételeknek megfelelően.

10. SUMMARY

The main objective of my thesis was to investigate the application of battery energy storage in an industrial environment. First I reviewed the current energy market situation, with a special focus on the increasing share of solar energy in the energy mix and the challenges it poses.

The investigation, technical and economical analysis of solar and battery systems in industrial environments was carried out by developing an easy to use, customizable simulation framework capable of investigating different applications. To create the digital twin models, the theoretical background of the operation and energy production of solar cells was briefly presented, as well as the different energy storage options, including lithium-ion based energy storages. The modelling was carried out using Python and Matlab/Simulink software. The procedures and considerations used to build the models, the requirements for the input data needed to run the model, the possible sources for obtaining the data, and the technical and economic output results were described.

Three possible applications for industrial zero feed-in solar and battery systems have been identified. These are self-consumption optimisation, peak-shaving and contributing in the automatic Frequency Restoration Reserve market. I have analysed in detail the feasibility of each option, the basic logic of how the energy management software works and how savings or revenue can be achieved through the use cases.

After building the models, I evaluated the simulation results according to the set objectives. I have analysed in detail the results obtained for currently the most popular self-consumption optimisation case and based on these results I have proposed two financially and technically optimal solar and battery system sizes. In the case of peak-shaving and aFRR, I have shown the additional savings/revenues that can be achieved with the two system sizes proposed in the previous section, which are possible with further optimization of the energy management system and more complex trading logic.

The simulation framework created is suitable for determining the optimal size of industrial solar and battery systems according to specific needs and targeted market participation.

11. IRODALOM ÉS FORRÁSJEGYZÉK

Prof.Dr. Aszódi A. – Dr. Yamaji B. – Tóth Barnabás (2019): A villamosenergia-rendszer felépítése és működése. [Egyetemi tananyag] Budapest: BME. Letöltés dátuma: 2024.04.10. forrás:

https://oktatok.reak.bme.hu/tantargyak/wp-content/uploads/sites/44/2019/11/FF_09_VillErendsz-Kltsg_20191113.pdf

Fazekas O. (szerk.) (2022): *A magyar villamosenergia-szektor működése és szabályozása II.* Budapest: ORAC kiadó. (I. fejezet: 2.5; III. fejezet: 2,3,4.1,4.3; IV. fejezet: 2; V. fejezet: 2; VI. fejezet 4; VII. fejezet: 2)

Hömöstrei M. (2014): *Feketetest-sugárzás és alkalmazásai.* Fizikai Szemle 64.évf. 7-8. sz. Letöltés dátuma: 2024.04.10. forrás:

https://fiztan.phd.elte.hu/kozkinccs/magypub/pub/kornyezet/hm_fizszem_2014_7_8.pdf

MAVIR Nemzetközi Üzemi és Kereskedelmi Szabályzat, 2024. április 09. Letöltés dátuma: 2024.04.10. forrás: <https://www.mavir.hu/web/mavir/nemzetkozi-uzemi-es-kereskedelmi-szabalyzat>

MVM Hálózathasználati Szerződés 1. melléklete: Általános Szerződési Feltételek Hálózathasználati Szerződésekhez (2024). Letöltés dátuma: 2024.04.10. forrás:

<https://mvmemaszhalozat.hu/>

Palej J. (2014): *A magyar közcélú átviteli villamosenergia-rendszer felépítése.* [Egyetemi tananyag] Pécs: PTE. Letöltés dátuma: 2024.04.10. forrás:

https://witch.mik.pte.hu/oktatas/Tanszeki_anyagok/Villamos_Halozatok_Tanszek/Haj%F3s%20Imre/Szabadvezet%E9k_eloszt%F3h%E1l%F3zat/1%20t%E9mak%F6r/tov%E1bbi%20info/VER_bemutat%E1sa2014.pdf

Szabó P. – Gyulai V.M. (2016): *Modell-alapú töltöttségi állapotbecslő biztonság- és küldeteskritikus akkumulátoros rendszerekhez.* [TDK dolgozat] Budapest: BME.

[http1] HUPX historikus adatok Letöltés dátuma: 2024.04.10. forrás: <https://hupx.hu/hu/piaci-adatok/dam/historikus-adatok>

[http2] HUPX rendszeres riportok. Letöltés dátuma: 2024.04.10. forrás: <https://hupx.hu/hu/piaci-adatok/dam/rendszeres-riportok>

[http3] *Napelemek teljesítménye*. Letöltés dátuma: 2024.04.10. forrás: <https://www.napelemek.net/napelemek-teljesitmenye/>

[http4] PVLIB toolbox Letöltés dátuma: 2024.04.10. forrás: <https://pvpmc.sandia.gov/tools/pv-lib-toolbox/>

[http5] Letöltés dátuma: 2024.04.10. forrás: <https://sunformation.blog.hu/>

[http6] *A napelem működése érthetően*. Letöltés dátuma: 2024.04.10. forrás: <https://www.tiszaenergiak.hu/a-napelem-mukodese-erthetoen/>

[http7] Magyar P. (2018): *Akkumulátor technológia: lítium alapú akkumulátorok*. Letöltés dátuma: 2024.04.10. forrás: <https://villanyautosok.hu/2018/05/30/akkumulator-technologia-litium-alapu-akkumulatorok/>

[http8] dr. Papp L. (2024): *Így termelt áramot Magyarország 2023-ban*. Letöltés dátuma: 2024.04.10. forrás: <https://villanyautosok.hu/2024/02/17/igy-termelt-aramot-magyarorszag-2023-ban/>

[http9] MAVIR adatpublikációs weboldal forrás: <https://www.mavir.hu/web/mavir/rendszer szintu-szolgal-tatasok3>

[http10] ENTSO-E adatpublikációs weboldal: <https://transparency.entsoe.eu/dashboard/show>

12. ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra. Magyarország villamosenergia-termelése 2023-ban.....	6
2. ábra. Napi országos rendszerterhelés és 5649 MW napelemes termelés jellege (GMT+2)	7
3. ábra. HUPX másnapi és aznapi piacok éves átlagos napon belüli árainak alakulása	8
4. ábra. Hazai naperőművek és HMKE rendszerek által termelt havi teljes energiamennyiség 2016-2023 között	8
5. ábra. 2023.12.20-ai napi diagram nettó villamos terhelésekkel.....	9
6. ábra. 2023.07.20-ai napi diagram nettó villamos terhelésekkel.....	9
7. ábra. Villamosenergia-rendszerek Európában.....	11
8. ábra. Kiegyenlítő szabályozási tartaléktípusok	13
9. ábra. Napelem panelek feszültség-áram karakterisztikája különböző besugárzási értékek esetén	14
10. ábra. Különböző hőmérsékletekhez tartozó feketetest sugárzás.....	15
11. ábra. A nap sugárzási spektruma és a feketetest sugárzás.....	15
12. ábra. A napelempanel tájolásának és dőlésszögének hatása a villamosenergia-hozamra, a maximálishoz képest.....	17
13. ábra. Fix tájolású és napkövető mechanizmussal ellátott 1kWp rendszer napi teljesítménygörbéje	17
14. ábra. Éves fajlagos magyarországi hozamtérkép	18
15. ábra. Lítium-ion akkumulátorok árainak alakulása cella és pakk szinten	22
16. ábra. Saját célra termelő napelemes és akkumulátoros rendszer sematikus ábrája.....	26
17. ábra. Peak-shaving illusztrálása egy napos fogyasztási profilon.....	28
18. ábra. NMC és LFP cella jellemző üresjárású feszültségkarakterisztikája a töltöttségi szint függvényében	35
19. ábra. Akkumulátor cella IR modellje	36
20. ábra. Akkumulátor cella OTC modellje	36
21. ábra. Akkumulátor cella TTC modellje	37
22. ábra. Havi átlagos napon belüli fogyasztási görbe.....	43
23. ábra. Egy 700 kWp-es rendszer által termelt energia integrálhatósága a fogyasztásba havi szinten	43
24. ábra. Napi átlagfogyasztási görbék a hét különböző napjain	44
25. ábra. Napon belüli átlagos fogyasztási görbe és a napelemes termelési görbe viszonya	45
26. ábra. Éves villamosenergia-költségek és a várható megtakarítás alakulása.....	46

27. ábra. Beruházások nettó jelenértéke.....	47
28. ábra. Akkumulátor hozzáadott nettó jelenértéke	48
29. ábra. Peak-shavinggel addicionálisan elérhető megtakarítás.....	50

13. TÁBLÁZATEGYZÉK

1. táblázat. 2024. január 01-től érvényes rendszerhasználati díjak	25
2. táblázat. Önfogyasztás optimalizálás esetére javasolt optimális rendszerméretetek	46
3. táblázat. Szabályozható fogyasztóval elérhető pénzügyi eredmények aFRR LE irány esetén	53
4. táblázat. Szabályozható fogyasztóval elérhető pénzügyi eredmények aFRR FEL irány esetén	53
5. táblázat. aFRR szabályozásban való részvétel esetén kapott eredmények vissz-wattos rendszer esetén	54

14. MELLÉKLET

14.1 Önfogyasztás optimalizáláshoz tartozó további szimulációs eredmények

VISSZ-WATT VESZTESÉG

A vissz-watt veszteség a napelemes rendszer által megtermelt fel nem használt energia aránya a teljes megtermelt energiához képest %-ban kifejezve. Ez az az energiamennyiség, amit se nem önfogyasztásra, se nem az akkumulátorban eltárolásra nem lehet felhasználni. (Minél alacsonyabb, annál kedvezőbb)

Napelem teljesítmény [kWp]		200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
Akkumulátor nélküli esetben		18,6	27,3	37,9	47,9	55,5	61,2	65,6	69,1	72	74,3
287 kWh	120 kW	9,6	18,8	28,4	39,4	48,2	54,8	60	64,1	67,4	70,1
473 kWh	150 kW	5,6	15,4	24,1	34,8	44,1	51,3	56,8	61,2	64,8	67,8
630 kWh	240 kW	3,2	13,1	21,1	31,5	41,1	48,6	54,4	59,1	62,8	66
860 kWh	300 kW	1,6	10,6	17,7	27,5	37,3	45,2	51,5	56,4	60,4	63,8
946 kWh	300 kW	1,4	10	16,9	26,5	36,3	44,3	50,6	55,6	59,7	63,2
1161 kWh	450 kW	1	8,4	15,4	24,4	34,2	42,3	48,9	54,2	58,4	62
1290 kWh	630 kW	0,8	7,5	14,6	23,4	33,2	41,5	48,1	53,5	57,8	61,4
1419 kWh	450 kW	0,8	6,7	13,9	22,6	32,4	40,7	47,4	52,8	57,2	60,9
1548 kWh	600 kW	0,7	6,1	13,2	21,9	31,9	40,2	46,9	52,4	56,8	60,5
1720 kWh	600 kW	0,7	5,3	12,3	21,1	31,1	39,5	46,2	51,7	56,3	60
1935 kWh	750 kW	0,7	4,5	11,3	20,3	30,4	38,9	45,6	51,2	55,8	59,6
2150 kWh	750 kW	0,7	3,8	10,3	19,4	29,6	38,2	45,1	50,6	55,3	59,2

ÉVES TÖLTÉSI/KISÜTÉSI CIKLUSOK SZÁMA

Az éves töltési/kisütési ciklusok száma az akkumulátor által bejárt teljes, töltési és kisütési ciklusok száma egy évben. (Minél alacsonyabb, annál kedvezőbb)

Napelem teljesítmény [kWp]		200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
Akkumulátor nélküli esetben		n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
287 kWh	120 kW	72	136	230	272	292	304	313	320	327	332
473 kWh	150 kW	64	117	204	256	277	291	300	307	314	319
630 kWh	240 kW	58	106	188	244	267	281	290	297	303	308
860 kWh	300 kW	47	90	164	219	244	257	266	273	278	282
946 kWh	300 kW	43	86	156	210	235	249	257	264	269	272
1161 kWh	450 kW	36	76	137	189	213	226	233	239	243	246
1290 kWh	630 kW	33	72	127	176	200	212	219	224	228	231
1419 kWh	450 kW	30	68	119	165	187	199	206	211	214	217
1548 kWh	600 kW	28	64	112	156	176	188	195	199	202	205
1720 kWh	600 kW	25	60	104	143	162	173	180	184	187	189
1935 kWh	750 kW	23	56	97	132	149	159	166	170	172	174
2150 kWh	750 kW	20	51	90	122	137	146	152	156	158	159

BELSŐ MEGTÉRÜLÉSI RÁTA

A belső megtérülési ráta alapján azok a beruházások fogadhatók el, amelyek belső megtérülési rátája magasabb, mint a beruházástól elvárt hozam (vagy a tőke költsége). Több beruházási javaslat rangsorolása esetén a magasabb belső megtérülési rátával jellemezhetőt részesítjük előnyben. Az ábrán feltüntetett értékek %-ban értendők, 15 évre vonatkoznak.

Napelem teljesítmény [kWp]		200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
Akkumulátor nélküli esetben		28,6	25,8	22,2	18,7	16	13,8	12	10,5	9,3	8,2
287 kWh	120 kW	20,8	22,6	20,8	17,2	14,2	11,7	9,6	7,8	6,3	4,9
473 kWh	150 kW	18,2	21,2	21	17,8	15	12,6	10,6	8,9	7,4	6
630 kWh	240 kW	15,8	19,5	20,3	17,8	15,2	13,1	11,1	9,5	8	6,8
860 kWh	300 kW	13,6	18,1	19,5	18,2	15,9	13,9	12,1	10,6	9,2	8
946 kWh	300 kW	12,7	17,4	19	18,2	16	14,1	12,4	10,9	9,5	8,3
1161 kWh	450 kW	10,9	16	17,9	17,8	16,2	14,5	12,9	11,5	10,3	9,2
1290 kWh	630 kW	9,9	15,2	17,2	17,4	16,4	14,7	13,2	11,9	10,7	9,7
1419 kWh	450 kW	9,1	14,5	16,6	16,9	16	14,9	13,5	12,2	11,1	10
1548 kWh	600 kW	8,3	13,8	16,1	16,5	15,7	14,6	13,5	12,4	11,4	10,4
1720 kWh	600 kW	7,4	13,1	15,4	15,9	15,2	14,2	13,2	12,2	11,3	10,4
1935 kWh	750 kW	6,3	12,1	14,6	15,2	14,6	13,7	12,8	11,9	11	10,2
2150 kWh	750 kW	5,4	11,3	13,8	14,6	14,1	13,3	12,4	11,6	10,7	9,9

LCOE

Az élettartamra vonatkoztatott fajlagos energiaköltség (LCOE) a rendszer hosszú távú költséghatékonyságának értékelésére használt mérőszám HUF/kWh-ban kifejezve, amely a rendszer élettartama alatt egy egységnyi villamos energia előállításának átlagos költségét jelenti, figyelembe véve az összes telepítési és üzemeltetési költséget.

Napelem teljesítmény [kWp]		200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
Akkumulátor nélküli esetben		37,5	42	49,2	58,6	68,6	78,7	88,8	98,9	108,9	118,9
287 kWh	120 kW	52,8	48,2	50,6	57,4	65,5	73,9	82,4	90,9	99,4	107,9
473 kWh	150 kW	60,4	51,7	51,8	57	64,1	71,7	79,4	87,2	95	102,9
630 kWh	240 kW	69,5	56,2	54,2	57,9	64,2	71,2	78,4	85,8	93,1	100,5
860 kWh	300 kW	79,7	60,9	56,5	58,6	64	70,3	77	83,7	90,6	97,5
946 kWh	300 kW	84,6	63,2	57,9	59,5	64,5	70,6	77	83,7	90,4	97,2
1161 kWh	450 kW	96,4	68,7	61,6	61,8	66,1	71,7	77,9	84,3	90,7	97,3
1290 kWh	630 kW	103,5	71,9	63,8	63,4	67,3	72,6	78,7	84,9	91,3	97,7
1419 kWh	450 kW	110,6	75,2	66,1	65	68,6	73,8	79,6	85,7	92	98,3
1548 kWh	600 kW	117,9	78,5	68,3	66,8	70,2	75,1	80,8	86,7	92,9	99,2
1720 kWh	600 kW	127,3	82,7	71,2	69	72,1	76,9	82,2	88	94,1	100,3
1935 kWh	750 kW	139,7	88,5	75	72,2	74,9	79,4	84,5	90,2	96,2	102,3
2150 kWh	750 kW	151,4	93,9	78,5	75	77,4	81,7	86,7	92,1	98	104,1

STATIKUS FEDEZETI PONT

Egy beruházás megtérülési ideje azt jelenti, hogy hány év alatt éri el a beruházás révén képződő összes várható nettó jövedelem az eredeti befektetés összegét. A javaslat akkor

fogadható el, ha a kiszámított megtérülési idő rövidebb, mint a megkövetelt megtérülési idő. Több beruházási javaslat esetén azt preferáljuk, amelynek rövidebb a megtérülési ideje. A megadott értékek évet jelentenek.

Napelem teljesítmény [kWp]		200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
Akkumulátor nélküli esetben		3,6	4,1	4,8	5,7	6,7	7,6	8,6	9,6	10,6	11,5
287 kWh	120 kW	5,1	4,7	4,9	5,6	6,4	7,2	8	8,8	9,7	10,5
473 kWh	150 kW	5,9	5	5	5,5	6,2	7	7,7	8,5	9,2	10
630 kWh	240 kW	6,7	5,5	5,3	5,6	6,2	6,9	7,6	8,3	9	9,7
860 kWh	300 kW	7,7	5,9	5,5	5,7	6,2	6,8	7,4	8,1	8,8	9,4
946 kWh	300 kW	8,2	6,1	5,6	5,8	6,2	6,8	7,4	8,1	8,7	9,4
1161 kWh	450 kW	9,3	6,7	6	6	6,4	6,9	7,5	8,1	8,8	9,4
1290 kWh	630 kW	10	7	6,2	6,1	6,5	7	7,6	8,2	8,8	9,4
1419 kWh	450 kW	10,7	7,3	6,4	6,3	6,6	7,1	7,7	8,3	8,9	9,5
1548 kWh	600 kW	11,4	7,6	6,6	6,5	6,8	7,3	7,8	8,4	9	9,6
1720 kWh	600 kW	12,3	8	6,9	6,7	7	7,4	8	8,5	9,1	9,7
1935 kWh	750 kW	13,5	8,6	7,3	7	7,3	7,7	8,2	8,7	9,3	9,9
2150 kWh	750 kW	14,7	9,1	7,6	7,3	7,5	7,9	8,4	8,9	9,5	10,1

TELJES BERUHÁZÁSI KÖLTSÉG

A teljes beruházási költség a napelemes rendszer tervezésével, beszerzésével, telepítésével és üzembe helyezésével kapcsolatos összesített költséget jelenti, amely magában foglalja a napelemek, inverterek, rögzítőszerkezetek, elektromos alkatrészek, és telepítés költségét. (Minél alacsonyabb, annál kedvezőbb). Az ábrán feltüntetett értékek millió HUF-ban értendők.

Napelem teljesítmény [kWp]		200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
Akkumulátor nélküli esetben		70	140	210	280	350	420	490	560	630	700
287 kWh	120 kW	109,3	179,3	249,3	319,3	389,3	459,3	529,3	599,3	669,3	739,3
473 kWh	150 kW	130,5	200,5	270,5	340,5	410,5	480,5	550,5	620,5	690,5	760,5
630 kWh	240 kW	154,2	224,2	294,2	364,2	434,2	504,2	574,2	644,2	714,2	784,2
860 kWh	300 kW	179,7	249,7	319,7	389,7	459,7	529,7	599,7	669,7	739,7	809,7
946 kWh	300 kW	191,1	261,1	331,1	401,1	471,1	541,1	611,1	681,1	751,1	821,1
1161 kWh	450 kW	218,6	288,6	358,6	428,6	498,6	568,6	638,6	708,6	778,6	848,6
1290 kWh	630 kW	235,1	305,1	375,1	445,1	515,1	585,1	655,1	725,1	795,1	865,1
1419 kWh	450 kW	251,6	321,6	391,6	461,6	531,6	601,6	671,6	741,6	811,6	881,6
1548 kWh	600 kW	268,1	338,1	408,1	478,1	548,1	618,1	688,1	758,1	828,1	898,1
1720 kWh	600 kW	289,5	359,5	429,5	499,5	569,5	639,5	709,5	779,5	849,5	919,5
1935 kWh	750 kW	317,7	387,7	457,7	527,7	597,7	667,7	737,7	807,7	877,7	947,7
2150 kWh	750 kW	344,3	414,3	484,3	554,3	624,3	694,3	764,3	834,3	904,3	974,3

VILLAMOSENERGIA-MEGTAKARÍTÁS (%)

A napelemes-akkumulátoros rendszer telepítése jelentős megtakarítást jelent a fogyasztók számára, mivel a megtermelt napenergiával kiváltható a hálózatról származó villamosenergia-fogyasztásuk egy része. A táblázatban a villamosenergia-megtakarítást százalékos formában láthatjuk. (Minél magasabb, annál kedvezőbb).

Napelem teljesítmény [kWp]		200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
Akkumulátor nélküli esetben		16,4	29,3	37,6	42	44,9	46,9	48,5	49,8	50,9	51,8
287 kWh	120 kW	18,2	32,7	43,3	48,8	52,2	54,6	56,4	57,9	59,1	60,1
473 kWh	150 kW	19	34,1	45,9	52,6	56,4	59	61	62,6	63,9	65
630 kWh	240 kW	19,5	35,1	47,9	55,4	59,6	62,5	64,6	66,3	67,7	68,9
860 kWh	300 kW	19,9	36,1	49,9	58,6	63,5	66,6	68,9	70,7	72,2	73,4
946 kWh	300 kW	19,9	36,4	50,4	59,5	64,5	67,7	70,1	71,9	73,4	74,7
1161 kWh	450 kW	20	37	51,3	61,1	66,7	70,2	72,5	74,4	75,9	77,2
1290 kWh	630 kW	20	37,3	51,8	61,9	67,6	71,2	73,6	75,6	77,1	78,4
1419 kWh	450 kW	20	37,7	52,2	62,5	68,3	72	74,6	76,5	78	79,4
1548 kWh	600 kW	20,1	37,9	52,6	63,1	68,9	72,7	75,3	77,3	78,8	80,1
1720 kWh	600 kW	20,1	38,3	53,1	63,7	69,6	73,4	76,2	78,3	79,8	81,1
1935 kWh	750 kW	20,1	38,6	53,7	64,3	70,3	74,1	77,1	79,1	80,7	81,9
2150 kWh	750 kW	20,1	38,9	54,3	65	71	74,9	77,8	80	81,5	82,7

VILLAMOSENERGIA-MEGTAKARÍTÁS

A napelemes-akkumulátoros rendszer telepítése jelentős megtakarítást jelent a fogyasztók számára, mivel a megtermelt napenergiával kiváltható a hálózatról származó villamosenergia-fogyasztásuk egy része. A táblázatban a villamosenergia-megtakarítást millió HUF/év formában láthatjuk. (Minél magasabb, annál kedvezőbb)

Napelem teljesítmény [kWp]		200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
Akkumulátor nélküli esetben		19,2	34,3	44	49,2	52,5	54,9	56,8	58,3	59,6	60,6
287 kWh	120 kW	21,3	38,3	50,7	57,2	61,1	63,9	66	67,7	69,2	70,4
473 kWh	150 kW	22,3	40	53,8	61,6	66	69,1	71,4	73,3	74,8	76,1
630 kWh	240 kW	22,9	41,1	56	64,9	69,8	73,1	75,6	77,6	79,2	80,6
860 kWh	300 kW	23,2	42,3	58,4	68,6	74,3	77,9	80,6	82,7	84,4	85,9
946 kWh	300 kW	23,3	42,6	58,9	69,6	75,5	79,3	82	84,2	85,9	87,4
1161 kWh	450 kW	23,4	43,3	60	71,6	78	82,1	84,9	87,1	88,9	90,4
1290 kWh	630 kW	23,4	43,7	60,6	72,5	79,1	83,3	86,2	88,4	90,2	91,7
1419 kWh	450 kW	23,5	44,1	61,1	73,2	80	84,3	87,3	89,6	91,3	92,9
1548 kWh	600 kW	23,5	44,4	61,5	73,8	80,7	85	88,2	90,5	92,3	93,8
1720 kWh	600 kW	23,5	44,8	62,2	74,6	81,5	85,9	89,2	91,6	93,4	94,9
1935 kWh	750 kW	23,5	45,1	62,8	75,3	82,3	86,8	90,2	92,6	94,4	95,9
2150 kWh	750 kW	23,5	45,5	63,6	76,1	83,1	87,7	91,1	93,6	95,4	96,8

ÉVES MEGTERMELT NAPENERGIA

Az adott méretű PV rendszer által egy év alatt megtermelt teljes energiamennyiség MWh-ban. (Minél magasabb, annál kedvezőbb).

Napelem teljesítmény [kWp]		200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
Akkumulátor nélküli esetben		235,9	472,2	708,4	944,3	1180,6	1416,8	1653,1	1889	2125,3	2361,5
287 kWh	120 kW	235,9	472,2	708,4	944,3	1180,6	1416,8	1653,1	1889	2125,3	2361,5
473 kWh	150 kW	235,9	472,2	708,4	944,3	1180,6	1416,8	1653,1	1889	2125,3	2361,5
630 kWh	240 kW	235,9	472,2	708,4	944,3	1180,6	1416,8	1653,1	1889	2125,3	2361,5
860 kWh	300 kW	235,9	472,2	708,4	944,3	1180,6	1416,8	1653,1	1889	2125,3	2361,5
946 kWh	300 kW	235,9	472,2	708,4	944,3	1180,6	1416,8	1653,1	1889	2125,3	2361,5
1161 kWh	450 kW	235,9	472,2	708,4	944,3	1180,6	1416,8	1653,1	1889	2125,3	2361,5
1290 kWh	630 kW	235,9	472,2	708,4	944,3	1180,6	1416,8	1653,1	1889	2125,3	2361,5
1419 kWh	450 kW	235,9	472,2	708,4	944,3	1180,6	1416,8	1653,1	1889	2125,3	2361,5
1548 kWh	600 kW	235,9	472,2	708,4	944,3	1180,6	1416,8	1653,1	1889	2125,3	2361,5
1720 kWh	600 kW	235,9	472,2	708,4	944,3	1180,6	1416,8	1653,1	1889	2125,3	2361,5
1935 kWh	750 kW	235,9	472,2	708,4	944,3	1180,6	1416,8	1653,1	1889	2125,3	2361,5
2150 kWh	750 kW	235,9	472,2	708,4	944,3	1180,6	1416,8	1653,1	1889	2125,3	2361,5

ÉVES AKKUMULÁTOR ÁLTAL SZOLGÁLTATOTT ENERGIA

Egy év alatt az akkumulátor által szolgáltatott energia MWh-ban. (Minél magasabb, annál kedvezőbb).

Napelem teljesítmény [kWp]		200	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
Akkumulátor nélküli esetben		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
287 kWh	120 kW	21,2	39,7	67,2	79,8	85,6	89,3	91,9	94	95,8	97,3
473 kWh	150 kW	30,8	56,4	98,2	124,2	134,6	141,4	145,9	149,4	152,4	154,9
630 kWh	240 kW	36,6	67,9	120,6	157,1	172,7	181,7	188,1	192,6	196,4	199,5
860 kWh	300 kW	40,4	79,4	144,3	194,6	217,8	229,9	238,1	244,3	248,8	252,8
946 kWh	300 kW	41	82,4	149,9	204,3	229,7	243,5	252,3	258,8	263,7	267,6
1161 kWh	450 kW	41,9	89,6	160,7	223,9	255	271,7	280,7	287,7	293,1	297,2
1290 kWh	630 kW	42,4	93,8	166,1	233	266	284	294	301,3	306,5	311
1419 kWh	450 kW	42,7	97,6	171,2	240,2	274,7	293,8	305	312,4	317,7	322,4
1548 kWh	600 kW	42,8	100,6	175,7	246,2	281,3	301,1	313,6	321,5	326,9	331,5
1720 kWh	600 kW	42,9	104,5	182,1	253,7	289,6	310	324,3	332,8	338,2	342,5
1935 kWh	750 kW	43	108	188,8	261,2	297,7	318,5	333,9	343	348,6	352,5
2150 kWh	750 kW	43,1	111,5	196,3	269,2	306	327,3	342,6	352,7	358,4	362

NYILATKOZAT

a szakdolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Tóth Máté
A Hallgató Neptun kódja: TM40Z1
A dolgozat címe: Akkumulátorok alkalmazásának lehetőségei a C&I szektorban
A megjelenés éve: 2024
A konzulens intézetének neve: Műszaki Intézet
A konzulens tanszékének a neve: Épületgépészeti és Energetikai Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott szakdolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

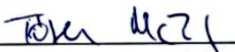
A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkori szellemi tulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitori rendszerébe. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem könyvtári repozitori rendszerében.

Kelt: 2024. év április hó 20. nap


Hallgató aláírása

NYILATKOZAT

Tóth Máté (hallgató Neptun azonosítója: **TM40Z1**) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a szakdolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A záródolgozatot/szakdolgozatot/diplomadolgozatot/portfóliót a záróvizsgán történő védésre javaslom / nem javaslom.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem*

Kelt: Gödöllő, 2024. év április hó 18. nap


belső konzulens