

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM**  
**GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR**  
**ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK**

**ILYÉS BOTOND**

**TDK DOLGOZAT**

Energiatároló működésének optimalizálása lineáris programozással

Konzulens:

*Dr. Mayer Martin János*

Egyetemi adjunktus

Budapest, 2023

# TARTALOMJEGYZÉK

|  |    |
|--|----|
| Absztrakt.....   | 3  |
| Abstract.....  | 4  |
| 1. A Villamosenergia-tárolás Hálózati hasznosítása .....     | 5  |
| 1.1. A növekvő tárolási igények okai.....                    | 5  |
| 1.1.1. A terhelés előrejelzése .....                         | 6  |
| 1.1.2. A termelés előrejelzésre.....                         | 7  |
| 1.2. A különböző tárolótípusok technológiai bemutatása ..... | 8  |
| 1.2.1. Mechanikai elven működő energiatárolók.....           | 9  |
| 1.2.2. Elektrokémiai energiatárolók.....                     | 10 |
| 1.2.3. Kémiai tárolási technológiák.....                     | 11 |
| 2. Vizsgálati módszerek.....                                 | 14 |
| 2.1. Akkumulátoros energiatárolás .....                      | 14 |
| 2.1.1. Konceptió .....                                       | 14 |
| 2.1.2. Tárolók modellezése.....                              | 15 |
| 2.2. Hidrogénes energiatárolás .....                         | 17 |
| 2.2.1. Konceptió .....                                       | 17 |
| 2.2.2. Tároló modellezése.....                               | 18 |
| 2.3. Értékelési szempontok.....                              | 19 |
| 3. Eredmények értékelése .....                               | 21 |
| 3.1. Eredmények .....  | 21 |
| 3.1.1. Li-ion akkumulátoros rendszer eredményei.....         | 22 |
| 3.1.2. Flow akkumulátorok eredményei.....                    | 26 |
| 3.1.3. Hidrogénes energiatároló eredményei .....             | 29 |
| 4. Következtetések.....                                      | 33 |
| 5. Köszönetnyilvánítás.....                                  | 35 |
| 6. Felhasznált források.....                                 | 36 |

## ABSZTRAKT

A villamosenergia-rendszer folyamatos változáson megy keresztül. A korábbi centralizált, hagyományos fosszilis energiaforrásokon alapuló termelésről kezdünk áttérni a decentralizált, megújuló energiaforrásokra is egyre inkább építő forrásszerkezetre. A megújuló termelés térnyerése és ezzel párhuzamosan a konvencionális erőművek leállítása megoldás lehet a fenntarthatósági és környezetvédelmi törekvésekre. Ugyanakkor az ellátásbiztonság fenntartása alapvető feladat, viszont azzal, hogy nagymértékű időjárásfüggő termelőegység és ezen belül is hazánkban főként napelemes rendszer kerül beépítésre a hálózatra, a rendszeregyensúly fenntartása nagyobb kihívást jelent. Cél egy olyan fenntartható villamosenergia-rendszer kialakítása, amiben a termelés kiszámítható, a fogyasztói igények minden esetben kiszolgálhatók és a kibocsátás minimális. Ehhez azonban elengedhetetlen a villamosenergia-tárolás hálózati integrációja, illetve olyan gazdaságos, hatékony és megbízható technológiák alkalmazása, melyek megoldást jelenthetnek az időjárásfüggő termelők által okozott instabilitás kiegyenlítésére. Továbbá a villamosenergia-tárolásban nagy piaci potenciál rejlik, ugyanakkor a jogszabályi háttér kidolgozása még folyamatban van, ami nehezíti az ilyen projektek valós gazdasági értékelését.

Jelen dolgozat fő témája a villamosenergia-tárolókkal kombinált napelemes rendszerek megvalósíthatóságának és működtetésének vizsgálata, műszaki és gazdasági szempontok alapján. Jelenleg is számos kutatás zajlik a különböző tárolási metódusok kapcsán. A szakirodalmi áttekintésben bemutatom ezeket a technológiákat, ezek műszaki és gazdasági paramétereit, előnyeiket és hátrányaikat, valamint a hazai megvalósíthatóságukat. A konklúziókat levonva a munkámat két tárolótípusra szűkítem le: akkumulátoros energiatárolóra, valamint Power-To-Hydrogen technológiára. Meglévő módszertanok tanulmányozása után két optimalizálási modellt alkottam meg. A modell a villamosenergia-árakat, a napelemes rendszer termelési adatait, valamint a tárolók tulajdonságait figyelembe véve meghatározza a tárolók optimális működtetését. A munkám során historikus adatokkal dolgoztam, így utólagos optimalizálást végzek, ugyanakkor a módszertan a későbbiekben továbbfejleszthető projektív formára is. Az optimalizálás célja a lehető legnagyobb bevétel és legrövidebb megtérülési idő meghatározása. A modellek által az akkumulátoros rendszer esetében közel 30%-os bevétel növekedést tudtam elérni, míg a hidrogénes rendszerrel ez az arány a hidrogén árának függvényében változik.

## ABSTRACT

The electricity system is constantly changing. We are moving from a centralised generation structure based on conventional fossil fuels to a decentralised one that increasingly relies on renewable energy sources. The rise of renewable generation and the parallel phasing out of conventional power plants could provide a solution to sustainability and environmental concerns. At the same time, maintaining security of supply is a key challenge, but with the integration of a large amount of weather-dependent generation units, especially in our country mainly PV, maintaining system balance is more challenging. The aim is to develop a sustainable electricity system in which generation is predictable, consumer needs can be always met, and emissions are minimised. However, this requires the integration of electricity storage into the grid and the use of economic, efficient, and reliable technologies that can address the instability caused by weather-dependent generators. Furthermore, electricity storage has a high market potential, but legislative framework is still being developed, which makes it difficult to assess the real economic viability of such projects.

The main topic of this work is the feasibility and operation of solar PV systems combined with electricity storage systems, based on technical and economic aspects. There is currently a lot of research on different storage methods. The literature review will present these technologies, their technical and economic parameters, their advantages and disadvantages, and their feasibility in the domestic context. Drawing conclusions, I will narrow my work down to two types of storage: Battery Energy Storage Systems and Hydrogen Energy Storage Systems. Based on these and on previous computational methodologies, I have separately developed my own optimisation models. The model determines the optimal operation of these storage facilities considering electricity prices, the production of the PV system and the characteristics of the storage facilities. In my work I worked with historical data, so I perform posterior optimization, however the methodology can be further developed to a projective form in the future. The aim of the optimisation is to determine the highest possible revenue and shortest payback period. With the optimisation, I was able to reach around 30% growth in the yearly income with batteries, while for the hydrogen system the figure heavily depends on the price of hydrogen.

# 1. A VILLAMOSENERGIA-TÁROLÁS HÁLÓZATI HASZNOSÍTÁSA

## *1.1. A növekvő tárolási igények okai*

A környezetvédelmi törekvések, melyek a fenntartható fejlődés jegyében a környezeti alrendszer védelmét tűzték ki célul jelentős hatással vannak a villamosenergia-rendszerre. A jelenleg aktuális és legjelentősebb fenntarthatósági forgatókönyv a Net Zero Emission by 2050, melynek célja a klímasemlegesség elérése 2050-re. A direktíva célja összhangban van a Párizsi Egyezmény vállalásaival, azaz a globális átlaghőmérséklet növekedésének  $2^{\circ}\text{C}$ , de lehetőleg  $1,5^{\circ}\text{C}$  alatt tartásával. Ehhez viszont elengedhetetlen a szén, illetve fosszilis források fokozatos kivonásának felgyorsítása, valamint a megújuló energiaforrásokba történő befektetések ösztönzése.

Ami az energetikai szektort illeti, már jelenleg is a villamosenergia-termelés jelentős részarányát fedik le a low-carbon megoldások, míg a fosszilis energiaforrások egyre inkább szorulnak ki az energiamixből. A fenntarthatósági forgatókönyvek [1] is ezeket a trendeket igazolják, hiszen a fenntarthatósági célok elérése a szektor dekarbonizációja nélkül lehetetlen. Mindezek mellett a fejlett és fejlődő országoknál is bár eltérő mértékű, de növekvő igények várhatóak. A csökkenő konvencionális forrás és a növekvő igények beruházásokat indukálnak, melyek főként a megújuló források kiaknázására irányulnak, ami viszont a villamosenergia-rendszer számára új kihívásokat tartogat.

Ezen források a konvencionális termelőkhöz képest eltérő módon, teljesítményelektronikán keresztül kapcsolódnak a hálózathoz, így a frekvenciatartásból és frekvenciaszabályozásból nem tudják kivenni a részüket [2]. A napelemes rendszerek inerciakonstansa nulla, viszont az inercia, azaz az egység tehetetlensége elengedhetetlen a frekvenciastabilitás szempontjából. A hagyományos forgógépes energiatermelés csökkenése a frekvencia szempontjából hátrányos hatású, hiszen a rendszer inerciája, azaz a tehetetlensége és a benne lévő forgó tartalék mennyisége csökken. Továbbá ezek a források csökkentik a rendszer rugalmasságát, ami az ellátás minőségi és mennyiségi változásához is vezethet. Számos megoldás elérhető a probléma megoldására, mint például a hálózat bővítése és megerősítése, a terhelés- és termeléselőrejelzések minőségének javítása, a fogyasztó oldali kereslet szabályozása, valamint az energiátárolás, bár ezek a beruházások jelentős költségvonzattal járnak. A fogyasztó oldali kereslet szabályozása és a termeléselőrejelzés segítséget nyújthat a rendszerirányító számára a flexibilitás növelésében, de nem oldja meg a minőségi és stabilitási problémákat. A hagyományos termelők nagy

része nem képes a szükséges rugalmasság biztosítására, hiszen a legtöbb konstans termelésre van tervezve, terhelésváltoztatási sebességük pedig alacsony. Az igazán jó megoldás a hiányok gyors lefedésére, a feszültség- és frekvenciastabilitás fenntartására az energiátárolás lehet. Azonban a megfelelő tárolási technológia kiválasztásához szükséges a rendszer, a terhelés és a termelés pontos ismerete, így a következőkben a terhelés- és termelés-előrejelzési módszereket, valamint a különböző tárolási technológiákat fogom röviden bemutatni.

### 1.1.1. A TERHELÉS ELŐREJELZÉSE

A várható fogyasztás ismerete nélkülözhetetlen a hálózat megfelelő üzemeltetéséhez, valamint a különböző menetrendek elkészítéséhez. Ez alapján szükséges a különböző termelőegységeket bevonni a termelésbe, hiszen az igényeket minden időpontban ki kell elégíteni. Az eddigi tudományos és ipari kutatások főként egy adott pontra vonatkozó terhelés előrejelzést vizsgáltak [3]. Ugyanakkor az elmúlt évtizedben, köszönhetően a növekvő piaci versenynek, a hálózat öregedésének, valamint a megújulóknak egyre növekvő hálózati integrációjának, a valószínűségi alapú terhelés előrejelzés egyre fontosabb lett a tervezés és az üzemeltetés szempontjából.

A terhelés előrejelzéshez szükség van hálózati tervezésre, üzemeltetésre, a jövedelmi változásokra, az energiakereskedelemre és még számos más paraméterre. Ezek az előrejelzések a legtöbb piaci szereplő számára elengedhetetlenek, mint például a szabályozó szerv, kereskedők, bankok, biztosítók.

A folyamat hasonló a gáz- és vízfogyasztás előrejelzéséhez, hiszen azonosak az alapelvek, módszerek, technikák és piaci követelmények. Időtartomány alapján négy kategóriát különböztethetünk meg: nagyon rövid távú (Very Short Term Load Forecasting – VSTLF), rövid távú (Short Term Load Forecasting – STLF), középtávú (Medium Term Load Forecasting – MTLF) és hosszú távú (Long Term Load Forecasting – LTLF). A váltópontok a következők: egy nap, két hét, három év [3].

A terhelés előrejelzés az összesített várható villamosenergia-szükségletet mutatja meg. Az utóbbi időszakban telepített számos okos almérő nagy mennyiségű adatot biztosít az ipar számára. Ezek az adatok térben és időben is elszórtak, viszont a technológia, valamint az adatfeldolgozás fejlődésével a helybeli terhelés előrejelzés átalakult hierarchikus előrejelzéssé. Ez számos területet lefed a háztartási szinttől a vállalati szintig, a pár percestől egészen a pár évre előre mutató időtartamig.

Köszönhetően annak, hogy a döntéshozás a szolgáltató szektorban eddig nagy mértékben a várható értékeken alapult, a terhelés előrejelzések eredménye pontszámként jelenik. A valószínűségi prognózisok használhatóak egységek lekötésére, a termelés tervezésére, a várható árképzésre, a berendezések meghibásodásának előrejelzésére, valamint a megújuló hálózati integrációjára.

Az elmúlt időszakban egyre nagyobb teret hódítanak a mesterséges intelligenciára, a gépi tanulásra és a neurális hálókra épülő előrejelzések. A határ a statisztikai alapra épülő technikák és ezek között kezd egyre jobban elmosódni, köszönhetően az egyre szélesebb körű együttműködéseknek a tudományos világban.

A megfelelő és pontos előrejelzés kialakításához fogyasztó oldali adatokra van szükség. Ezek gyűjtését elősegíti az okos mérés terjedése, nem csak az elosztóhálózaton, hanem a fogyasztónál is. Mindazonáltal, az okos mérés és a szabályozható eszközök terjedése elősegítheti a paradigmaváltást a keresleti oldali szabályozásban [4]. Azonban ehhez egy átfogó és alapos analízisre van szükség a fogyasztói flexibilitással kapcsolatban.

A fogyasztás pontos ismerete és annak előrejelzése elengedhetetlen a termelés menetrendjének kialakításához. A kapacitások lekötése, a menetrend tartása és az optimális működés kivitelezése jelentős költségvonzattal rendelkezik, így elengedhetetlen, hogy a rendszert optimumon üzemeltessük.

### 1.1.2. A TERMELÉS ELŐREJELZÉSRE

Konvencionális termelők esetén a termelést az igényeknek megfelelően tudjuk változtatni a tüzelőanyag vagy üzemanyag mennyiségének változtatásával. Ezeket az egységeket három fő kategóriába tudjuk sorolni: alaperőművek, menetrendtartó erőművek és csúcserőművek. Az alaperőművek az egész év során egyenletesen termelnek, magas kihasználási óraszámmal rendelkeznek, terhelésváltoztatásuk lassú. A menetrendtartó erőművek a várható menetrend szerint üzemelnek. A csúcserőművek pedig a terhelési csúcsok idején szolgáltatnak energiát. Terhelésváltoztatásuk nagyon gyors, így ki tudják egyensúlyozni a rendszerben keletkező hiányokat, ugyanakkor üzemeltetési költségük magas. Ilyenek például a gázturbinás erőművek. Ahhoz, hogy gazdaságilag optimálisan üzemelhessen a rendszer, a lehető legpontosabb menetrendekre és megfelelő üzemeltetésre van szükség.

Ezzel szemben a megújuló termelőegységek kiadott teljesítménye nagy mértékben függ az időjárástól. Ezen rendszerek között is hazánkban főként a napelemekre helyeződik a hangsúly,

köszönhetően az alacsony villamosenergia-egységköltségüknek és a könnyű beépíthetőségnek. Ámbar változékonyságuk és bizonytalan termelésük miatt komoly kihívások elé a szolgáltatókat és a rendszerirányítókat.

A napelemes előrejelzések az elmúlt évtizedben rohamtempóban fejlődtek és jelenleg három különböző kategóriát különböztethetünk meg. Az égboltfigyelőkamerák rövid távon (fél óránál rövidebb időtartam) képesek előrejelzést készíteni azáltal, hogy azonosítják és lokalizálják a felhőket. A műhold alapú metódusok a napsugárzási mező mozgását figyelik és ez alapján hozzávetőlegesen négy órás időtartamot vizsgálnak. Ez a módszer éjszaka nem használható, hiszen a kép ekkor teljesen fekete. A több órás, de akár a másnapi előrejelzésekhez a numerikus időjárás előrejelzésekre alapuló metódusokat (Numerical Weather Prediction – NWP) használják. Ezek az atmoszférában lejátszódó dinamikai és termodinamikai folyamatokat vizsgálják és ezek alapján modellezik a felhőzet várható alakulását. Ezen három kategória mellett a statisztikai és gépi tanulási módszereket is egyre szélesebb körben használják, bár ezeket manapság már inkább az utófeldolgozásban hasznosítják.

Másnapi előrejelzésre az NWP modellek a legalkalmasabbak, köszönhetően annak, hogy ezek dinamikus időjárás előrejelzési modellekre alapulnak, figyelembe veszik az atmoszférában lejátszódó fizikai folyamatokat. A napsugárzás időben és térben is változik, amit az NWP modell le tud követni. Ugyanakkor fontos figyelembe venni a fizikai és mérnöki törvényeket a sugárzás villamos energiává alakítása során. A globálsugárzás előrejelzés és napelemes teljesítmény közötti kapcsolatot a modell lánc adja meg. Ez modellezhető adat alapú elemzésekkel és fizikai rendszerekkel is. Amikor ismertek a napelemes rendszer fizikai jellemzői, akkor érdemes ezekkel számolni.

Hazánkban a napelempark üzemeltetőjének mentrendet kell készíteni, amelyet be kell adni a rendszerirányítónak. A Kötelező Átviteli Tarifában (KÁT) lévő napelemparkok esetén nem szükséges egyenként, elegendő csupán a mérlegkörre mentrendet adni. Az ehhez szükséges időjárási adatokat több forrásból is beszerezhetik, lehetnek azok akár hazai, akár nemzetközi adatok is.

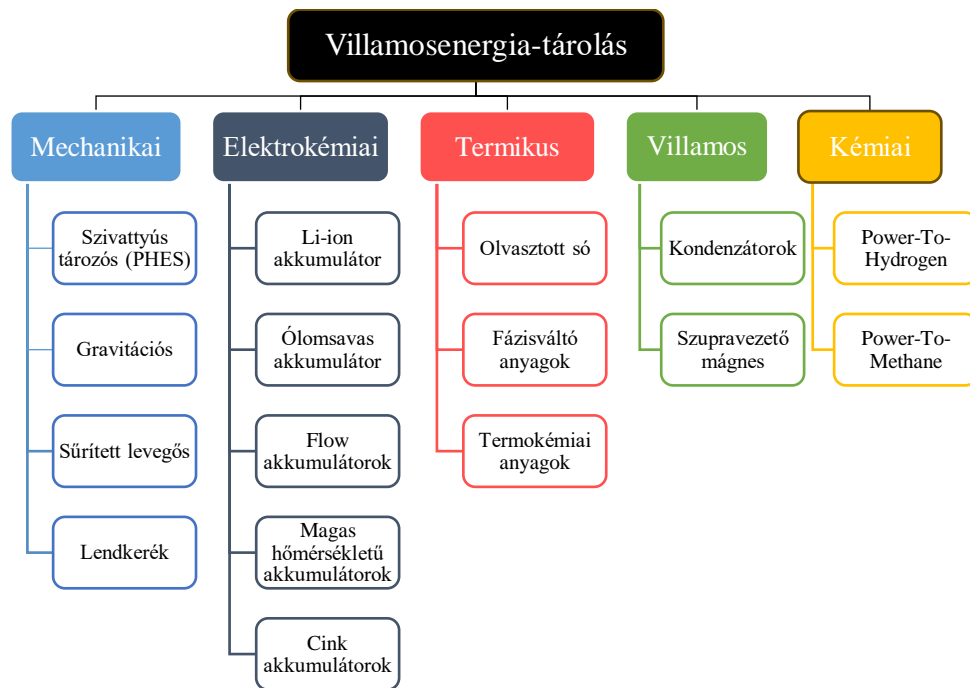
## *1.2. A különböző tárolótípusok technológiai bemutatása*

Látható, hogy bár a fogyasztás előrejelzése, valamint ezen források termeléselőrejelzése egy komolyan kutatott és gyorsan fejlődő terület, de a fogyasztói igények gyors változásával, valamint az időjárásfüggéssel mindig meg kell majd küzdeni. Mindez mellett haladunk egy teljesen



decentralizált rendszer irányába, ami a hálózatüzemeltetés számára komoly kihívásokat jelent, hogy a források közötti egyensúly fenntartható legyen, illetve az energiaellátás minőségi és mennyiségi követelményei teljesüljenek. Gyors beavatkozásra van szükség, hogy a rendszer egyensúly fenntartható legyen, így olyan forrásokra van szükség, melyek azonnal rendelkezésre állnak, és rövid távon mindenképpen, de akár hosszabb távon is megoldást nyújthatnak a metrendi hibák kiküszöbölésére. Erre a szerepkörre pedig az energiatárolás lehet a megoldás. Mindemellett az energiatárolás nem csupán a nehézségekre lehet egy megoldás, de jelentős piaci potenciál is rejlik benne.

Az energiatárolókat sok féle szempont szerint csoportosíthatjuk. Kategorizálhatjuk őket többek között kiforrottság, tárolási elv, töltési-kisütési idő, kapacitás alapján. Leggyakrabban tárolási elv alapján szokták csoportosítani őket. A következő fejezetekben néhány technológia részletesebben is bemutatásra kerül.



1. ábra: A tárolók működési elv szerinti csoportosítása [5]

### 1.2.1. MECHANIKAI ELVEN MŰKÖDŐ ENERGIATÁROLÓK

A szivattyús tározós erőmű az egyik legrégebbi – és jelenleg legelterjedtebben és leggazdaságosabban működő energiatárolási forma [6]. A vízenergia nem csupán egy megújuló és fenntartható energiaforrás, de flexibilitása és tároló kapacitása miatt alkalmas a rendszerstabilitás javítására, valamint a többi megújuló energiaforrás rendszerintegrációjának elősegítésére. Nagy

tárolási kapacitással rendelkeznek, funkcióit tekintve pedig képes a terhelés kiegyenlítésére, nagyblokk rendszerbe illesztésre, valamint rendszerszabályozásra is. Hatásfokuk 70-85% közé tehető, jelenleg pedig a világ energiatárolóinak 94%-át teszik ki szivattyús-tározós erőművek, ezzel összesen 9000 GWh tárolási kapacitást biztosítva [7]. Azonban kialakításához megfelelő földrajzi adottságok szükségesek, melyek hazánkban csak minimálisan állnak rendelkezésre.

A sűrített levegős energiatárolók a telepítéséhez is bizonyos földrajzi adottságok és geológiai képződmények szükségesek. Nagy energiasűrűséggel, viszont alacsonyabb hatásfokkal rendelkeznek.

A lendkerekes energiatárolás magas teljesítménysűrűséggel, de relatív alacsony energiasűrűséggel rendelkezik. Képes az időszakos termelés tárolására, valamint folytonos teljesítményleadásra. Egyből leköveti a hálózat változásait, frekvenciaszabályozásra alkalmas. A tárolt energia egyenesen arányos a forgó test tömegével, illetve négyzetesen arányos a szögsebességgel. Hosszú az élettartama, valamint a használat során nem degradálódik, viszont a magas az önkisülési rátája.

### 1.2.2. ELEKTROKÉMIAI ENERGIATÁROLÓK

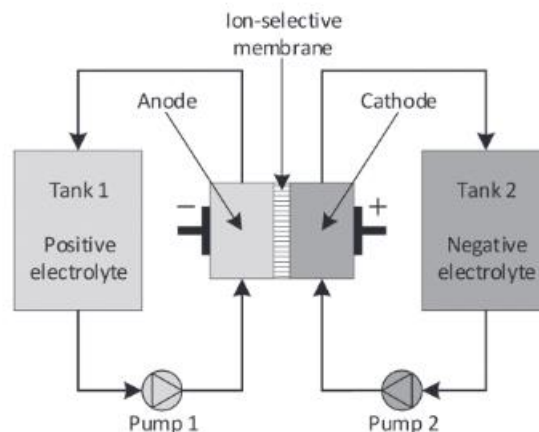
Az elektrokémiai energiatárolók számos előnnyel rendelkeznek a többi tárolási formához képest. Hatásfokuk magasabb, mérettartományuk széles, a mikroelektronikai alkalmazásoktól, a háztartási méretekben át egészen az ipari energiatárolásig találkozhatunk elektrokémiai megoldásokkal. Legjelentősebb képviselőjük a lítium-ion akkumulátor. Elterjedése köszönhető nagy energia- és teljesítménysűrűségének, valamint hosszú élettartamának, illetve magas ciklikus hatásfokának. Ugyanakkor szabályozása nagy precizitást igényel annak érdekében, hogy a cellasérülések elkerülhetőek legyenek. Továbbá érzékeny a hőmérsékletre, a túl magas, de a túl alacsony hőmérséklet is kárt tehet a cellákban.

A lítium, mint akkumulátor alapanyag alkalmazása számos indokra vezethető vissza. Mint minden alkálifém, erősen reaktív, valamint a legkisebb atomtömegű fém [8]. Ennek köszönhetően magas üzemi feszültség, alacsony tömeg és magas energiasűrűség jellemzi. A tároló töltéskor az elektronok a negatív szénalapú elektródához, kisütéskor pedig a pozitív fém-oxid elektródához vándorolnak. Az anódot és a katódot elválasztó elektrolit lítium-hexafluorát, vagy manapság a már kevésbé korrodáló lítium-tetrafluoroborát, általában folyékony, szerves oldat formájában van. Ez az oldat az elektronokat nem vezeti, ezért az anyagokat egy szeparátorral

(porózus membránnal) választják el. A külső kapcsok összekötésével megindul az elektronok áramlása [9].

A lítium-ion akkumulátorok teszik ki az akkumulátoros energiatárolók jelentős részét, több mint 90%-át az eddig használt egységeknek [2]. Három fő altípust különböztethetünk meg: NMC (nikkel-mangán-kobalt), LFP (lítium vas-foszfát) és LTO (lítium-titán-oxid). Annak ellenére, hogy ez a technológia már kiforrottnak tekinthető, egyre inkább növekvő igény jelentkezik egy nagyobb energiasűrűségű, nagyobb kapacitású, megbízhatóbb, jobb teljesítményű és alacsonyabb költségekkel rendelkező megoldás iránt.

A flow-akkumulátor tekintenek vissza a leghosszabb múltra. Két elektrolittal telt tartállyal rendelkeznek, melyeket egy porózus membrán választ el egymástól, ami csak ionokat enged át. Az elektrolitkoncentráció határozza meg az energiasűrűséget, míg az elektródok mérete és az cellák száma határozza meg a teljesítménysűrűséget. Ezek a típusok jóval magasabb teljesítménysűrűséggel rendelkeznek, mint a Li-ion akkumulátorok, de energiasűrűségük alacsonyabb, ami a korlátos elektrolit mennyiségnek tudható be. Fő képviselőjük a vanádium-redox flow akkumulátor.



2. ábra: A flow akkumulátorok technológiai bemutatása [10]

### 1.2.3. KÉMIAI TÁROLÁSI TECHNOLÓGIÁK

Ez a gyűjtőnév a Power-To-Hydrogen és Power-To-Gas technológiákat tartalmazza és nagyban hasonlítanak a sűrített levegős tárolókra, azonban az előállított termék el is kereskedhető, így újabb piacot nyitva a tároló előtt. A két fő termék a hidrogén és a metán. Egy metános rendszer elektrolizálóból, egy CO<sub>2</sub> leválasztóból, amennyiben a szén-dioxid nem áll rendelkezésre közvetlenül, valamint egy metanizálóból áll. A megújulókat által termelt többlet villamos energiát

hidrogén előállítására fordítódik, amit aztán a CO<sub>2</sub>-vel együtt a metanizálóba kerül. Itt különböző kémiai eljárások során egy metánból és vízgőzből álló gázkeverék alakul ki. Az így előállított metán az úgynevezett szintetikus metán, ami betáplálható a földgázhálózatba, valamint villamosenergia-termelésre használható, így bezárva a tárolási kört [11]. Hatásfoka és elterjedtsége alacsony, ugyanakkor a légköri szén-dioxid megkötésére és felhasználására egy jó megoldás lehet.

A hidrogént megkülönböztethetjük forrása, illetve előállítási módja alapján, de a három legnagyobb kategória a kék, szürke és a zöld hidrogén. A megújuló kapacitások hasznosítása kapcsán a zöld hidrogén a releváns, melyet a víz elektrolízisével állítanak elő. Az így előállított hidrogént tárolni kell föld alatti tárolókban vagy kisebb méretekben nyomástartó edényekben. Fontos kiemelni, hogy a hidrogén tárolása nagy nyomáson kell történjen, lévén, hogy a legkönnyebb elem, így nagy a kiszökés esélye. A hidrogén később felhasználható üzemanyagként, tüzelőanyagként, valamint hidrogén tüzelőanyagcellákban.

Az EU-s tagállamok kitűzték célul a földgáz- és olajfelhasználás csökkentését, alternatívaként pedig a hidrogén került előtérbe. A prognózisok szerint köszönhetően a jelentős beruházásoknak világszerte az alacsony károsanyag kibocsátással előállított hidrogén mennyisége 2030-re eléri a 30 millió tonnát. Ez energiatartalmat tekintve egyenértékű 100 billió köbméter földgázzal, illetve jelentős növekedés a jelenlegi 1 millió tonnához képest [1].

A hazai energiastratégiát [12] tekintve cél az évi 36000 tonna zöld, illetve egyéb karbonmentes és karbonszegény hidrogén előállítása 2030-ben. Ebből 20000 t/év karbonszegény hidrogén, 16000 t/év zöld és egyéb karbonsemleges hidrogén. Ezzel párhuzamosan az elektrolizáló kapacitásokat is 240 MW-ra növelnék. Továbbá a stratégia is potenciális és megvalósítható energiatárolóként tekint a hidrogénes technológiára. Jelenleg hazánkban a ma megtermelt és felhasznált hidrogén teljes egészében szürke hidrogén. Költségek szempontjából 2030-ig az ipar alacsony karbonlábnyomú hidrogénigényét a kék hidrogén tudná biztosítani, azonban a centralizált hidrogén előállítás mellett cél az elektrolízissel előállított karbonmentes és decentralizált hidrogéntermelés feltételeinek is a biztosítása. Ehhez számos intézkedést irányoztak elő:

1. „Nagy volumenű, helyi ipari igényt kielégítő centralizált termelési módok kiépülésének ösztönzése keretében megkezdődik a meglévő hidrogénelőállítási mód átalakítása a karbonlábnyom lényeges csökkentése céljából. A hidrogén előállításához kapcsolódó szén-dioxid megkötési és tárolási technológia (CCS) vonatkozásában az ösztönző szabályozási környezet és támogatási rendszer kialakítására is sor kerül.”

2. „A szórt, kis- és közepes közlekedési és energetikai igényt kielégítő decentralizált karbonmentes hidrogéntermelési módok ösztönzése.”
3. „Elektrolízis központok létrehozása fotovoltaikus (PV) és villamosenergia-hálózati mix alapú termelési pilotok indítása céljából.”
4. „A különböző hidrogéntípusokra vonatkozó származási garanciák (Guarantee of Origin) európai rendszerének létrehozása.”
5. „Új előállítási technológiák fejlődésének nyomon követése, nemzetközi együttműködések fejlesztése a piacérett megoldások mihamarabbi hazai alkalmazása érdekében.”

Összegezve azt láthatjuk, hogy a rövid távú energiatárolás megoldására az elektrokémiai tárolók, azon belül is a Li-ion, illetve a flow akkumulátorok jelenthetnek megoldást, míg hosszabb távon tisztán tárolói szempontokat figyelembe véve a szivattyús tározós erőmű, egyéb piaci szempontokat is szem előtt tartva, viszont a Power-To-Hydrogen technológiában is nagy potenciál rejlik. Vizsgálataim során erre a két rendszerre alkottam meg egy-egy modellt, mely historikus adatok alapján optimalizálja a tárolók működését. Az optimalizálás célja a lehető legnagyobb bevétel elérése.

## 2. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

### 2.1. *Akkumulátoros energiatárolás*

#### 2.1.1. KONCEPCIÓ

Az akkumulátoros energiatárolók nagyban hozzájárulhatnak a napelemes rendszerek által termelt profit növeléséhez. Ehhez azonban megfelelő méretezés és üzemeltetési algoritmus szükséges. Céлом egy olyan üzemeltetési modell kialakítása mely a rendelkezésre álló napelemtermelési adatok és villamosenergia-árak függvényében a lehető legmagasabb elérhető bevételt adja. Számos kutatás irányul arra a kérdésre, hogy a tárolót melyik piacon érdemes üzemeltetni. Napelempark esetén érdemes lehet számításba venni a kiegyenlítő-energia piacot, hiszen a korábban említettek értelmében a menetrendek pontatlansága jelentős kiegyenlítő-energia költséget eredményezhet a napelempark üzemeltetője, vagy a mérlegkör felelős számára.

Ugyanakkor a Day-Ahead Market is optimális lehet a tárolók számára, főként az akkumulátorok tulajdonságai, valamint a sugárzási profilok miatt [13]. Az optimalizálás többféleképpen is elvégezhető. A legtöbb módszer, kritérium és alkalmazás két fő kategóriába sorolható.

A valószínűségi módszerek olyan esetekben hasznosak, amikor kevés adat és kevés optimalizált kritérium áll rendelkezésre. Használhat statisztikai, valamint sztochasztikusan generált adatokat is. A villamosenergia-tárolók optimalizációja gyakran Mixed Integer Nonlinear Programming alapon történik, ami komplex folyamat és hosszú ideig tart.

Az analitikus, leíró modellek repetitív számításokat végeznek állandó paraméterekkel egy megadott időtartamra. A módszer hatékony, nagy felbontású adathalmaz esetén viszont hosszú futásidővel rendelkezik.

A munkám során a [13] forrás modelljét vettem kiindulási alapnak, viszont ebből egy saját modellt hoztam létre. Egy év historikus napsugárzási adataival dolgoztam, erre az évre optimalizáltam a tároló működését. Elektrokémiai tárolókból is több típust vizsgáltam, minden esetre elvégeztem az optimalizálást. A hálózat irányába kétirányú teljesítményáramlás lehetséges, azaz a hálózatról vásárolt energiát az akkumulátor töltésére használjuk. Igényeket nem határoztam meg, csupán a rendelkezésre álló adatokból számolta ki a modell a lehető legnagyobb elérhető bevételt, a tároló degradációjának figyelembevételével is. Ez egy egyszerűsített mo-

dell, ugyanakkor a későbbiekben könnyedén bővíthető további pontosabb degradációs szimulációval, valamint átalakítható úgy, hogy a tároló a napelempark mentrendezési hibáiból adódó költséget csökkentse. A gazdasági értékelésemet nettó jelenérték számítással, illetve megtérülési idő számítással végeztem.

| Jelölés                 | Érték    | Forrás |
|-------------------------|----------|--------|
| $P_{nom}$               | 800 kW   | -      |
| $E_{nom}$               | 5000 kWh | -      |
| $\eta_c$ (Li-ion)       | 95%      | [10]   |
| $\eta_{dc}$ (Li-ion)    | 95%      | [10]   |
| $N_{nomcycle}$ (Li-ion) | 5000     | [13]   |
| $\eta_c$ (VRFB)         | 80%      | [10]   |
| $\eta_{dc}$ (VRFB)      | 80%      | [10]   |

1. táblázat: Elektrokémiai tárolók paraméterei

### 2.1.2. TÁROLÓK MODELLEZÉSE

A hálózati teljesítményegyensúly a következőképpen írható fel:

$$P_g(t) = P_{pv}(t) + P_{discharge}(t) - P_{charge}(t) \quad (2.1)$$

Ahol  $P_{pv}(t)$  a napelemes egység által leadott teljesítmény,  $P_g(t)$  a hálózatba táplált vagy onnan vételezett teljesítmény,  $P_{charge}(t)$  az akkumulátor által felvett,  $P_{discharge}(t)$  pedig az akkumulátor által leadott teljesítmény. Ezzel párhuzamosan  $P_g(t)$  előjele pozitív, amikor a hálózatba táplálunk villamos energiát, negatív, amikor a hálózatból vételezünk.

Az akkumulátoros egységre vonatkozó teljesítmény és töltöttségi szint limitek:

$$P_{charge}(t) \leq P_{nom} \quad (2.2)$$

$$P_{discharge}(t) \leq P_{nom} \quad (2.3)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (2.4)$$

$$SOC_{min} = 0.2 \cdot SOC_{max} \quad (2.5)$$

$$SOC_{flowmin} = 0 \quad (2.6)$$

$$SOC_{init} = SOC_{end} = SOC_{min} \quad (2.7)$$

Ahol  $P_{nom}$  az akkumulátor névleges töltési, illetve kisütési teljesítménye,  $SOC_{min}$  és  $SOC_{max}$  a maximális és minimális töltöttségi szintek százalékos alakban. A Li-ion akkumulátoros egységek élettartama szempontjából elkerülendő, hogy teljes mértékben kisüssük őket, ezért az  $SOC_{min}$  a 2.5-es egyenlet alapján írható fel. Ezzel szempontból a flow akkumulátoroknál ezt nem kell figyelembe venni. Az  $SOC(t)$  az aktuális töltöttségi szint. A modellben az akkumulátort egy közel egész éves időtartamon belül vizsgálom, a vizsgált időszak végén a töltöttségi szint meg kell egyezzen a kezdeti töltöttségi szinttel.

A rendszer kétirányú teljesítményáramlást tesz lehetővé, a villamosenergiával kereskedünk. Cél a bevétel maximalizálása, így a kereskedelem által a termelés egyenetlenségeit ki tudjuk egyenlíteni, valamint az esetlegesen fennmaradó szabad akkumulátorkapacitást is ki tudjuk használni és az alacsony áron vásárolt villamosenergiát el tudjuk tárolni. Egy egyszerűsített degradációs modell is beépítésre került, mely minden egyes ciklushoz egy költséget rendel. Ezt a költséget a kezdeti beruházási költség ( $C_{inv}$ ) és a tervezési ciklusszám ( $N_{nomcycle}$ ) hányadosaként határoztam meg, ez a 2.8-as egyenletben látható:

$$C_{cycle} = \frac{C_{inv}}{N_{nomcycle}} \quad (2.8)$$

Ezek alapján a modell célfüggvénye a következőképpen írható fel:

$$\left( \sum_{t=1}^{8752} P_g(t) \cdot \Delta t \cdot c_{electr}(t) - N_{cycle}(t) \cdot C_{cycle} \right)_{max} \quad (2.9)$$

A 2.9-es egyenletben a villamosenergia-kereskedelemből származó bevétel látható, ahol  $c_{elec}(t)$  a villamosenergia ára az adott órában,  $N_{cycle}(t)$  az adott óráig lezajlott ciklusok száma,  $C_{cycle}$  pedig az egy ciklusra vonatkozó költség. 8752 időpont van, hiszen a 2022-es évre vonatkozóan ezek a napsugárzási adatok álltak a rendelkezésemre. Célunk, hogy a bevétel a lehető legnagyobb legyen.

Az akkumulátor töltöttségi szintjének a változása a következőképpen írható fel:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + (P_{charge}(t) \cdot \Delta t \cdot \eta_c - P_{discharge}(t) \cdot \Delta t \cdot \eta_{dc}) / E_{nom} \quad (2.10)$$

Ahol  $SOC(t)$  az aktuális töltöttségi szint,  $SOC(t-1)$  a töltöttségi szint az előző óra végén,  $P_{charge}(t)$  az adott órában az akkumulátor töltésére felhasznált teljesítmény,  $\eta_c$  a töltés hatásfoka,  $P_{discharge}(t)$  az akkumulátor által a hálózatba táplált teljesítmény,  $\eta_{dc}$  pedig a kisütés hatásfoka.



## 2.2. Hidrogénes energiatárolás

### 2.2.1. KONCEPCIÓ

A rendszer egy napelemes egységből, elektrolizálóból, kompresszorokból, egy hidrogén tartályból, valamint hidrogén tüzelőanyagcellából áll. Az elsődleges szempont a tervezés során a villamosenergia-tárolás volt, ugyanakkor a megtermelt hidrogénnel kereskedni is lehet, így a rendszer zöld hidrogén biztosítására is képes. Ebben az esetben is a Day Ahead Market árait vettem alapul a villamosenergia-árának meghatározásakor. A rendszer hátránya, hogy viszonylag sok komponensből áll, így az igények változásait lassabban követi le, viszont hosszabb távú tárolásra is alkalmas.

A modell kialakítása során a [14] forrás modelljét vettem kiindulási alapnak, ugyanakkor egyszerűsítésekkel és átalakításokkal egy saját modellt alkottam meg. Ennél a modellenél is érvényes, hogy historikus adatokra alapul, illetve a beruházásnál nem vettem figyelembe a különböző támogatási formákat, melyeket a hazai és nemzetközi hidrogénstratégiák is előírányoztak. A zöld hidrogén árával kapcsolatban nagyon vegyes értékeket adnak a források, így egy érzékenységvizsgálatot is végeztem, melyben az 1-10 eurós tartományon megvizsgáltam, hogy az ár változása hogyan befolyásolja a bevételt, a tároló töltöttségi szintjét, valamint az elkereskedett hidrogén mennyiségét. A gazdasági értékelést nettó jelenérték számítással, valamint megtérülési idő számítással végeztem.

| Jelölés       | Érték      | Forrás |
|---------------|------------|--------|
| $P_{nom}$     | 800 kW     | -      |
| $C_{tank}$    | 128 kg     | -      |
| $H_H$         | 39 kWh/kg  | [14]   |
| $p_{stand}$   | 1 bar      | -      |
| $p_{ref}$     | 200 bar    | [14]   |
| $p_{refcomp}$ | 2,1 kWh/kg | [14]   |
| $p_{comp}$    | 350 bar    | [14]   |
| $\eta_{elec}$ | 0,73       | [14]   |
| $\eta_{HFC}$  | 0,47       | [14]   |

2. táblázat: A hidrogénes rendszer paraméterei

## 2.2.2. TÁROLÓ MODELLEZÉSE

A hálózati teljesítményegyensúly a következőképpen írható fel:

$$P_g(t) = P_{PV}(t) + P_{discharge}(t) - P_{charge}(t) \quad (2.11)$$

Ahol  $P_{PV}(t)$  a napelemes egység által leadott teljesítmény,  $P_g(t)$  a hálózatba táplált vagy a hálózatból vételezett teljesítmény,  $P_{discharge}(t)$  az hidrogén tüzelőanyagcella által leadott teljesítmény,  $P_{charge}(t)$  pedig a hidrogén előállítására és tárolására fordított teljesítmény, amely két nagy komponensből tevődik össze: az elektrolizálók és a kompresszorok által felvett teljesítményből.  $P_g(t)$  előjele pozitív, amikor a hálózatba táplálunk villamos energiát, negatív, amikor onnan vételezünk.

$$P_{charge}(t) \leq P_{nom} \quad (2.12)$$

$$P_{discharge}(t) \leq P_{nom} \quad (2.13)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (2.14)$$

$$SOC_{init} = SOC_{end} \quad (2.15)$$

$$SOC_{init} = 0.5 \quad (2.16)$$

A  $P_{nom}$  a tároló nominális töltési és kisütési teljesítménye,  $SOC_{min}$  és  $SOC_{max}$  a maximális és minimális,  $SOC(t)$  az aktuális töltöttségi szintek százalékos alakban. A modell közel egy éves időtartamot vizsgál. Kétirányú teljesítményáramlás lehetséges, a villamos energiával kereskedünk. Cél a bevétel maximalizálása, ehhez a napelemes rendszer a teljesítményt vagy leadja a hálózatba, vagy a tároló töltésére fordítja. Mindezek mellett a hidrogénnel is kereskedünk, azaz a megtermelt hidrogénnek csak egy része fordítódik ismét villamosenergia-termelésre, egy részét zöld hidrogént eladjuk.

A tároló töltöttségi szintjének változása a következőképpen írható fel:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \left( \frac{P_{charge}(t) \cdot \Delta t}{D_c} - \frac{P_{discharge}(t) \cdot \Delta t}{D_{dc}} \right) / C_{tank} \quad (2.17)$$

Ahol  $SOC(t-1)$  a töltöttségi szint az előző óra végén,  $P_{charge}(t)$  a töltésre fordított teljesítmény,  $D_c$  az egységnyi energiából előállított hidrogén mennyisége,  $P_{discharge}(t)$  a kisütés során előállított teljesítmény,  $D_{dc}$  az elektrolizáló által egységnyi tömegű hidrogénből termelt villamos energia mennyisége,  $C_{tank}$  pedig a hidrogéntartály kapacitása.

$$D_c = p_{refcomp} \cdot \frac{\ln \frac{p_{comp}}{p_{standard}}}{\ln \frac{p_{ref}}{p_{standard}}} + \frac{H_H}{\eta_{elec}} \quad (2.18)$$

$$D_{ac} = H_H \cdot \eta_{HFC} \quad (2.19)$$

$p_{refcomp}$  a kompresszorok fogyasztása egységnyi tömegű hidrogén összekomprimálása során,  $p_{comp}$  a kompresszorok normál üzemi nyomása,  $p_{ref}$  a kompresszorok standard üzemi nyomása,  $p_{standard}$  pedig a standard környezeti nyomás.  $H_H$  a hidrogén tömegegységre vonatkoztatott égéshője,  $\eta_{elec}$  az elektrolizáló hatásfoka,  $\eta_{HFC}$  a hidrogén tüzelőanyagcella hatásfoka.

Ezek alapján a célfüggvény a következőképpen írható fel, ahol  $D_H$  a kereskedett hidrogén mennyisége,  $c_{hidr}(t)$  a hidrogén ára:

$$\left( \sum_{t=1}^{8752} P_g(t) \cdot \Delta t \cdot c_{electr}(t) + D_H(t) \cdot c_{hidr}(t) \right)_{max} \quad (2.20)$$

### 2.3. Értékelési szempontok

Az értékelés során műszaki és gazdasági szempontok szerint is megvizsgálom a tárolók működését. Az akkumulátorok esetében elengedhetetlen a tervezési élettartam figyelembevétele, ehhez pedig szükség van az aktuális ciklusszám ismeretére. Megvizsgálom, hogy mekkora hatása van a modellre a degradáció figyelembevételének, hiszen az alapjaiban megváltoztatja a modell működését.

$$N_{cycle} = \frac{\sum_{t=1}^{8752} |SOC(t+1) - SOC(t)|}{2} \quad (2.21)$$

Itt azért szükséges kettővel osztani, mert egy ciklusnak egy töltés-kisütés párt tekintünk, és a töltöttségi szint változása mind a kettőt magában foglalja, így ennek a fele lesz a valós ciklusszám.

Megvizsgálom mindemellett még az egy ciklusra jutó bevételt is, amit a következő módon határozok meg:

$$I_{cycle} = \frac{\sum_{t=1}^{8752} P_g(t) \cdot c_{electr}}{N_{cycle}} \quad (2.22)$$

A szakirodalomban az akkumulátoros egységre vonatkozó beruházási költségek széles tartományon belül változnak, így az értékelés során több értékpárt is vizsgálni fogok. Ez azért is kiemelt jelentőségű, mivel a modell a korábbiakban leírtak szerint a beruházási költség alapján határozza meg a degradációs költséget, ezért annak változása, hatással van az optimalizálásra. A teljes beruházási költség a következőképpen írható fel:

$$C_{total} = C_{energy} + \frac{C_{power}}{t_{dur}} \quad (2.23)$$

Ahol  $C_{total}$  a tároló teljes fajlagos beruházási költsége (Ft/kWh-ban),  $C_{energy}$  a tárolókapacitásra,  $C_{power}$  pedig a teljesítményre vonatkoztatott beruházási költség,  $t_{dur}$  pedig a tárolási időtartam. Ezt megszorozva a nominális tárolókapacitással kapjuk a teljes beruházási költséget.

$$C_{total,bat} = C_{total} \cdot E_{nom} \quad (2.24)$$

A hidrogénes egységénél a beruházási költség a komponensek beruházási költségeiből adódik. Ezekre az adatokra is különböző értékeket lehet találni a szakirodalomban.

$$C_{total,hidr} = C_{comp} \cdot n_{comp} + C_{trans} \cdot P_{trans} + C_{elec} \cdot P_{elec} + C_{tank} \cdot \frac{C_{tank}}{\rho_{hidr}} + C_{HFC} \cdot P_{HFC} \quad (2.24)$$

A gazdasági értékelés során a kapott bevételből nettó jelenértéket (NPV), megtérülési időt és az egy ciklusra jutó bevételt határozom meg. Ehhez a bevételt a következőképpen határozom meg:

$$I_{bat} = \sum_{t=1}^{8752} P_g(t) \cdot \Delta t \cdot C_{electr}(t) - P_{PV}(t) \cdot C_{electr}(t) \quad (2.25)$$

$$I_{hidr} = \sum_{t=1}^{8752} P_g(t) \cdot \Delta t \cdot C_{electr} + D_H(t) \cdot C_{hidr}(t) - P_{PV}(t) \cdot C_{electr}(t) \quad (2.26)$$

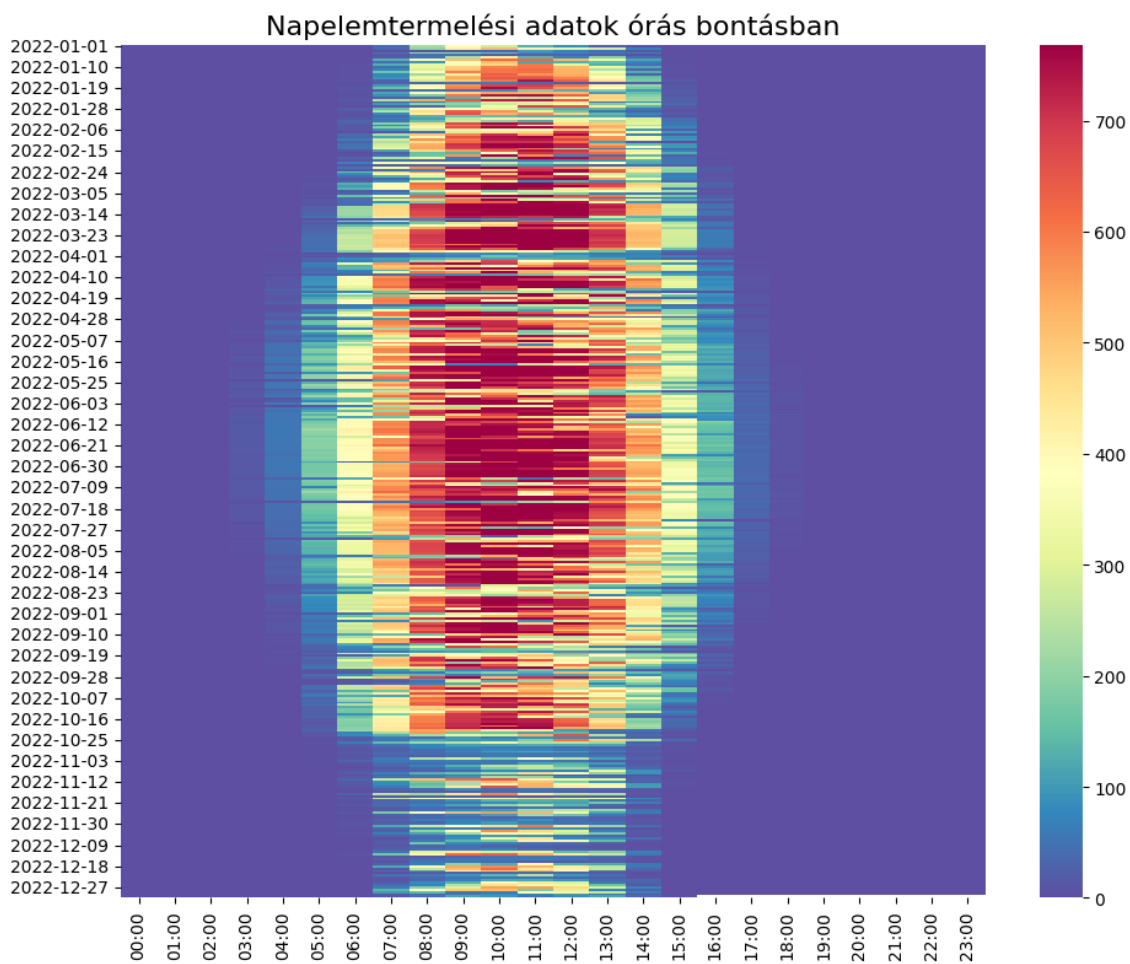
$$NPV = \sum_{t=1}^{8752} \frac{I - C_{O\&M}}{(1+r)^t} - C_{total} \quad (2.27)$$

Ahol  $I$  az éves bevétel,  $C_{O\&M}$  az éves berendezés karbantartási költsége, melyet a szakirodalom, illetve a bevett gyakorlat értelmében a beruházási költség 1%-ként határoztam meg,  $r$  a diszkontráta, melynek értéke 5%,  $C_0$  pedig az adott rendszer beruházási költsége.

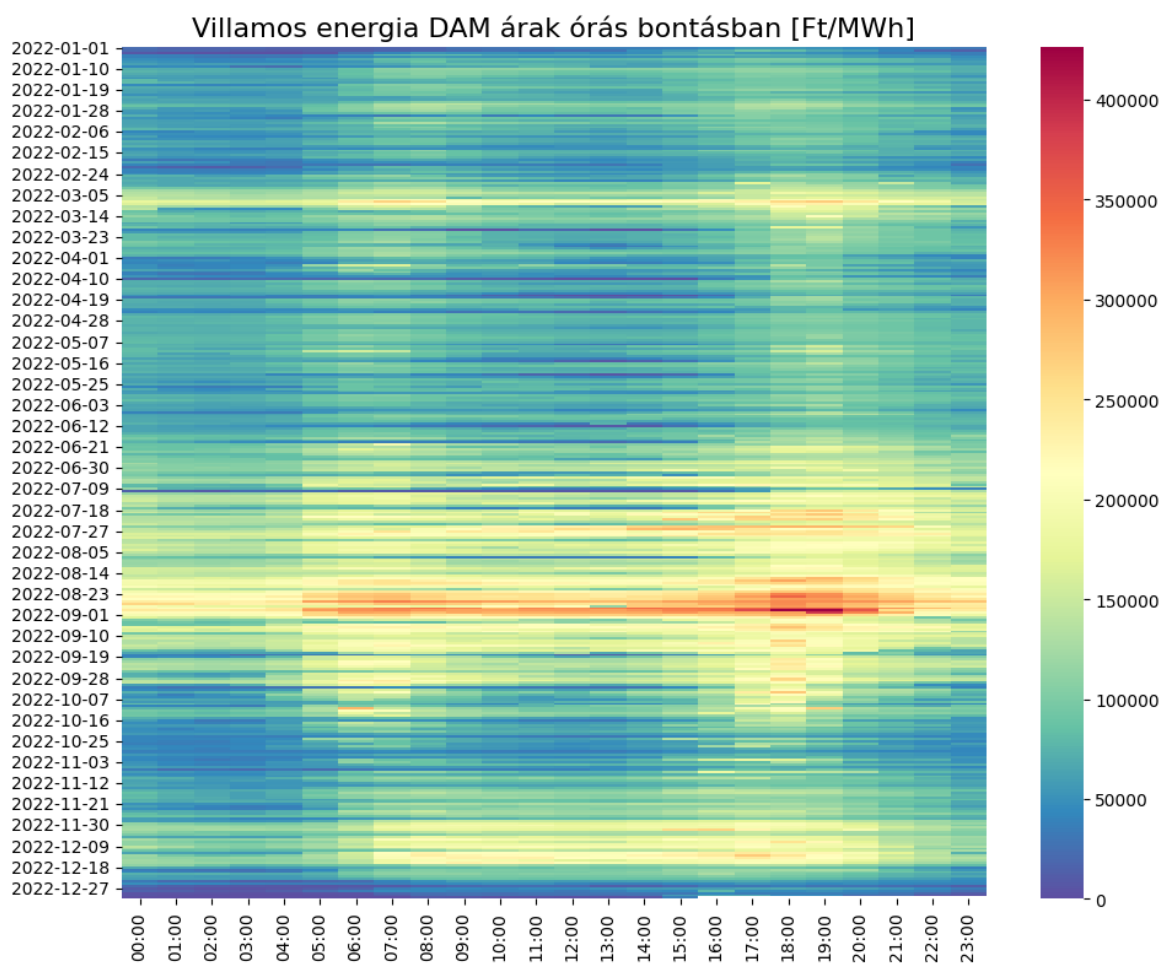
### 3. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

#### 3.1. Eredmények

A modell két meghatározó bemeneti paramétere az aktuális napelemes termelés, valamint a villamos energia piaci (DAM) ára. Ezek éves alakulása a következő két ábrán látható.



3. ábra: Napelemtermelési adatok óras bontásban



4. ábra: Villamos energia DAM árak órás bontásban

A hidrogén árának változása az árfolyamváltozásnak tudható be, jóval kevésbé volatilis, mint a villamosenergia-árak változása.

### 3.1.1. LI-ION AKKUMULÁTOROS RENDSZER EREDMÉNYEI

Lítium-ion akkumulátoros rendszer beruházási költségeire a szakirodalomban a következő adatokat lehetők fel:

| Forrás | Energiaköltség (\$/kWh) | Teljesítményköltség (\$/kW) |
|--------|-------------------------|-----------------------------|
| [2]    | 300-2500                | 900-4342                    |
| [10]   | 535-2250                | 1070-3650                   |
| [13]   | 250                     | 100                         |
| [15]   | 400-600                 | 1005                        |
| [16]   | 482                     | 1928                        |

3. táblázat: A szakirodalomban fellelhető beruházási költség adatok

Az adatok alapján kiválasztottam három értékpárt, amelyeken a számolásokat elvégzem, ezek pedig a következők: 250-100, 300-900, 500-1005. Amit fontos még kiemelni, hogy a tervezési ciklusszám 5000, ezt is szakirodalmi adatok alapján határoztam meg.

| Szenárió                   | $C_{total}$ [mFt] | $N_{cycle}$ [db] | $I_{cycle}$<br>[Ft/db] | NPV [mFt] | $n_r$ [év] |
|----------------------------|-------------------|------------------|------------------------|-----------|------------|
| 250 \$/kWh –<br>100 \$/kW  | 430,75            | 277,9            | 821227                 | 244,24    | 13         |
| 300 \$/kWh –<br>900 \$/kW  | 718,99            | 203,4            | 1080341                | -278,81   | -          |
| 500 \$/kWh –<br>1005 \$/kW | 1070,07           | 130,3            | 1588547                | -841,47   | -          |
| Degradáció<br>nélkül       | -                 | 418,7            | 559180                 | -         | -          |

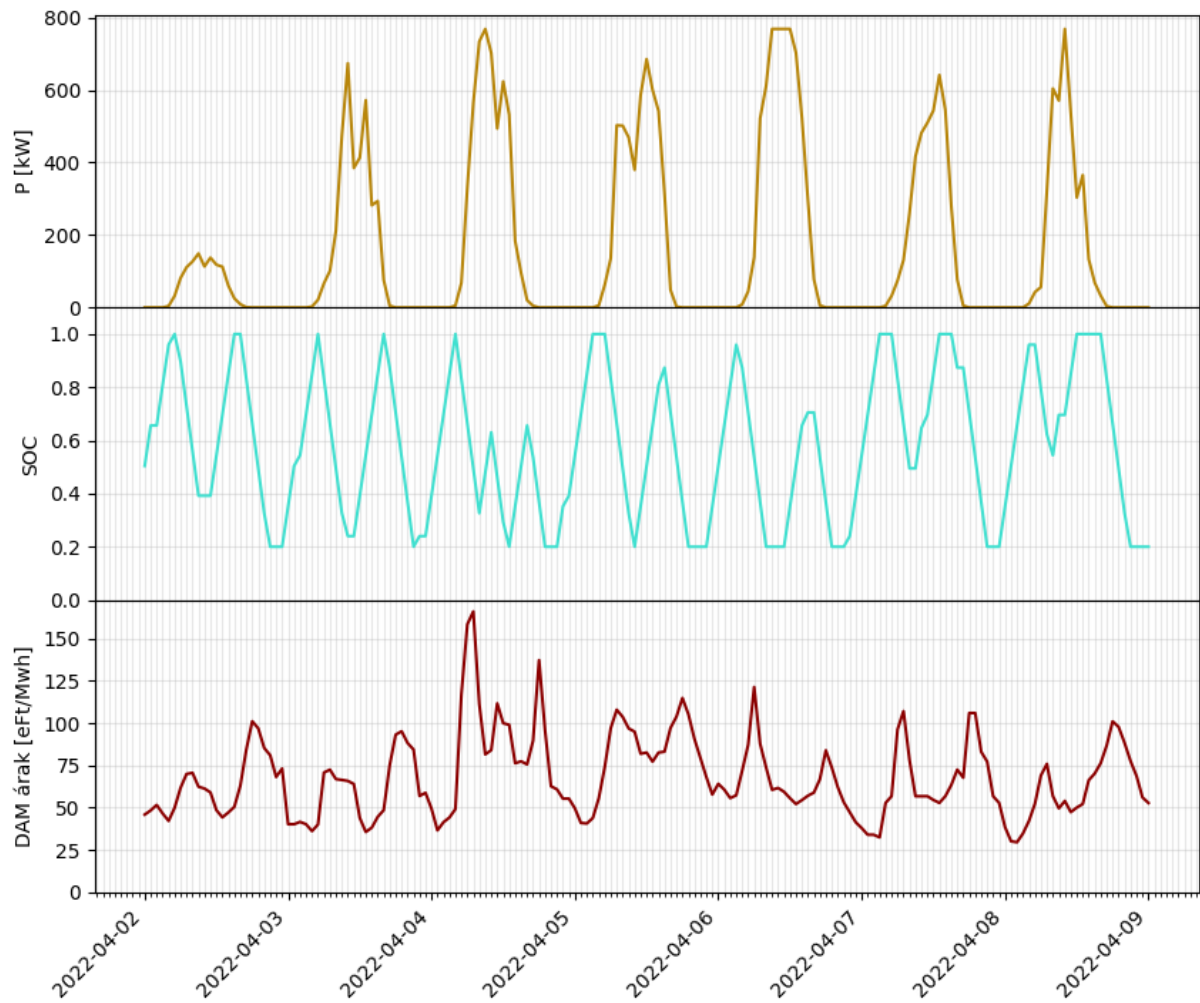
4. táblázat: Li-ion akkumulátorok eredményei

Az eredmények alapján látható, hogy a degradációs költség jelentős hatással van az optimalizálásra. Minél magasabb a beruházási költség, annál kevésbé éri meg a tárolót használni, ami látható a ciklusszámok csökkenéséből. Ugyanakkor az is megfigyelhető az egy ciklusra jutó bevétel nő, azaz csak akkor használjuk a tárolót, amikor igazán megéri. Az NPV értékét 25 éves időtartamra számoltam, hozzávetőlegesen ekkora a rendszer élettartama. Látható, hogy csak az első rendszer térül meg ezen az időtartamon belül. Összehasonlításképpen a degradáció figyelembevétele nélkül a ciklusok száma jelentősen magasabb, ezzel párhuzamosan az egy ciklusra jutó bevétel a legkisebb. Ez megfelel az elvárásoknak hiszen ebben az esetben a tárolót minden adandó alkalommal töltjük és kisütjük. Az eredmények alapján látható, hogy csak alacsony beruházási költség mellett térül meg a rendszer.

A Li-ion akkumulátorok elterjedése számos pozitív tulajdonságuknak tudható be. Hosszú élettartamuk, nagy energiasűrűségük, alacsony üzemeltetési és karbantartási költségük miatt bevett használatuk, nem csak a hálózati energiatárolásban, de az elektronikai eszközök és elektromos autók akkumulátoraként is. Hátrányuk a magas beruházási költség a többi technológiához képest, érzékenységük a magas hőmérsékletre, valamint a cellák védelme érdekében védelmi áramkörök beépítése szükséges.

Szemléltetésképpen kiválasztottam egy hetet, ahol több különböző időjárás állapot is megfigyelhető és ahol jól szemléltethető a tároló működése.

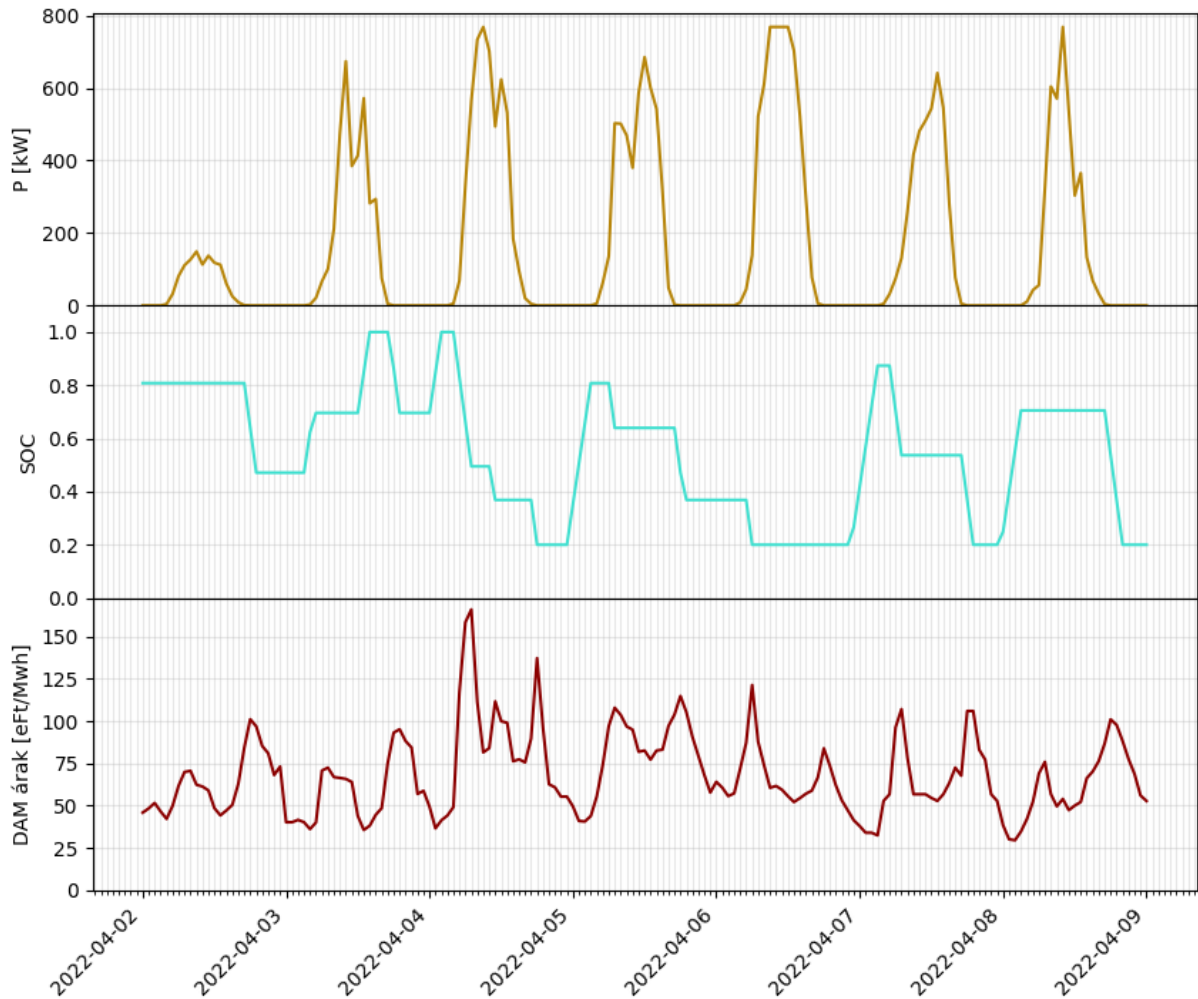
## Napelemtermelés, tároló töltöttségi szintek és villamosenergia-árak



5. ábra: A kiválasztott hét napelemtermelés, töltöttségi szint és villamosenergia-ár adatai degradáció nélkül



## Napelemtermelés, tároló töltöttségi szintek és villamosenergia-árak



6. ábra: A kiválasztott hét napelemtermelési, töltöttségi érték és villamosenergia-ár adatai a degradáció figyelembevételével

A grafikon látható az eltérés a két scenárió között. A feltételezésemnek megfelelően degradációval kalkulálva, nem minden adandó alkalommal történik töltés/kisütés. Degradáció nélküli esetben jól megfigyelhető a fluktuáció, ami a fogyasztási profilokra is jellemző, illetve az is látható, hogy az ciklusok jelentős részében a töltöttségi szint értékek szigorúan monoton módon változnak a minimum és maximum értékek között. Ezzel szemben degradációs esetben nagyobb a részleges töltés/kisütés száma.

### 3.1.2. FLOW AKKUMULÁTOROK EREDMÉNYEI

Flow akkumulátorok esetében a beruházási költségek kapcsán a következő adatok találhatóak meg a szakirodalomban.

| Forrás | Energiaköltség (\$/kWh) | Teljesítményköltség (\$/kW) |
|--------|-------------------------|-----------------------------|
| [10]   | 140-900                 | 530-1400                    |
| [11]   | 150-1000                | -                           |
| [16]   | 150-1000                | 600-1500                    |

5. táblázat: Flow akkumulátorok gazdasági paraméterei

Az adatok alapján ebben az esetben is kiválasztottam három értékpárt: 150-530, 300-900, 500-1200. Viszont ezeknek az akkumulátoroknak magasabb a tervezési ciklusszáma, ezt a számolás során 15000-nek vettem.

| Szenárió                   | $C_{total}$ [mFt] | $N_{cycle}$ [db] | $I_{cycle}$<br>[Ft/db] | NPV [mFt] | $n_r$<br>[év] |
|----------------------------|-------------------|------------------|------------------------|-----------|---------------|
| 150 \$/kWh –<br>530 \$/kW  | 380,22            | 156,9            | 1188159                | -0,637    | 26            |
| 300 \$/kWh –<br>900 \$/kW  | 718,99            | 135,5            | 1370089                | -439,43   | -             |
| 500 \$/kWh –<br>1200 \$/kW | 1120,59           | 115,7            | 159009                 | -945,19   | -             |
| Degradáció nél-<br>kül     | -                 | 186,6            | 1000720                | -         | -             |

6. táblázat: Flow akkumulátorok eredményei

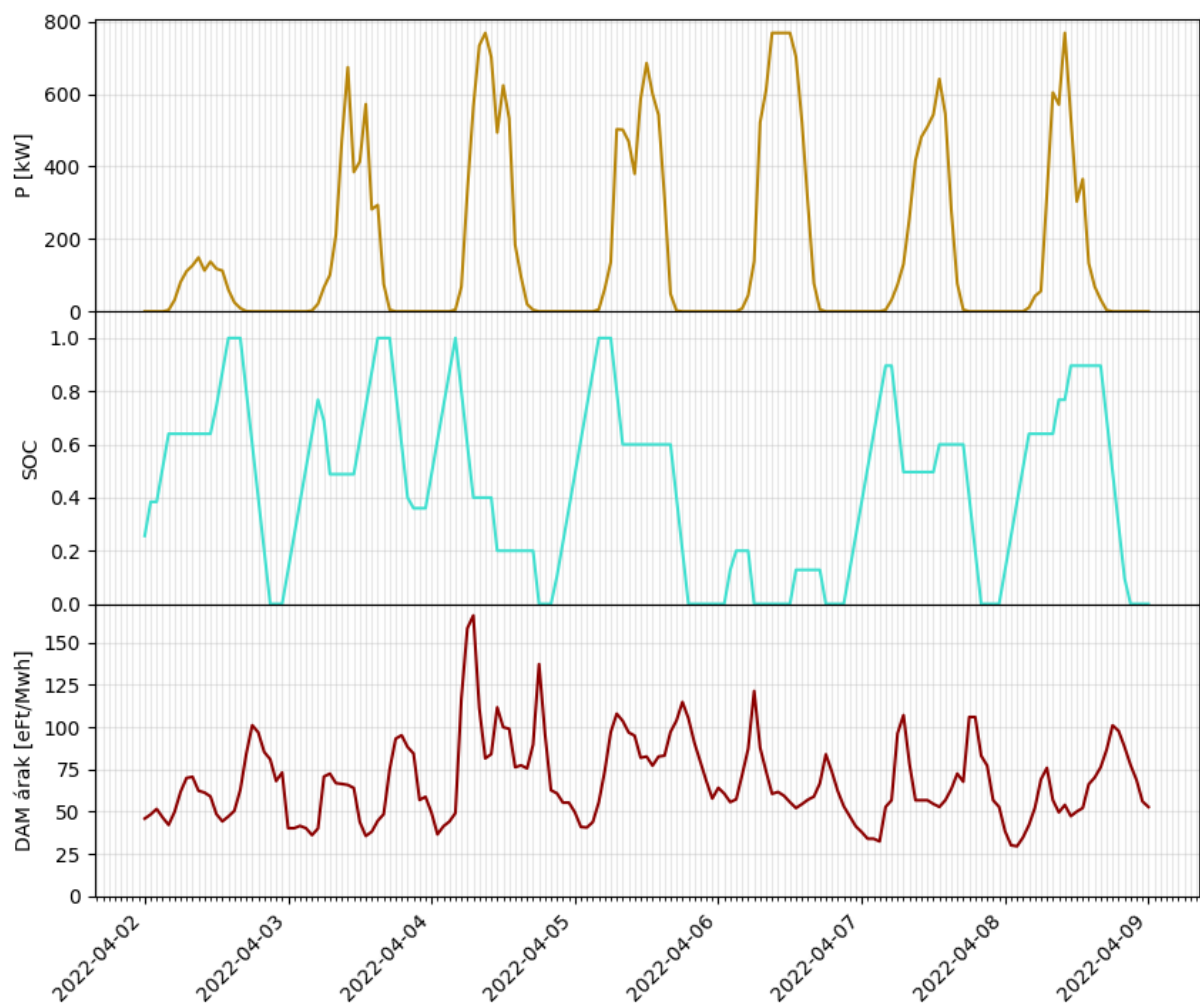
Az adatok és az eredmények alapján látható, hogy ezeknek a típusoknak alacsonyabb a beruházási költsége és magasabb a tervezési ciklusszáma, ugyanakkor köszönhetően az alacsonyabb hatásfoknak, degradáció nélkül is, de degradációval még jelentősen alacsonyabb a kisütési ciklusok száma, átlagban viszont magasabb az egy ciklusra jutó bevétel. Az is látható, hogy 25 éven belül csak egy a legalacsonyabb beruházási költséggel rendelkező eset térül meg, viszont ezeknek az akkumulátoroknak rövidebb az élettartamuk (5-15 év közé tehető).

A flow akkumulátorok használata előnyös lehet mégis, hiszen alacsony az önkisütési rátájuk és gyorsan le tudják követni a hálózati változásokat, ami annak a ténynek a tudható be, hogy az ionok áramlása nem áll le, független attól, hogy töltjük vagy kisütjük az akkumulátort [2][10].

Továbbá tárolási idő szempontjából is jobbak, mint a Li-ion technológiák. A teljesítményük és a tárolókapacitásuk független köszönhetően annak, hogy a teljesítmény a cellák számától és méretétől, míg a tárolt energia az alkalmazott elektrolit koncentrációjától függ. Előnyük továbbá, hogy nagy a megbízhatóságuk, alacsony az üzemeltetési és karbantartási költségük és ezen technológiánál lehetséges a teljes kisütés, nem befolyásolja az élettartamot. Hátrányuk az alacsony energiasűrűségük és a nagy helyigényük.

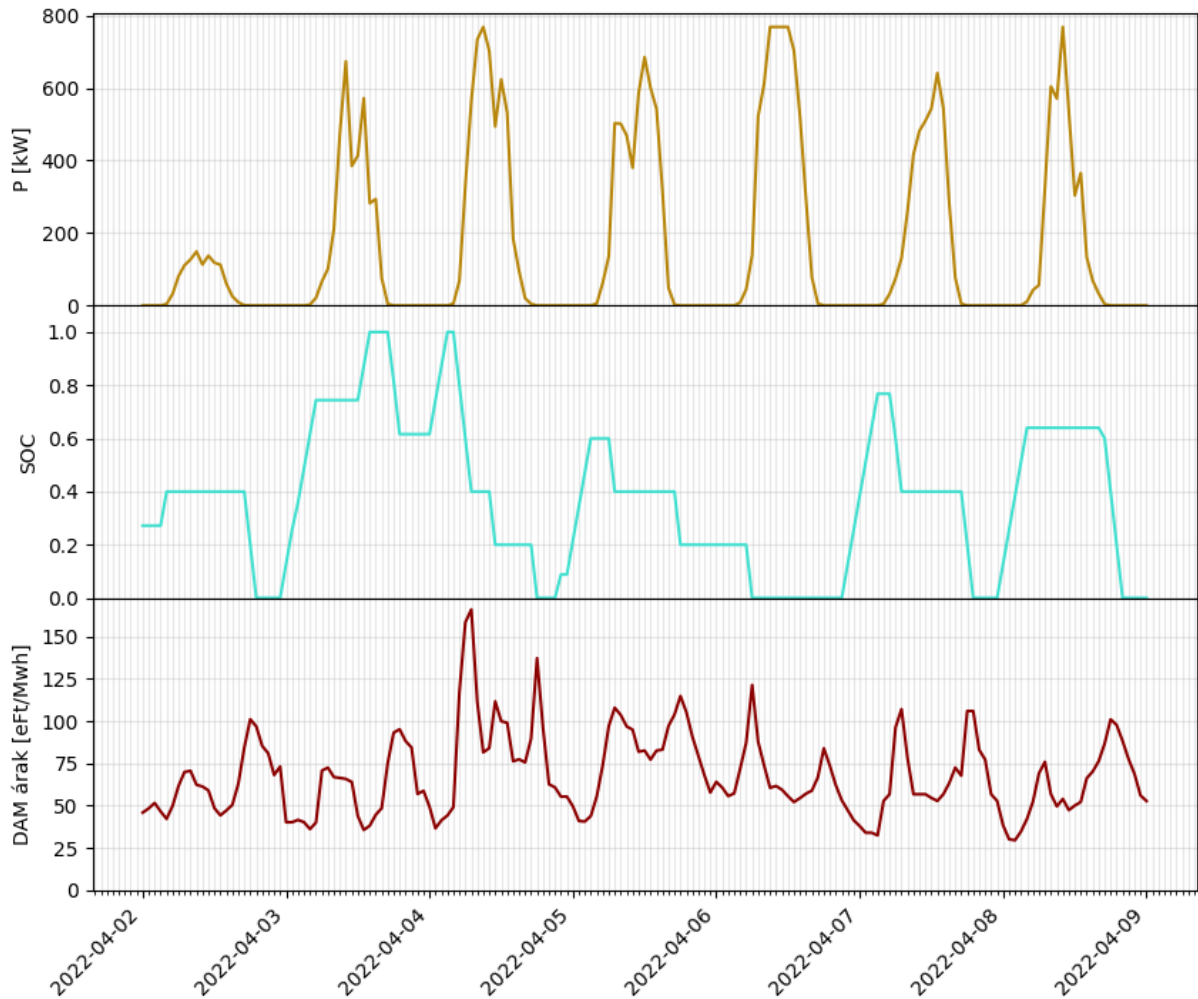
Ugyanazt a mintahetet vizsgálva a következő grafikonokat kapjuk:

### Napelemtermelés, tároló töltöttségi szintek és villamosenergia-árak



7. ábra: A kiválasztott hét napelemtermelési, töltöttségi érték és villamosenergia-ár adatai flow akkumulátor esetén degradáció nélkül

## Napelemtermelés, tároló töltöttségi szintek és villamosenergia-árak



8. ábra: A kiválasztott hét napelemtermelési, töltöttségi érték és villamosenergia-ár adatai flow akkumulátor esetén degradációval

Ennél a technológiánál is megfigyelhetőek az eltérések a két scenárió között, ugyanakkor kisebb a differencia. A Li-ion akkumulátorokkal összehasonlítva látható, hogy kisebb a töltések, kisütések frekvenciája, ez betudható az alacsonyabb hatásfoknak és ezzel a nagyobb veszteségeknek. A költségek csökkentésével, illetve a technológia fejlődésével ezen rendszereknek is van jövője, tekintve a pozitív tulajdonságaikat.

### 3.1.3. HIDROGÉNES ENERGIATÁROLÓ EREDMÉNYEI

A hidrogén tároló rendszer beruházási költségeire a szakirodalomban számos értéket lehet találni, így számításaim során ezek átlagértékével számoltam, melyek a következő táblázatban találhatóak:

| Berendezés                 | Beruházási költség       | Egységek száma |
|----------------------------|--------------------------|----------------|
| Kompresszor                | 3650 \$/egység           | 3              |
| Transzformátor             | 400 \$/kW                | 1              |
| Elektrolizáló              | 1182 \$/kW               | 1              |
| Hidrogén tartály           | 9295.5 \$/m <sup>3</sup> | 1              |
| Hidrogén tüzelőanyag cella | 46 \$/kW                 | 1              |

7. táblázat: A hidrogén rendszer gazdasági paraméterei [14]

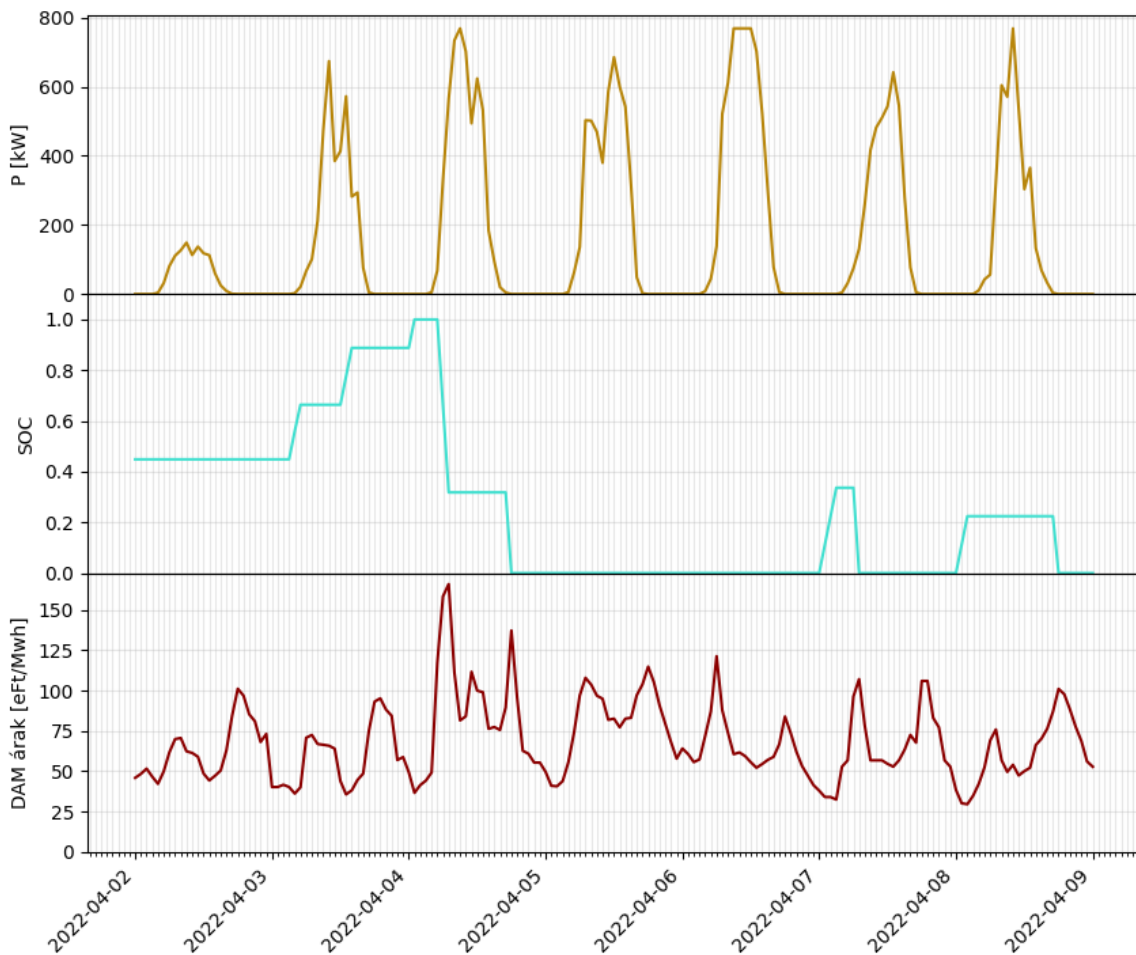
Ugyanakkor a rendszert és az optimalizálást nagyban befolyásolja a zöld hidrogén kereskedelmi ára, így erre végeztem egy érzékenységvizsgálatot és erre számoltam a kereskedett hidrogén mennyiségét, a hálózatba visszatáplált villamos energiát, a nettó jelenértéket, valamint a megtérülési időt. Az eredmények a következő táblázatban találhatóak:

| $C_{hidr}$ [€] | $D_H$ [kg] | $E_{fuelcell}$ [kWh] | $NPV$ [mFt] | $n_r$ [év] |
|----------------|------------|----------------------|-------------|------------|
| 1              | 171,62     | 99739,12             | -399,88     | -          |
| 2              | 484,22     | 97339,12             | -398,39     | -          |
| 3              | 1063,06    | 91100,92             | -394,74     | -          |
| 4              | 1797,85    | 88175,34             | -386,41     | -          |
| 5              | 2609,61    | 84975,86             | -374,62     | -          |
| 6              | 5733,33    | 71877,22             | -352,87     | -          |
| 7              | 10451,83   | 50632,86             | -307,72     | -          |
| 8              | 16419,99   | 40920,76             | -234,99     | -          |
| 9              | 22844,98   | 33147,17             | -127,49     | 100        |
| 10             | 30767,18   | 24192,16             | 19,82       | 23         |

8. táblázat: A hidrogén rendszer eredményei

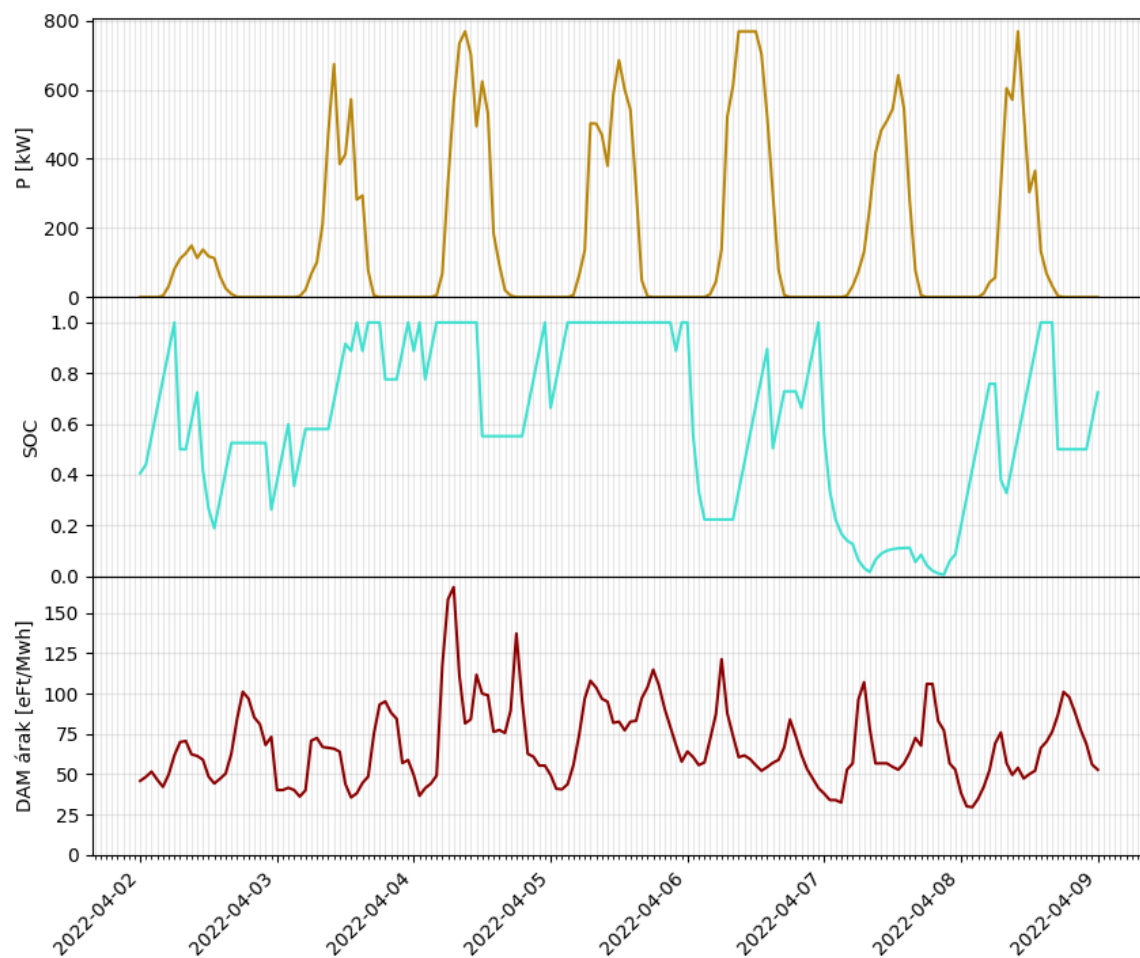
Szemléltetésképpen ebben az esetben is ugyanazon a mintahéten bemutatom a tároló töltöttségi szintjének változását a termelési adatok és a villamosenergia-árak változása mellett, továbbá a hidrogén árának hatását az eladott hidrogén, valamint a hálózatba visszatáplált energia mennyiségére.

### Napelemtermelés, hidrogén tartály töltöttségi szintek és villamosenergia-árak



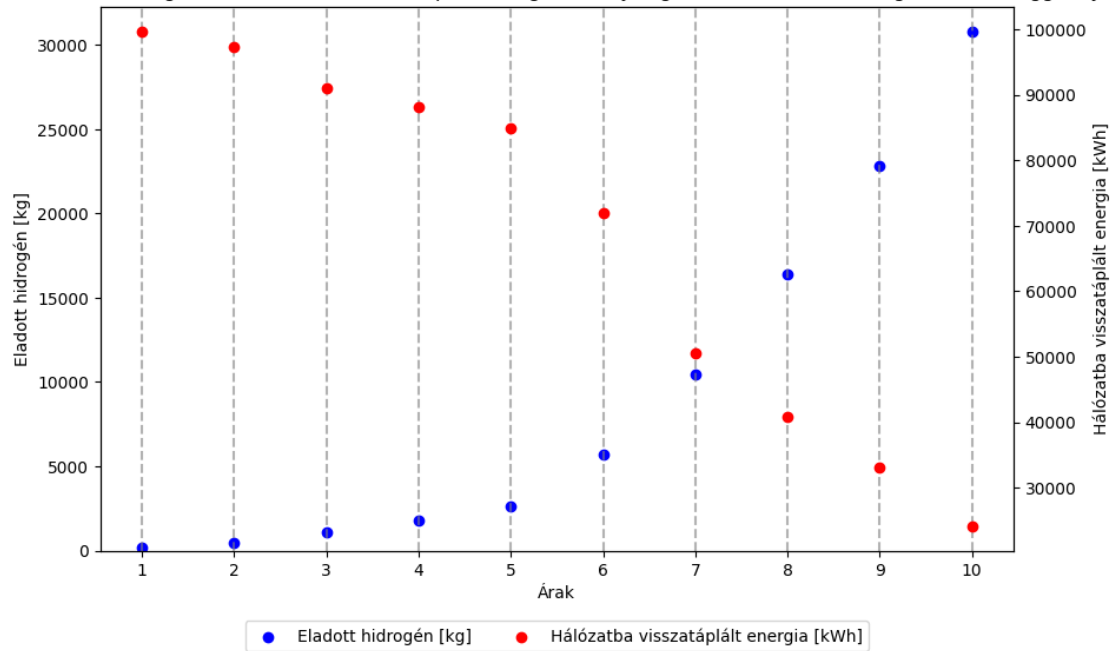
9. ábra: A napelemtermelési, töltöttségi szint és villamosenergia-ár adatok változása a kiválasztott héten alacsony zöld hidrogén ár esetén

## Napelemtermelés, hidrogén tartály töltöttségi szintek és villamosenergia-árak



10. ábra: A napelemtermelési, töltöttségi szint és villamosenergia-ár adatok változása a kiválasztott héten magas zöld hidrogén ár esetén

Az eladott zöld hidrogén és a hálózatba visszatáplált energia mennyiségének változása a hidrogén árának függvényében



11. ábra: Az eladott zöld hidrogén és a hálózatba visszatáplált energia mennyiségének változása a hidrogén árának függvényében

A grafikonokon látható, hogy a zöld hidrogén árának növekedésével a fókusz főként a tárolásra, illetve a hidrogén kereskedelemre helyeződik. Az 9. ábrán 1 euró/kg-os hidrogén árral számoltam, míg az 10. ábránál 10 euró/kg-ossal. A különbség szembetűnő. Sőt, nagyon alacsony árak mellett a tároló kihasználtsága is alacsony köszönhetően az alacsonyabb hatásfoknak, valamint a sok közbenső veszteségnek.



## 4. KÖVETKEZTETÉSEK

A munkám során több energiatárolási technológiához alkottam meg egy optimalizálási modellt, mely különböző műszaki és gazdasági paramétereket figyelembevéve szabályozza azok működését. Ehhez a Python programozási nyelvet és a Gurobi optimalizációs kiegészítőt használtam. A modellhez szükséges egyensúlyi egyenleteket és kényszereket kellett meghatároznom, illetve annak érdekében, hogy az optimalizálási probléma lineáris legyen, különböző bináris és döntési változókat kellett alkalmaznom. A számításaim során töltöttségi szint értékeket, hálózatra táplált teljesítmény és az ebből származó bevételt, valamint a hidrogénes tároló esetén az eladott hidrogén mennyiségét határoztam meg órás bontásban. A modell komplexitását jól mutatja a több tízezer folytonos és bináris változó, ennek ellenére viszonylag rövid, pár perces futási idővel rendelkezik mind a két típus esetén. Amennyiben nagyobb az adatsor felbontása, illetve hosszabb a vizsgált időtartam akkor természetesen növekedni fog a futási idő. A modell előnye, hogy ezen paramétereket könnyedén lehet módosítani, illetve néhány bemeneti érték megváltoztatásával más tároló típus működése is szimulálható.

Az eredmények alapján elmondható, hogy a napelemes rendszerek és az energiatárolás kombinációja a beruházási költségtől függően jelentős, akár 30%-os bevétel növekedést is eredményezhet. A megfelelő technológia megtalálása is kihívást jelent, hiszen előnyeik és hátrányaik más-más módon befolyásolják a működtetést. A Li-ion akkumulátorokat pozitív tulajdonságaik miatt egyre szélesebb körben alkalmazzák a hálózati energiatárolásban is, ugyanakkor ez a technológia csak a rövid távú tárolásra lehet megoldás, továbbá működtetése körülményes, számos aspektust nézve is érzékeny. Ezzel szemben a flow akkumulátorok alacsonyabb hatásfokkal rendelkeznek, viszont több ciklusra vannak tervezve. Kevésbé érzékeny technológia és intenzíven kutatott terület, így a jövőben várható előrelépés ezen a területen, valamint már napjainkban is működnek ilyen egységek, vagy van tervben ilyen akkumulátorok kiépítése. A hidrogénes rendszerek kiépítése energiatárolóként jelenleg nem gazdaságos, valamint az alacsony ciklikus hatásfok miatt nem is érdemes ilyen rendszerekre beruházni. Ugyanakkor a hidrogénkereskedelemben új lehetőségeket nyit meg ezen technológia. A zöld hidrogén egyre keresettebb termék lesz a piacon, valamint az EU-s és hazai energiastratégia is egyre nagyobb mértékben épít a zöld hidrogénre.

A későbbiekben szeretném a munkámat a profitmaximalizáláson túl a kiegyenlítetlenség témakörére fókuszálni és a tárolót oly módon alkalmazni, hogy a napelemes rendszerek menet-

rendezési hibáit ki tudja egyenlíteni, első körben historikus adatok alapján, aztán pedig prediktív módon is. Ehhez szükséges a kiegyenlítő energia piac és elszámolás alaposabb ismerete, valamint a menetrendezés mélyebb megértése. Továbbá, a munkám során egyszerűsített degradációs modellel, gazdasági számításokkal dolgoztam, ezeket a jövőben szeretném jobban kidolgozni.

## 5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka a 2021-2.1.1.-EK-2021-00001 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2021-2.1.1.-EK pályázati program finanszírozásában valósult meg.

## 6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] International Energy Agency (2022), *World Energy Outlook 2022*, [Online] Elérhető: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> Utolsó elérés dátuma: 2023.10.21.
- [2] LERA DEGUENON, DANIEL YAMEGUEU, SANI MOUSSA KADRI, ABOUBAKAR GOMNA (2023): *Overcoming the challenges of integrating variable renewable energy to the grid: A comprehensive review of electrochemical battery storage systems*, *Journal of Power Sources*, vol. 580, 1 October 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233343>
- [3] TAO HONG, SHU FAN (2016): *Probabilistic electric load forecasting: A tutorial review*, *International Journal of Forecasting*, vol. 32, Issue 3, July-September 2016, pp. 914-938, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2015.11.011>
- [4] A.T. ESEYE, M.LEHTONEN, T. TUKIA, S.UIMONEN, R.J. MILLAR (2019): *Optimal energy trading for renewable energy integrated building microgrids containing electric vehicles and energy storage batteries*, *IEEE Access* 7, pp. 106092-106101, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2932461.
- [5] Emerging Technology News (2020), *Classification of energy storage technologies: an overview*, [Online] Elérhető: <https://etn.news/energy-storage/classification-of-energy-storage-technologies-an-overview> Utolsó elérés dátuma: 2023.10.21.
- [6] SHAFIQR REHMAN, LUAI M. AL-HADHRAMI, MD. MAHBUB ALAM (2015): *Pumped hydro energy storage system: A technological review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, April 2015, pp. 586-598, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.040>
- [7] INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION, *Pumped hydro*, [Online] Elérhető: <https://www.hydropower.org/factsheets/pumped-storage> Utolsó elérés dátuma: 2023.10.21.
- [8] GEORGE CRABTREE, ELIZABETH KÓCS, LYNN TRAHEY (2015): *The energy-storage frontier: Lithium-ion batteries and beyond*, Cambridge University Press, 27 November 2015, [Online] Elérhető: <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-bulletin/article/energystorage-frontier-lithiumion-batteries-and-beyond/A0CE1F1D2F344EB6B362DA3C29DC2BD1>

- [9] PAPP MÁTÉ (2016): *Villamosenergia-tároló technológiák műszaki és gazdasági értékelése*, Szakdolgozat, BME GPK, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék
- [10] ZVONIMIR SIMIC, DANIJEL TOPIC, GORAN KNEZEVIC, DENIS PELIN: *Battery energy storage technologies review*, [Online] Elérhető: <https://ijeces.ferit.hr/index.php/ijeces/article/view/23/22> Utolsó elérés dátuma: 2023.10.23.
- [11] GRIGORIOS L. KYRIAKOPOULOS, GARYFALLOS ARABATZIS (2016): *Electrical energy storage systems in electricity generation: Energy policies, innovative technologies, and regulatory regimes*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 56, April 2015, pp. 1044-1067, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.046>
- [12] *Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája* (2021) [Online] Elérhető: <https://kormany.hu/dokumentumtar/magyarorszag-nemzeti-hidrogenstrategiaja> Utolsó elérés dátuma: 2023.10.23.
- [13] DARIUSZ BORKOWSKI, PIOTR ORAMUS, MICHAL BRZEZINKA (2023): Battery energy storage system for grid-connected photovoltaic farm – Energy management strategy and sizing optimization algorithm, Journal of Energy Storage, vol. 72, Part A, 15 November 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108201>
- [14] GUOMING YANG, HAO ZHANG, WENTING WANG, BAI LIU, CHAO LYU, DAZHI YANG (2023): *Capacity optimization and economic analysis of PV-hydrogen hybrid systems with physical solar power curve modeling*, Energy Conversion and Management, vol. 288, 15 July 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117128>
- [15] SALAD UD-DIN KHAN, IRFAN WAZEER, ZEYAD ALMUTAIRI, MESHARI ALANAZI (2022): *Techno-economic analysis of solar photovoltaic powered electrical energy storage (EES) system*, Alexandria Engineering Journal, vol. 61, Issue 9, September 2022, pp. 6739-6753, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.12.025>
- [16] ABRAHAM ALEM KEBEDE, THEODOROS KALOGIANNIS, JOERI VAN MIERLO, MAITANE BERECIBAR (2022): *A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 159, May 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112213>