

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
TERMÉSZETUDOMÁNYI KAR
NUKLEÁRIS TECHNIKAI INTÉZET
ATOMENERGETIKA TANSZÉK**

BAROSS BENCE

**5. FÉLÉVES ENERGETIKAI MÉRNÖK BSC. HALLGATÓ
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA
DOLGOZAT**

**Különböző energiatárolási technológiák vizsgálata nagy időfelbon-
tású szimulációk segítségével**

Témavezetők:

Biró Bence
PhD hallgató

Prof. Dr. Aszódi Attila
egyetemi tanár

Budapest, 2023

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	1
1. Bevezetés	2
2. Adatok és módszerek	6
2.1. PLEXOS szoftver és a modell	6
2.2. Vizsgált országok adatai:	7
2.3. Szivattyús tározós erőművek	7
2.4. Akkumulátoros villamosenergia-tároló	9
3. Eredmények	11
3.1. Szivattyús tározós erőmű	11
3.1.1. Működési paraméterek	11
3.1.2. SZET üzemállapotok	14
3.2. Akkumulátoros energiatároló	19
3.2.1. Működési paraméterek	19
3.2.2. Üzemállapotok	22
3.2.2.1. Tél	22
3.2.2.2. Tavasz	24
3.2.2.3. Nyár	26
3.2.2.4. Ősz	27
3.2.2.5. Hőtérfépek	29
4. Összefoglalás/Eredmények értékelése	31
5. Felhasznált források	33

ELŐSZÓ

Mind a világ, a kontinens és az ország energiaellátása egyre inkább központi témává vált az utóbbi időben. Ez nem véletlen, hiszen az emberiség egyik legnagyobb céljának a fenntarthatóság elérésének, valamint az éghajlatváltozás kezelésének egyik fontos összetevője az energiaszektor. Ennek megfelelően az Európai Uniónak célja, hogy 2050-re az energiaszektor is elérje a teljes karbonsemlegességet. Azért, hogy ezt a célt elérjük minden Európai Unió belüli országnak, köztük Magyarországnak is megvannak rövidebb és hosszabb távon is a saját céljai, stratégiái. Ahhoz, hogy ezeket a célokat elérhessük nagyon sok változásra van szüksége a teljes energetikai szektornak. Beleértve ebbe műszaki, környezetvédelmi, társadalmi, valamint gazdasági fejlesztéseket is. Magyarország elsősorban azon dolgozik, hogy a fosszilis energiahordozókat kivezesse az energiaszektorból, megújuló energiatermelők beépített kapacitásának növelésével. A megújuló részarányának növekedésével viszont, azok nehéz tervezhetősége miatt szükségessé válik energiatárolók telepítése is.

Ebben a dolgozatban a magyar és a szomszédos országok villamosenergia-rendszerét modellezem az Energy Exemplar PLEXOS szoftverének segítségével. A felépített modelleken végzett órás felbontású szimulációkkal pedig megvizsgálom, hogy milyen hatással lenne Magyarország villamosenergia-rendszerére szivattyús tározós erőmű telepítése. Vizsgálom továbbá, hogy lítium ionos akkumulátorok milyen energiatermelő mellett, hogyan viselkednek a magyar rendszerben. Valamint, hogy ezek az energiatárolók milyen környezeti és gazdasági paraméterekkel lennének képesek üzemelni.

* * *

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani, Biró Bencének, valamint Prof. Dr. Aszódi Attilának, akik 2023 tavasza óta segítik munkámat témavezetőként. Tanácsaik és támogatásuk nélkül nem készülhetett volna el ez a dolgozat.

Ezen kívül szeretnék köszönetet mondani az Energy Exemplar-nek, hogy ingyenes hozzáférést biztosítottak számomra szoftverükhöz, ezzel lehetővé téve a dolgozat elkészülését.

Budapest, 2023. 11. 01.

Baross Bence

1. BEVEZETÉS

A klímaváltozás, a globális felmelegedés mindennapjaink részévé váltak és megkerülhetetlen témák az élet bármely területén. Nincs ez másképp az energiaszektorban sem. Látva ezeket a problémákat az Európai Unió és ennek következtében Magyarország is célul tűzte ki, hogy karbonsemlegessé tegye energiaiparát és elérje, hogy 2050-re nullára csökkenjen a szektor CO₂ kibocsátása. Ezeknek a céloknak az elérése érdekében kezdett bele Magyarország is a megújuló energiatermelők telepítésébe.

A teljes karbonsemlegesség elérésében mindenképpen kulcsszerep jut az energiatárolóknak a különböző országok villamosenergia rendszerében, hiszen a megújuló energiaforrások időjárásfüggő termelését ezen berendezésekkel lehet a legjobban kiegyenlíteni. Több lehetőségünk is van a villamosenergia-tárolásra [1], azonban ezek közül nem sok olyan módszer van, amelyik hosszútávon gazdaságos, köszönhetően a kevés töltés-kisütés ciklusuknak, kis energiasűrűségüknek, rossz hatásfokuknak vagy éppen drága alapanyagaiknak. Az energiatárolókat leggyakrabban aszerint csoportosítjuk, hogy milyen típusú energiát tárolnak el. Ez alapján léteznek villamos, elektrokémiai, kémiai, mechanikai, valamint hőenergia tárolók is. Leginkább elterjedt energiatároló típusok az energetikában az akkumulátorok, valamint a különböző helyzeti energia tárolásán alapuló tárolók. Ezek közül is a szivattyús tározós erőmű a legszélesebb körben alkalmazott. Komoly szerepet szánunk későbbiekben a hidrogénnek is, mint energiatárolási lehetőségnek, ez a technológia viszont még nagyon sok fejlesztést igényel, míg gazdaságossá tud válni. Akkumulátorok közül a legelterjedtebbek a lítium ion akkumulátorok gazdaságosságuk és kedvező műszaki tulajdonságaik miatt.

Magyarországon jelenleg is üzemben vannak energiatárolók, ezek főleg lítium-ion akkumulátortepek. Összes beépített kapacitásuk 2023-as adatok alapján [2] 28,18 MW / 37,05 MWh. Jelenleg 7 különböző akkumulátortelep üzemel ezzel az összkapacitással, ennek is majdnem fele (10MW) 1 energiatárolóhoz köthető Budapesten. Ebből is látszik, hogy a villamosenergia-tárolás Magyarországon még nem egy elterjedt piaci mechanizmus. Ennek ellenére a következő évtizedben jelentősen meg fog növekedni a beépített tározó kapacitás köszönhetően Magyarország távlati energiastratégiáinak [3].

Ezt a növekedést elősegítendő 2023. július 25-ig lehetett jelentkezni állami támogatásra energiatárolók telepítéséhez [4]. Ez a támogatás összesen 62 milliárd Ft értékben nyújt támogatást energetikai vállaltoknak energiatároló egységek telepítéséhez, valamint megépülésük és üzembehelyezésük után bevételkompenzáció is várható ugyanezen alapról. A támogatási rendszer

nagyságrendileg 400 MW beépített kapacitású akkumulátoros energiatárolók megépítését fogja eredményezni legkésőbb 2026-ig és jelentősen fog beleszólni a magyar villamosenergia-rendszerbe.

Nagy szerepe van a modern villamosenergia-rendszerben az energiatárolóknak, ugyanis a megújuló villamosenergia termelők ugrásszerű növekedésével hálózati stabilitási problémák léptek fel, mivel nagy lett az időjárásfüggő termelők aránya a rendszerben köszönhetően a kedvező támogatási feltételeknek. A megújuló energiatermelők elengedhetetlenek a karbonsemlegesség felé vezető úton, viszont hátulütőjük, hogy termelésük kevésbé menetrendezhető. Másik probléma, hogy a sok beépített fotovoltaikus napelem kapacitásnak köszönhetően napközben túltermelések alakulnak ki a napsütötte órákban, míg esti órákban energiahiánnyal küzd az ország villamosenergia-rendszere. Az első problémára megoldást nyújtanak az olyan energiatárolók, amelyek gyorsan képesek reagálni az esetleges hirtelen jelentkező termelési többletre, vagy éppen hiányra. Ilyen energiatárolónak tökéletes választás az akkumulátoros energiatároló. A második problémára pedig hosszabb tárolási ciklussal rendelkező energiatároló lehet a megoldás, mint például a szivattyús-tározós erőmű. A tárolók mind gazdasági előnyt jelentenének, mind pedig segítenék kiegyensúlyozottabbá tenni a villamosenergia-rendszert.

Natalia Naval és társai [5] mixed integer optimalizációt alkalmazva vizsgálták a szivattyús-tározós erőmű, napenergia és szélenergia kombinációját Spanyolországban, mindezt órás felbontásban. Az eredmények azt igazolják, hogy a szivattyús-tározós erőmű nagymértékben csökkenti a villamosenergia költségeket, valamint kulcsszerepet játszik a nagyobb megújuló energiatermelés aránnyal rendelkező villamosenergia-rendszerek biztonságában és stabilitásában.

Jianling Li és munkatársai [6] pedig arra a következtetésre jutottak Észak-Nyugat Kínát vizsgálva, hogy a szivattyús tározós erőművek nagymértékben hozzá tudnak járulni ahhoz is, hogy a villamosenergia-rendszer kisebb CO₂ kibocsátást tudjon elérni. Megállapították még, hogy ilyen tároló kapacitások bővítésével tovább növelhető a megújuló energiatermelők aránya a rendszeren belül.

Chi Kong Chyong és David Newbery tanulmányukban [7] a szivattyús tározós erőművek profitabilitását vizsgálták a nagy britanniai villamosenergia-rendszerben. Arra az eredményre jutottak, hogy a náluk jelenleg működő 4 szivattyús tározós erőmű jelentős profitot termelt, főleg a kiegyenlítő piacon, az utóbbi években. Ez azt is jelenti, hogy az utóbbi években tapasztalt megújuló energiatermelők beépített kapacitásának növekedése gazdasági lehetőséget biztosít a tárolóknak.

Youngjun Ko és munkatársai [8] azzal foglalkoztak tanulmányukban, hogy miként fogják szolgálni a szivattyús tározós erőművek a koreai villamosenergia-rendszert. Koreában 2030-ra 20 százalékra szeretnék növelni a megújuló energiatermelők részarányát és ezzel együtt szeretnék szivattyús tározós erőművet is építeni, hogy azokkal tegyék gazdaságossá a termelést, valamint stabilabbá a rendszerüket. Ez a tanulmány szerint egy jó stratégia és a szivattyús tározós erőművek képesek lesznek ellátni feladatukat profittermelés mellett.

Bjarne Steffen [9] tanulmányában összegezte Németország szivattyús tározós erőmű beruházásait. Megállapította, hogy a jövőben egyre több ilyen beruházás várható köszönhetően a megnövekedett megújuló energia részaránynak a villamosenergia-termelésben. Eredményeiben azt emeli ki, hogy a tárolók profitábilis működtetése jelenthet kihívást, de a kilátások javulnak.

Masoume Shabani és társai [10] tanulmányukban azt vizsgálták, hogy egy Svédországi területre milyen hatással lenne fotovoltaikus napenergia, szélenergia, szivattyús-tározós erőmű, illetve akkumulátoros energiatároló alkalmazása. Számításaik azt mutatták ki, hogy mindkét energiatárolási technológia teljes mértékben kielégítő megoldást nyújt a megújulók kezelésére.

A.G. Olabi és munkatársai [11] tanulmányukban vizsgálták SWOT analízis segítségével, hogy melyik akkumulátoros energiatároló a legalkalmasabb villamosenergia-tárolásra a villamosenergia-rendszerben. Arra a megállapításra jutottak, hogy a lítium-ion akkumulátorok jó pozícióban vannak ahhoz, hogy a jövőben domináns akkumulátor típusá váljanak.

Mazaher Haji Bashi társaival együtt [12] vizsgálta, hogy az írországi villamosenergia-rendszerbe milyen lépések vezetnek oda, hogy tovább növekedhessen az ország megújuló energia termelése. Tanulmányukban külön figyelmet fordítottak az akkumulátoros energiatároló egységekben rejlő lehetőségekre. Megállapították, hogy az akkumulátoros energiatárolás az írországi energiatároló portfólió legfőbb komponense lehet és hozzájárulhat ahhoz, hogy az ír villamosenergia-termelés rugalmas tudjon maradni, kielégítve a fogyasztói igényeket.

Mukrimin Sevket Guney és társa [13] összehasonlították a különböző energiatároló típusokat technológiai és gazdasági szempontokat figyelembe véve és arra a megállapításra jutottak, hogy a villamosenergia-rendszer problémáinak megoldására a mechanikus energiatárolók és az akkumulátorok nyújtanak megfelelő megoldást.

Arvind Rangarajan és munkatársai [14] tanulmányukban azt vizsgálták, hogy milyen hatással van akkumulátoros energiatárolók telepítése az Ausztrál villamosenergia-rendszer frekvencia-

szabályozására. Arra a megállapításra jutottak, hogy az akkumulátoroknak köszönhetően jelentősen csökkenthetőek a frekvenciaszabályozásra fordított költségek, ezzel párhuzamosan pedig lehetőség nyílik nagyobb mértékű megújuló energiaforrás használatra.

Zakariya Dalala és társai [15] PLEXOS szoftver segítségével modellezték Jordánia villamosenergia-rendszerét és vizsgálták, hogy a megújuló energiatermelők arányának a növekedése milyen hatással van a rendszerükre. Arra a megállapításra jutottak, hogy a különböző energiatárolók szükségesek Jordánia villamosenergia rendszerébe ahhoz, hogy megfelelő mértékben lehessen növelni a megújuló energiatermelést és a rendszer stabilitása is megmaradjon.

Henrik Zsiborács és munkatársai [16] tanulmányukban azt vizsgálták, hogy milyen hatással van a naperőművek kihasználtságára akkumulátoros energiatárolók telepítése. Mennyiben segítik ezen erőművek termelésének a tervezhetőségét? A vizsgálatokat két ország, Belgium és Magyarország villamosenergia-rendszerére végezték el. Arra a megállapításra jutottak, hogy a naperőművek kihasználása nagyban növelhető akkumulátoros energiatermelők telepítésével.

Az irodalomkutatásom során nem találtam olyan munkát, amely Magyarország és a szomszédos országok villamosenergia rendszerét modellezte volna tároló kapacitások figyelembevételével. Ez alapján a dolgozatom célja az, hogy felépítsem a magyar és a szomszédos országok villamosenergia rendszerét 2030-ra és különböző energiatárolási scenáriókat vizsgáljak meg a magyar rendszerre nézve az Energy Exemplar PLEXOS szoftverének segítségével. Dolgozatom a következő kérdésekre keresi a választ:

- Milyen hatással lenne Magyarország energiaellátására egy szivattyús tározós erőmű telepítése?
- A villamosenergia-rendszeren belül hová érdemes inkább akkumulátorokat telepíteni: naperőművek, szél erőművek, nukleáris erőmű mellé, vagy inkább közvetlenül a hálózatra érdemes kapcsolni őket?
- Hogyan lennének képesek működni ezek az energiatárolók a magyar rendszerben?

A dolgozat következő fejezetében a kutatásom során felhasznált adatokat és módszereket mutatom be, valamint itt kerül bemutatásra a PLEXOS modellem is. A 3. fejezet tartalmazza a szimuláció eredményeit, míg a 4. fejezetben található az eredmények összefoglalása, valamint ez a fejezet tartalmazza az eredményekből levont konklúziókat is.

2. ADATOK ÉS MÓDSZEREK

Energiatárolók jövőbeli hatását a magyar villamosenergia-rendszerre órás felbontású szimulációk segítségével vizsgáltam. Ezekhez a vizsgálatokhoz az Energy Exemplar PLEXOS szoftverében építettem fel Magyarország és a szomszédos országok 2030-as villamosenergia-rendszerét. A modellezések célja az volt, hogy a szoftver az általam megadott, különböző erőművekre, illetve országokra vonatkozó adatok alapján eldöntse, hogy az éppen aktuális fogyasztói igényeknek megfelelően melyik erőművet érdemes működtetni úgy, hogy a fogyasztói igények teljes mértékben kielégüljenek, miközben a lehető legkisebb üzemeltetési költségek lépnek fel.

2.1. PLEXOS szoftver és a modell

A PLEXOS egy piacon kapható villamosenergia-rendszerek és gázhálózatok modellezésére használható szoftver [17]. Ehhez a dolgozathoz a villamosenergia-rendszer modellezésére alkalmas részét használtam fel, amelynek segítségével órás felbontású szimulációkat végeztem el. A PLEXOS egy mixed integer optimalizálást alkalmazó szoftver, ami arra törekszik, hogy minimalizálja a villamosenergia-termelés költségeit, figyelembe véve a rendszer különböző műszaki és gazdasági paramétereit. A szoftverben lehetőség van különböző nagyságú időtávokra szimulálni. Ebben a munkámban egy olyan modellt építettem fel, ami 1 éves időtávon vizsgálja meg órás felbontásban a modell különböző elemeit. Az 1 órás problémák megoldása egy napos lépésekben történik meg, ami azt jelenti, hogy a szoftver figyelembe veszi az adott óra optimalizálásánál a probléma előtti és utáni 24 órát.

A modell tartalmazza Magyarországot és a környező országokat egy-egy nódusként, azaz az országok belső átviteli hálózatát külön nem modelleztem. Az egyes országok nódusa között kétirányú villamosenergia-áramlást tettem lehetővé a tervezett határkeresztező kapacitásoknak megfelelően. Ukrajna villamosenergia-termelését ebbe a modellbe nem építettem bele tekintve energiatermelésének bizonytalanságát a háborús helyzet miatt. Az országokban az erőműveket energiahordozó szinten modelleztem, hiszen az erőmű szintű modellezéshez nem áll rendelkezésre elegendő adat a Nemzeti Energia- és Klímatervekben (NEKT) [18]. További egyszerűsítése a modellnek még, hogy az erőművek nem várható kiesését, valamint karbantartási munkálatait elhanyagoltam, mivel ezeknek a modellezésére nagyon sok további információra lett volna szükségem minden ország minden erőművéről. Az országok, erőművek, valamint a hálózat további specifikus adatait a következő fejezetekben mutatom be részletesebben.

2.2. Vizsgált országok adatai:

Az adott ország villamosenergia-rendszerének tervezett fejlesztéseiről az ország Nemzeti Energia és Klímatervéből tájékozódhatunk. A modellem felépítésénél én is ezeket az adatokat vettem alapul, felhasználva hozzá Biró Bence TDK dolgozatának elemzését [19], amelyben szintén a PLEXOS szoftverben felépített modell alapján dolgozva vizsgálja a magyar villamosenergia-rendszert. A modellembe Magyarországot és a szomszédos országokat építettem bele Ukrajna kivételével, azaz Ausztria (AT), Szlovénia (SI), Horvátország (HR), Szerbia (RS), Románia (RO), Szlovákia (SK) és Magyarország (HU) azok az országok, amelyeket megvizsgáltam. A vizsgált országok adatainak nagy részét témavezetőm, Biró Bence TDK dolgozata alapján építettem bele a modellembe, ezért ezeknek az adatoknak a részletes bemutatásával ebben a dolgozatban nem foglalkozom. Az átvett adatok a következők:

- Országok órás felbontású fogyasztási adatai
- Erőművek beépített kapacitásai
- Határkeresztező kapacitások
- Erőművek műszaki és gazdasági paraméterei
- Megújuló erőművek órás bontású kihasználási tényezői

Ezen adatok közül a gáztüzelésű erőmű és a biomassza tüzelésű erőmű üzemanyag árain változtattam. Biomassza tüzelésű erőmű esetében az üzemanyag árat negyedére csökkentettem, mivel az eredményekből az látszott, hogy a biomassza erőművek később lépnek piacra, mint a gáztüzelésű erőművek megnövekedett fogyasztói igények esetén, ez pedig nem életszerű. A gáz tüzelésű erőmű esetében felére csökkentettem az üzemanyag árat, köszönhetően annak, hogy az utóbbi időben csillapodott a földgáz európai piaca [20], aminek eredményeképpen jelentősen csökkentek a gázárak. Az én modellembe beépített gáz ár egyébként Biró Bence irodalomkutatásával megfelelő értékű.

2.3. Szivattyús tározós erőművek

A szivattyús-tározós erőművek fontos szerepet játszanak a villamosenergia-rendszerek szabályozásában, képesek megfelelően rugalmassá tenni a hálózatot. Ezek az erőművek két víztá-

rozó között helyezkednek el. A víztározók között jelentős szintkülönbség van, ennek megfelelően, amikor a villamos energia árak alacsonyabbak, akkor az erőmű szivattyús üzembe kapcsolva felszivattyúzza az alsó víztározóból a vizet a felsőbe, ezzel megnövelve a víz helyzeti energiáját. Amikor pedig az árak megemelkednek, a felső víztározóból az alsóba folyó víz felhasználásával villamos energiát állít elő az erőműbe épített turbina. Az ilyen típusú erőműveket a következő tulajdonságok alapján modelleztem:

- Maximum kapacitás [MW]: az erőmű kapacitása turbina üzemmódban
- Szivattyú kapacitás [MW]: az erőmű kapacitása szivattyús üzemmódban
- Teljes körfolyamati hatásfok [%]: A szivattyú és a turbina összesített hatásfokát írja le
- Víztározó nagysága és kezdeti értéke [GWh]: A tározóban maximális eltárolható vízmennyiséget, és a kezdeti időpontban a tárolókban lévő vízmennyiséget adja meg. Ezeket az értékeket a felső és az alsó tározóra külön-külön meg kell adni. Esetemben mindkét tározónak azonos adatokat adtam meg.
- Változó üzemeltetési és karbantartási költség [\$/MWh]: ugyan úgy, mint a többi erőműnél megadja, hogy mekkora változó üzemelési költségek mellett képes működni

Ezeket az adatokat szintén Bíró Bence TDK dolgozata alapján építettem bele a modellembe. Témavezetőm TDK dolgozatához képest újítás, hogy definiáltam a magyar villamosenergia-rendszerbe egy szivattyús-tározós erőművet, hogy a legújabb energetikai trendet tudjam vizsgálni, azaz, hogy milyen szerepet tudna betölteni egy szivattyús-tározós erőmű a rendszerben. A magyarországi szivattyús tározós erőmű maximum kapacitását, valamint szivattyúzó kapacitását is 600 MW-nak vettem a legújabb még nem hivatalos tervek figyelembevételével [21]. A tározók kapacitásánál csak feltételezéssel tudtam élni, hiszen ez az adat nem található meg az előzetes tervekben sem, így a modellben egy 4 órás tárolót feltételeztem, ami 2,4 GWh kapacitásnak felel meg. Az alsó és a felső tározó esetében is azt feltételeztem, hogy a szimuláció kezdetekor a tározók félig voltak feltöltve, azaz mindkettőnek a kapacitása 1,2 GWh-ra volt. Szivattyús tározós erőmű építése nem szerepel Magyarország NEKT dokumentumaiban, azonban többször felmerült már, hogy ideális lenne beépíteni egy ilyen villamosenergia-tároló kapacitást is a magyar villamosenergia-rendszerbe, ezzel növelve a rendszer rugalmasságát, emiatt tartottam rendkívül fontosnak ezen kérdés vizsgálatát.

A szivattyús tározós erőművek vizsgálatához létrehoztam a modellemben két különböző scenáriót. Az egyikben a magyar villamosenergia-rendszerben szerepelt szivattyús tározós

erőmű, míg a másikban nem. Akkumulátoros energiatároló a két eset egyikében sem szerepelt a magyar rendszerben.

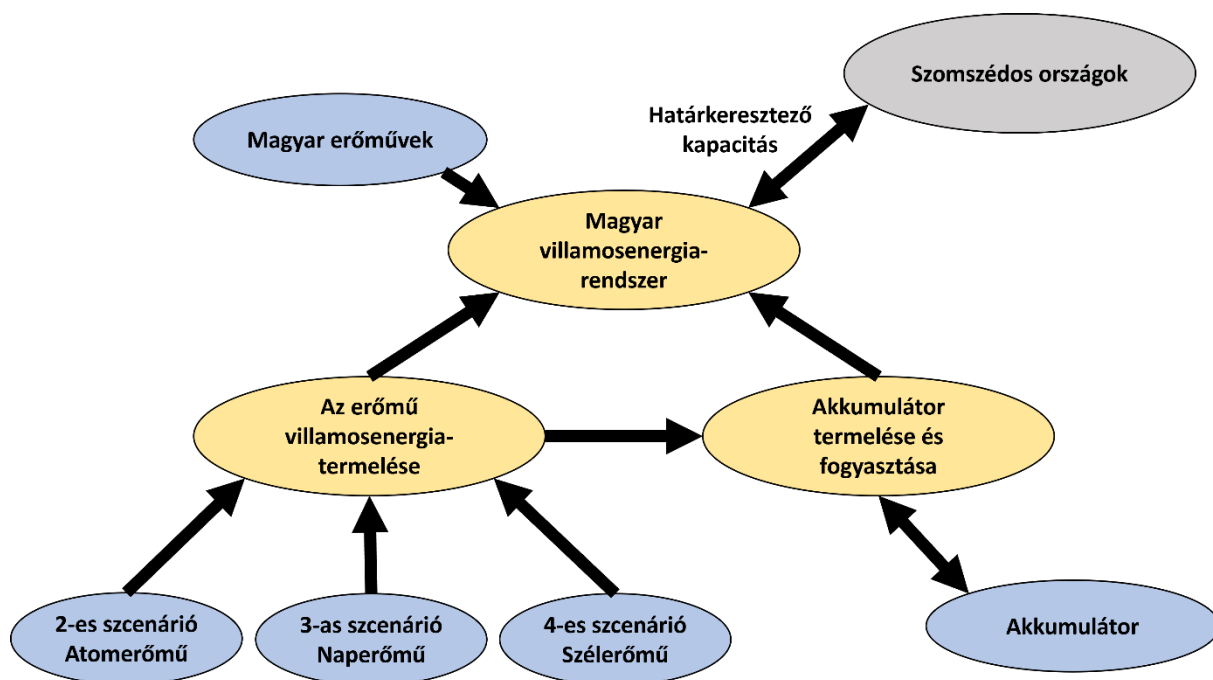
2.4. Akkumulátoros villamosenergia-tároló

Munkámban az akkumulátoros tárolókat is vizsgáltam a magyar villamosenergia rendszerre nézve, mivel a napon belüli tárolásban komoly szerepet játszhat a jövőben ez a tárolási módszer. Modellembem csak Magyarországon építettem be akkumulátoros tárolókat, mivel csak a magyar NEKT adott meg konkrét célokat ezen energiatárolási berendezés jövőjével kapcsolatban. Az adatok nagy részét, ahogy a többi esetben is, az akkumulátoroknál is Bíró Bence TDK dolgozata alapján határoztam meg. Különbséget jelent azonban, hogy rendelkezésemre állt modellezésemkor az újonnan kiadott NEKT tervezete, amelyben az akkumulátoros energiatárolók jelentősebb kapacitásbővülésére számítanak. A dokumentumban 400 MW-os tervezett teljesítményről van szó, azonban a tervezett kapacításra nincsenek konkrét adatok, ezért 2 órás tárolókkal számoltam. Így a modellembem 400 MW/800 MWh adatokkal építettem be az akkumulátort. PLEXOS-ban a következő tulajdonságok alapján határoztam meg az akkumulátorokat:

- Kapacitás [MWh]: megadja a tárolóban maximálisan eltárolható energia mennyiségét.
- Maximális teljesítmény [MW]: definiálja a teljes kisütési teljesítményt.
- Maximális / minimális töltöttségi állapot [%]: megadja a megengedett legnagyobb és legkisebb töltöttségi szintet, amit a tároló töltöttsége elérhet.
- Töltési / kisütési hatásfok [%]: leírja a tároló feltöltésének és kisütésének hatásfokát.
- Változó üzemeltetési és karbantartási költség [\$/MWh]: ez a már korábban az erőműveknél is használt tulajdonság, ami megadja a termelés nagyságával változó költségek nagyságát

Az akkumulátoros energiatárolási lehetőségek vizsgálatakor 4 különböző scenárió mentén építettem fel a modellembem. Első esetben a tervezett akkumulátort közvetlenül a hálózatról működtettem, azaz az energiatárolónak lehetősége volt felvenni bármelyik energiaforrás által megtermelt energiát. A többi esetben viszont létrehoztam másik kettő nódust azon kívül, amihez eddig a generátorokat csatlakoztattam. Az egyik új nódushoz csatlakoztattam az akkumulátort, a másikhoz pedig a második esetben a magyar rendszerben megtalálható atomerőműveket, a harmadik esetben a naperőműveket, a negyedik esetben pedig a szélerőműveket. A modell felépítését az 1. ábrán ábrázoltam is a könnyebb érthetőség céljából. Továbbá kikötés volt még az

utóbbi három scenárió esetében, hogy a külön választott termelő által termelt villamos energia vagy közvetlenül a hálózatba tudott áramlani, vagy az akkumulátorba. Az akkumulátorból pedig csak egy úton juthatott el a hálózatba. Ebből következik, hogy ezekben az esetekben az akkumulátornak csak a különválasztott termelő villamos energiáját volt lehetősége betermelni. Ezzel a modellfelépítéssel lehetőség nyílik annak a modellezésére, hogy milyen hatása lenne annak, ha a tárolókat különböző erőművek telephelyén helyeznénk el, és a tárolók csak az adott erőmű által termelt villamos energiát tudná felhasználni. Az akkumulátoros energiatárolók vizsgálatakor a magyar villamosenergia-rendszerben nem volt jelen a szivattyús tározós erőmű. Érdekes lehet az is, hogy ez a két típusú energiatároló, hogyan képes együttműködni, de ezen dolgozatban bemutatott kutatás keretein ez a probléma már túlmutatott azonban a későbbiekben mindenképpen érdemes lehet ezt is megvizsgálni.



1. ábra Második, harmadik és negyedik szcenárió modelljének felépítése

3. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben bemutatom a PLEXOS szimulációm eredményeit. A fejezet első felében arról lesz szó, hogy a szimuláció során hogyan alakulnak a villamosenergia-árak, valamint a CO₂ termelés a szivattyús-tározós erőmű rendszerbe építése által. Kitérek arra is, hogy milyen profit mellett képes üzemelni az erőmű. Ezután pedig bemutatom, hogy egyes évszakok jellemző napjain milyen az erőmű termelése és megvizsgálom, hogy ennek milyen okai lehetnek.

A fejezet második felében az akkumulátorok paramétereit, valamint termelését vizsgálom. Az akkumulátorok esetében négy scenáriót modelleztem és ezeket fogom összehasonlítani.

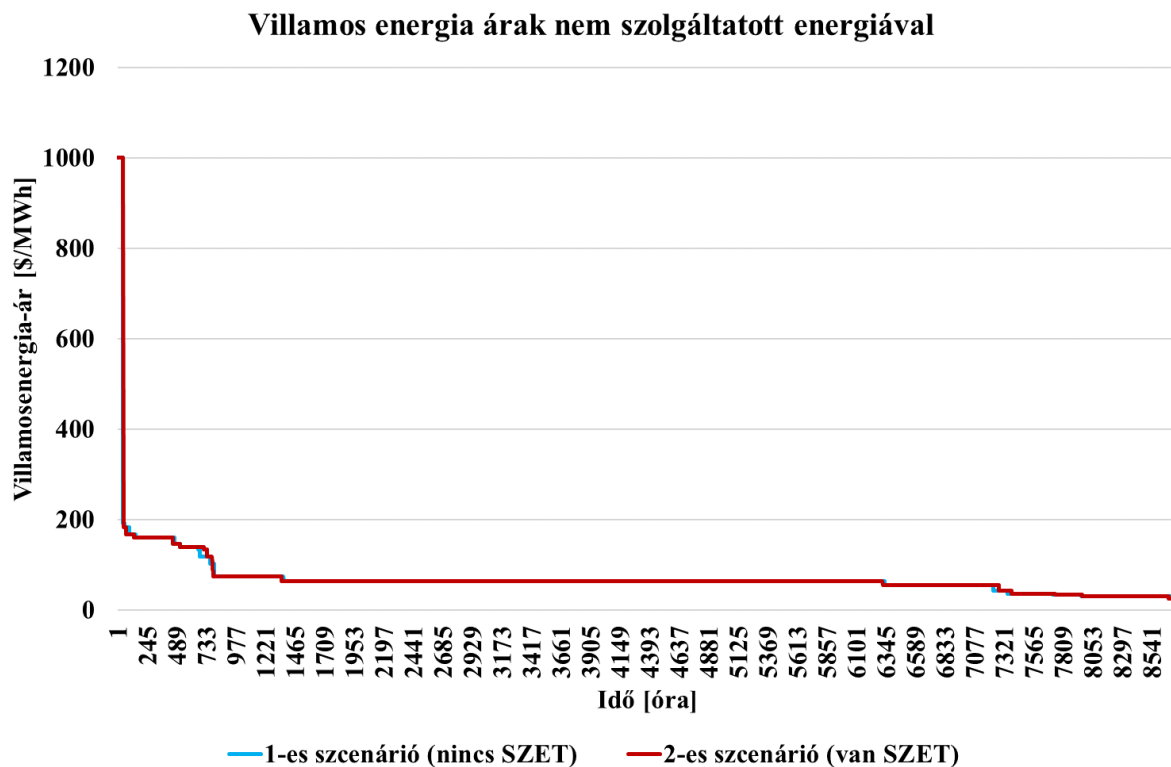
3.1. Szivattyús tározós erőmű

A szivattyús-tározós erőművel kapcsolatban először megvizsgáltam, hogy milyen paraméterek mellett képes üzemelni, valamint, hogy milyen hatást gyakorol a magyar villamosenergia-rendszerre. Továbbá elemeztem, hogy mikor fogyaszt és termel villamos energiát a különböző évszakokban és ennek mi lehet az oka. A vizsgálatok elvégzéséhez két scenárió mentén futtattam le a modelletemet. Az elsőben nem volt szivattyús tározós erőmű a magyar villamosenergia-rendszerben, a másodikban pedig volt.

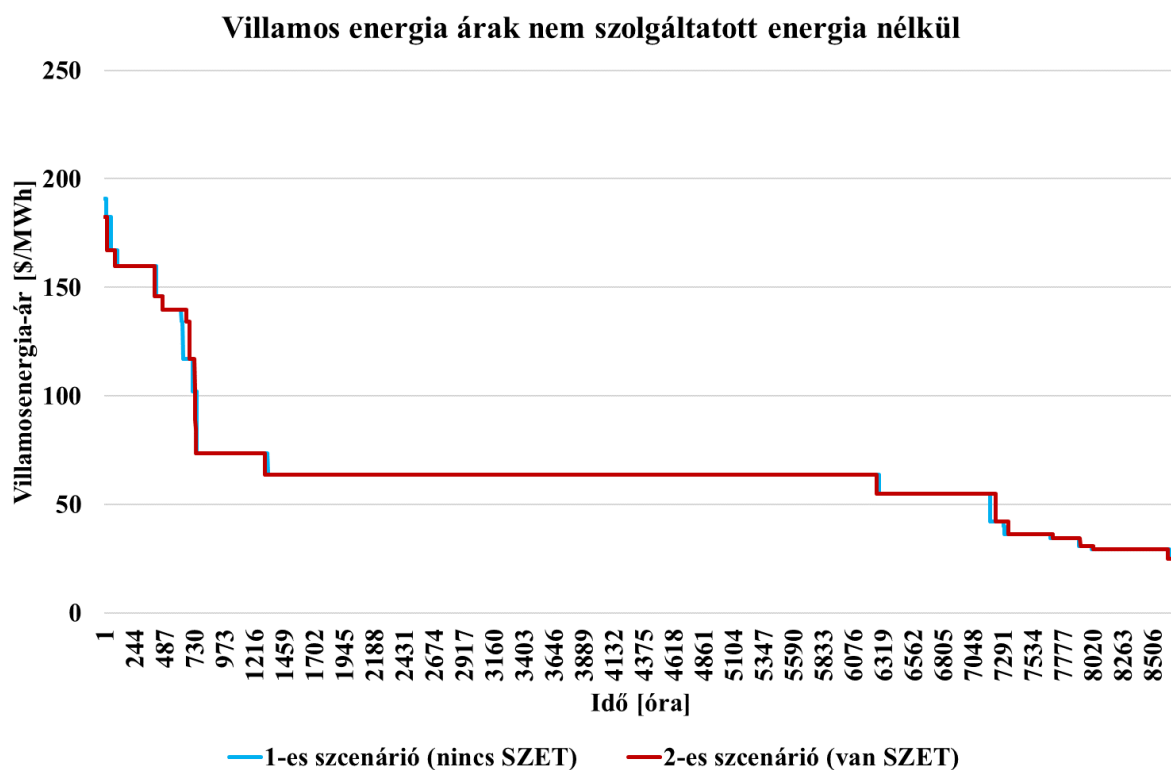
3.1.1. MŰKÖDÉSI PARAMÉTEREK

Miután lefuttattam a szimulációimat először megvizsgáltam, hogy a SZET (szivattyús energia tározó) milyen hatással van a Magyarországon keletkező villamos energia árakra. Ehhez összehasonlítottam a kapott árakat arra az esetre, amikor nem volt a rendszerben SZET, valamint arra az esetre, amikor volt. Azt kaptam eredményül, hogy a SZET befolyása az árakra minimális, mivel rendszerbe építésével 70,11 \$/MWh-ás árról 70,52 \$/MWh-ra változott a magyar villamosenergia-rendszerben kialakult, a hazai termelésre fajlagosított átlagos ár, ami mindösszesen 0,4 \$/MWh-ás növekedést jelent. A villamos energia ára azért növekszik, mivel nem elegendő a szivattyús tározós erőmű kapacitása ahhoz, hogy marginális termelőt váltson ki a piacon, viszont a SZET működtetéséhez többlet villamos energiára van szükség, ami azt eredményezi, hogy a marginális piaci szereplőknek többször kell piacra lépniük. Azért, hogy

szemléletesebb legyen tartamdiagramokon ábrázoltam a kialakult árakat. A 2. diagramon látszanak a nem szolgáltatott villamosenergia árai is (1000 \$/MWh), azonban ez kicsit torzítja az összképet, ezért a 3. diagramon kivettem ezeket az értékeket az ábrázolásból.



2. ábra Villamos energia árak Magyarországon, a nem szolgáltatott energia árával együtt



3. ábra Villamos energia árak Magyarországon, nem szolgáltatott energia nélkül

Az árak változása mellett fontosnak tartottam megnézni azt is, hogy hogyan változik a villamosenergia-termelés fajlagos szén-dioxid kibocsátása a SZET rendszerbe kerülésével. Valamint, hogy akkor, amikor a SZET villamos energiát vételez a rendszerből, akkor milyen a fajlagos CO₂ értéke annak az energiának. A magyar villamosenergia rendszer éves termelésének fajlagos CO₂ kibocsátása 107,41 kgCO₂/MWh-ra jött ki abban az esetben, amikor nem volt SZET a rendszerben és 106,21 kg/MWh-ás érték jött ki, amikor a SZET is üzemelt. Ez minimális csökkenést jelent, aminek oka, hogy amikor a SZET vételezi a villamos energiát az átlagnál jelentősen alacsonyabb a villamosenergia-termelés fajlagos CO₂ kibocsátása, mint amikor eladja azt. Vételezéskor, azaz a tározók töltésekor ez a fajlagos kibocsátás 72,86 kg/MWh, kitárazáskor pedig, azaz amikor a SZET áramot termel 95,73 kg/MWh. Ebből következtethetünk arra, hogy a SZET vételezésekor nagyobb arányban vannak jelen karbonsemleges termelők a rendszerben, mint amikor elad.

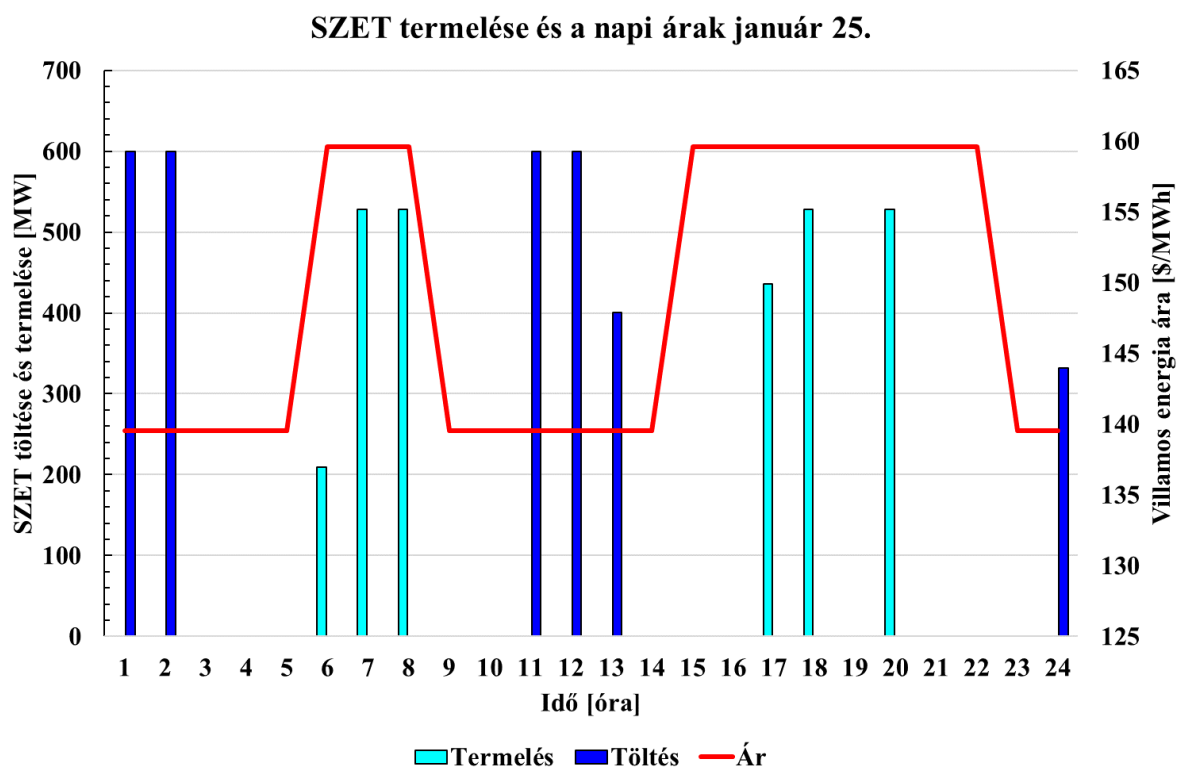
Ezekén kívül megvizsgáltam azt is, hogy milyen profit mellett lenne képes üzemelni egy SZET a magyar villamosenergia-piacon. Azt az eredményt kaptam, hogy 4,94 \$-t tudna ter-

melni MWh-ánként egy ilyen erőmű. Ez beszorozva a termeléssel 1,65 millió\$-os profitot jelentene egy évre nézve. Ez a megtermelt profit jelenleg csak ár-arbitrázs tevékenységből adódik, azaz úgy számoltam ki, hogy a betermelt villamos energiát megszoroztam a betermeléskor aktuális villamos energia árral, a kitermelt villamos energiát pedig megszoroztam a kitermeléskor aktuális villamos energia árral. A kitermeléskor keletkezett bevételből kivontam a betermeléskor keletkezett kiadást, valamint kivontam a betermeléskor, illetve a kitermeléskor felmerülő változó üzemeltetési és karbantartási költséget. Így megkaptam az éves profitot. PLEXOS-ban lehetőség van arra is, hogy vizsgáljuk, hogy a szekunder tartalék piacon milyen bevételi lehetőségei vannak a szivattyús tározós erőműnek, valamint, hogy a rendelkezésre állási díj mennyi plusz bevételt jelent. A tartalék piacok modellezése és a további bevételek vizsgálata nem volt ennek a kutatásnak a tárgya, azonban egy kiváló továbbfejlesztési lehetőség a jövőre nézve.

3.1.2. SZET ÜZEMÁLLAPOTOK

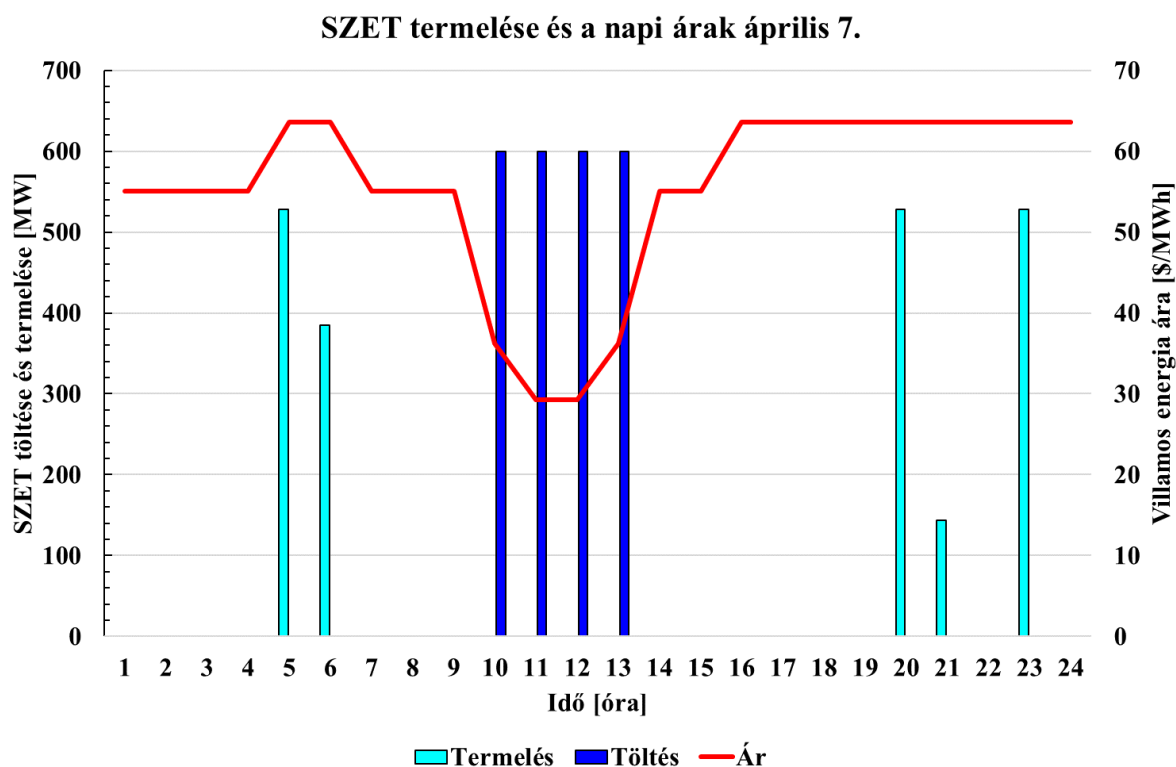
Egyik legfontosabb paramétere egy energiatárolónak, hogy mikor és mennyit üzemel. Ahhoz, hogy átfogóbb képet kaphassunk erről kiválasztottam mind a négy évszaktól a SZET termelésére jellemző napokat, amiken vizsgálatokat végeztem. Azért, hogy látható legyen ábrázoltam a villamos energia árak változását napon belül az egyik tengelyen, valamint a SZET töltését és termelését a másikon.

A 4. diagramon azt figyelhetjük meg, hogy a SZET egy téli napon kétszer is vételez villamos energiát és kétszer el is adja, azaz kettő töltés-kisütés ciklus megy végbe rajta. Először az éjjeli órákban tölti a tározókat, amikor köszönhetően a fogyasztás csökkenésnek lecsökkennek az árak. Ezt a betárolt energiát a reggeli órákban el is adja, amikor a reggeli csúcs igénynek köszönhetően ár növekedés következik be. Megfigyelhető napközben is, hogy amikor a fogyasztás megint lecsökken, valamint naperőművi termelés is belép a rendszerbe, akkor a kisebb áraknak köszönhetően megint vételez villamos energiát. Este pedig az újabb csúcs és ár növekedés hatására kitárol az erőmű.



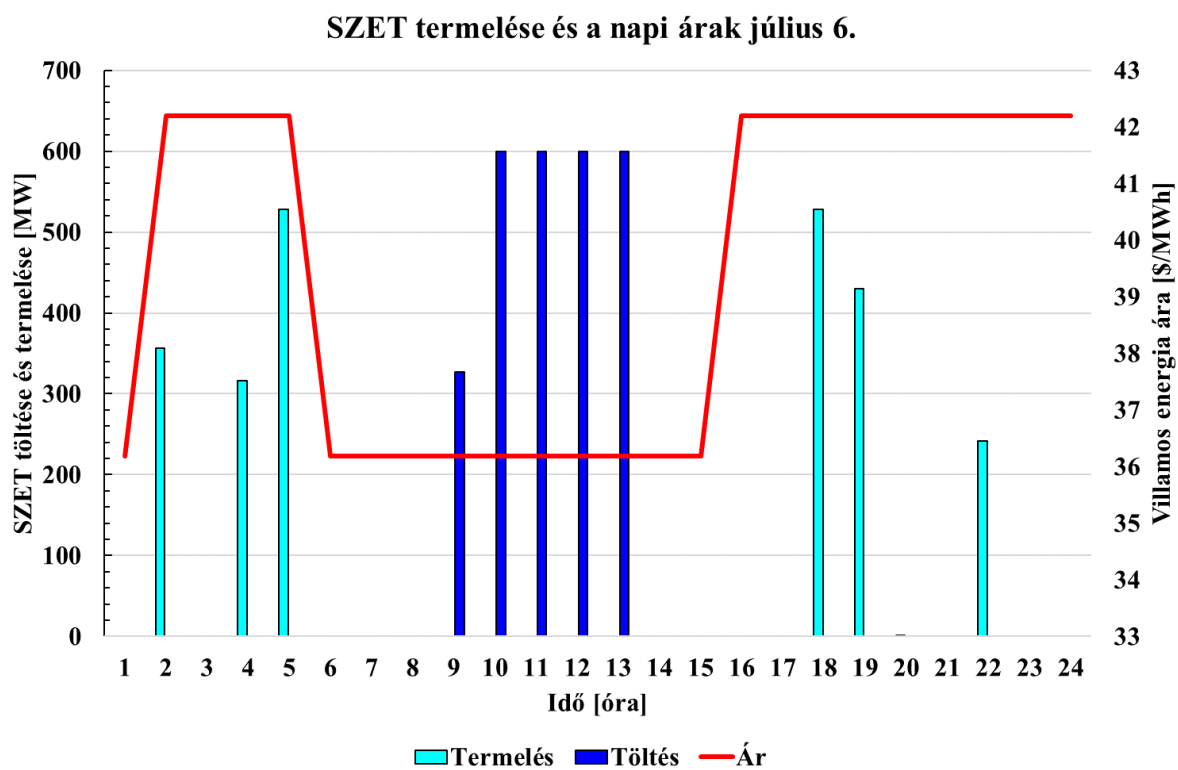
4. ábra Szivattyús tározós erőmű termelése és a napi árváltozás január 25.

Ugyan ez a termelés töltés egy tavaszi napon az 5. diagramon látható. Megfigyelhetjük, hogy tavasszal az éjjeli villamos energia vételezés már nem jellemző, ilyenkor éjszaka az árak már nem csökkennek akkorát. Napközben viszont megnövekedett napenergia termelés van, ami azt eredményezi, hogy olyankor többet tud betárolni az erőmű.



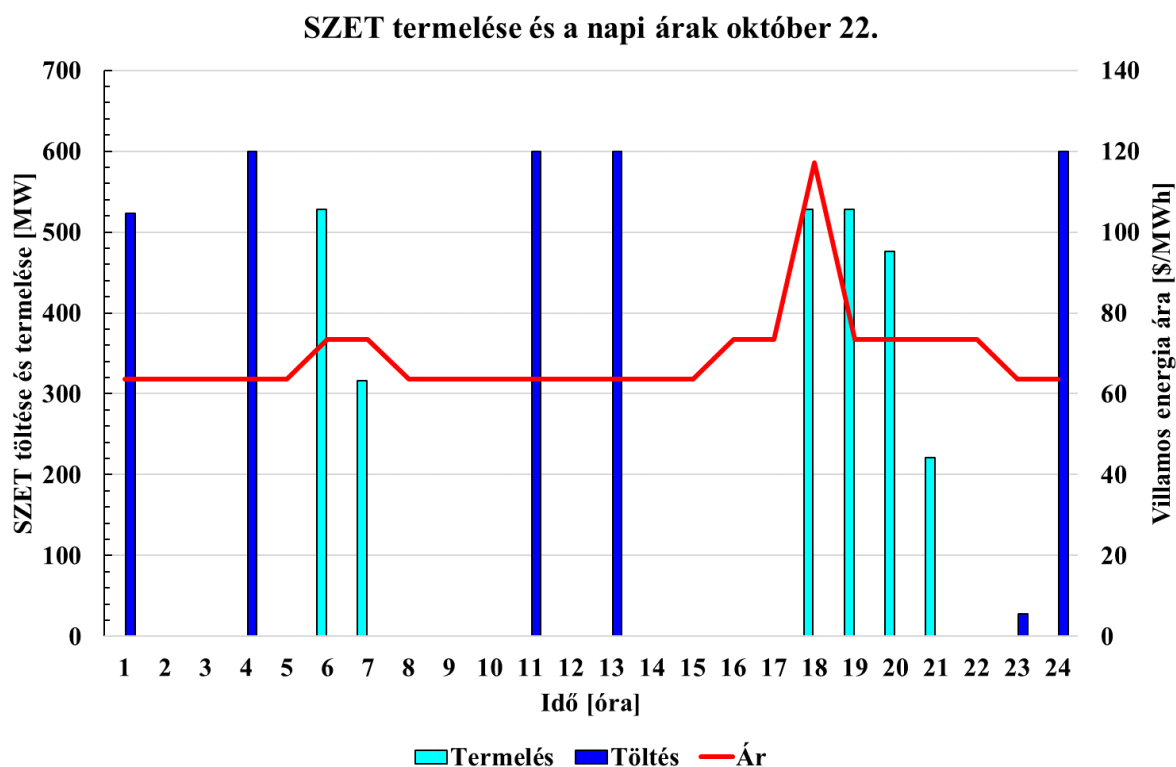
5. ábra Szivattyús tározós erőmű termelése és a napi árváltozás április 7.

Ezután vizsgálva egy nyári napot láthatjuk, hogy a napközbeni napenergia termelés még nagyobb szintjének köszönhetően az erőmű a déli órákban, akárcsak tavasszal feltölti a felső tározóját. Az esti, valamint a reggeli csúcsokban pedig visszatermel a rendszerbe. A nyári nap a 6. diagramon látható.



6. ábra Szivattyús tározós erőmű termelése és a napi árváltozás július 6.

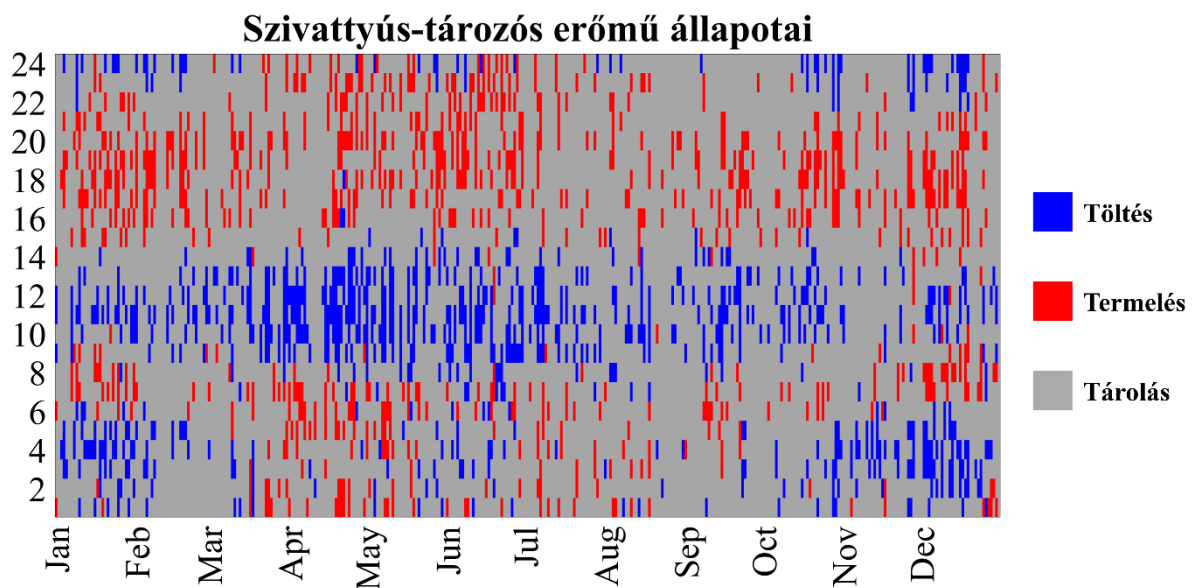
A 7. diagramon ábrázolt őszi nap pedig a télihez hasonlítható, azzal a különbséggel, hogy ebben az esetben kisebb mértékű az ár ingadozás, mint télen, ennek ellenére ugyan úgy megvalósul a napi két töltés és termelés ciklus.



7. ábra Szivattyús tározós erőmű termelése és a napi árváltozás október 22.

Összesen egy év alatt a szivattyús tározós erőmű 380,41 GWh-át tárolt be és 334,84 GWh-át tárolt ki. Az erőmű kitarolása az éves magyar termelés 0,58%-a. A vizsgált évben 1 746 órát üzemelt, ami az év 20%-át jelenti.

Azért, hogy órás bontásban is láthassuk megjelenítettem a 8. ábrán a SZET állapotait egy hőtésképen. Megfigyelhetjük az ábrán azt, hogy az év milyen szakaszaiban, a nap melyik órájában tölt (kék szín a diagramon), melyik órában termel (piros szín), illetve, hogy mikor nincs használatban (szürke szín). Az ábrán a télen jelentkező éjszakai töltés, valamint a nyáron megnövekedett napközbeni töltés is tökéletesen látszik.



8. ábra Szivattyús tározós erőmű üzemállapotai

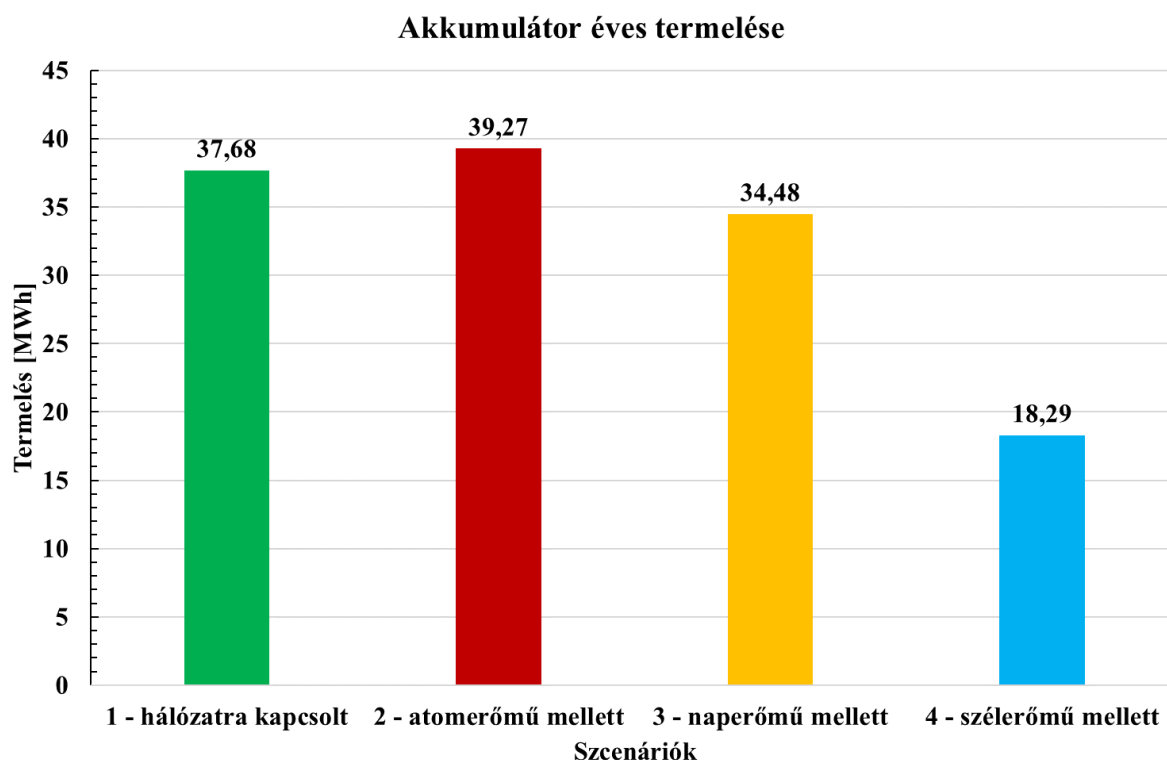
3.2. Akkumulátoros energiatároló

Az akkumulátoros energiatároló esetén összehasonlítottam, hogy az akkumulátor különböző működési paraméterei hogyan alakulnak, valamint megvizsgáltam, hogy milyen különbségek figyelhetők meg az esetek között, egyes évszakok kiválasztott napjain. Ábrázoltam a termelés napi lefutását az akkumulátor be-, illetve kitermelésével együtt. Valamint akárcsak a SZET esetében készítettem egy diagramot a villamosenergia-ár napi változásáról és a töltés-kisütés ciklusokról. A fejezet végén pedig bemutatom hő térképeken is, hogy milyen különbségek figyelhetők meg a négy scenárió között.

3.2.1. MŰKÖDÉSI PARAMÉTEREK

Elvégezve a modellek futtatását kaptam, hogy különböző esetekben mennyit termeltek az energiatárolók. Ezeket az eredményeket a 9. diagramon ábrázoltam. Látható, hogy a legnagyobb termelést abban az esetben érte el az energiatároló, amikor az atomerőmű termelését tudta eltárolni. Ez főleg annak köszönhető, hogy így az éjszakai órákban termelt többletet is el tudja tárolni. Ugyan ez az oka annak is, hogy a hálózatra kapcsolt esetben is nagyságrendileg

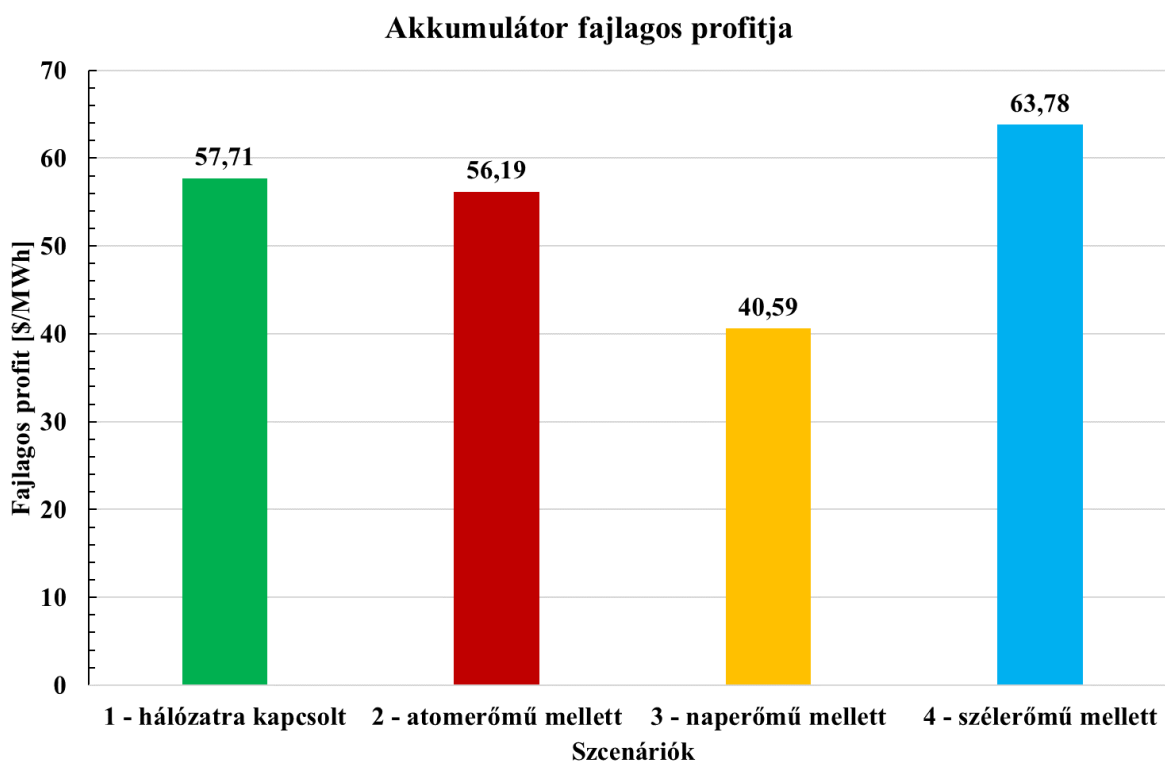
ezt a termelési mennyiséget érte el. A harmadik esetben köszönhetően annak, hogy a naperőművek csak nappal termelnek, az akkumulátor nem tudja kihasználni az esetleges éjszakai villamosenergia-árscsökkenéseket, ennek köszönhetően ebben az esetben kisebb az akkumulátor éves termelése, mint az első két scenáriónál. Megfigyelhető továbbá, hogy abban az esetben amikor a szélenergiát képes csak tárolni jelentősen alacsonyabb az éves szintű termelése. Ez azért lehetséges, mivel a magyar villamosenergia rendszerben kismértékben találhatóak csak meg szél erőművi kapacitások, ezért amikor egyébként lenne a rendszerben felesleges energia, akkor sem tud eleget eltárolni.



9. ábra Akkumulátor éves termelése a négy scenárió esetén

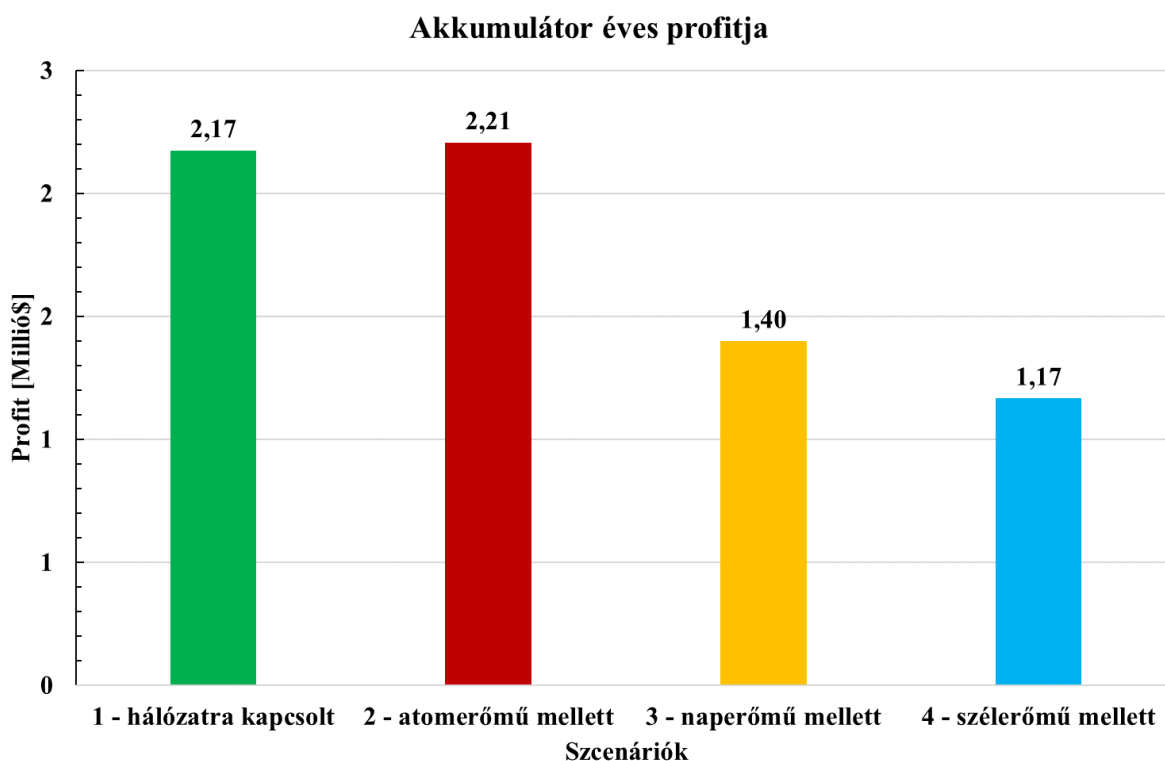
Fontosnak tartottam megvizsgálni továbbá azt is, akár csak a SZET-k esetében, hogy mekkora az akkumulátor által vételezett villamos energia fajlagos CO₂ intenzitása. Ezt azonban csak az első esetben érdemes vizsgálnom, mivel csak ekkor üzemel a hálózatról az energiatároló. A többi esetben ez az érték irreleváns, mivel ezekben az esetekben meg van szabva, hogy milyen energiaforrásból származó energiát termelhet be az akkumulátor és ezek a források mind karbonsemlegesek. A hálózatról üzemelő akkumulátor vételezésekor a hálózat CO₂ intenzitása átlagosan 86,63 kg/MWh. Ez az érték magasabb, mint amit a SZET esetében tapasztaltunk.

A profit számolásakor a Magyarország régióban kialakult árat vettem figyelembe. Ezzel azt küszöböltem ki, hogy a régióban definiált három nódus között kialakuló esetleges minimális árkülönbségek ne jelentsenek problémát. Az első két esetben megint nagyon hasonló értékeket kapunk, míg a 4-es esetben a fajlagos profit értéke kiemelkedően magas, addig a naperőművekről üzemeltetett akkumulátor fajlagosan alacsony profittal üzemel. Ezeket az értékeket a 10. diagramon ábrázoltam. A fajlagos profit változása annak köszönhető, hogy abban az órában, amikor az akkumulátor villamos energiát vételez éppen milyenek a villamosenergia-árak. Mivel a fosszilis energiahordozókkal történő termelés fajlagosan drágábban valósul meg, ezért amikor a fogyasztói igények kielégítéséhez szükségünk lesz a fosszilis energiahordozókkal történő termelésre, akkor drágább a villamos energia ára.



10. ábra Akkumulátor fajlagos profitja a négy szcenárió esetén

Azonban, ha megvizsgáljuk azt, hogy mekkora az éves profitot kicsit más képet kapunk, mint a fajlagos profit esetében. Köszönhetően a megtermelt villamos energia mennyiségének megfigyelhető, hogy a 4-es eset kiemelkedő fajlagos profitja, felszorozva az éves termeléssel közel sem eredményez olyan nagy értéket, mint például az első esetben. Az éves profitot a 11. diagramon ábrázoltam.



11. ábra Akkumulátor éves profitja a négy szcenárió esetén

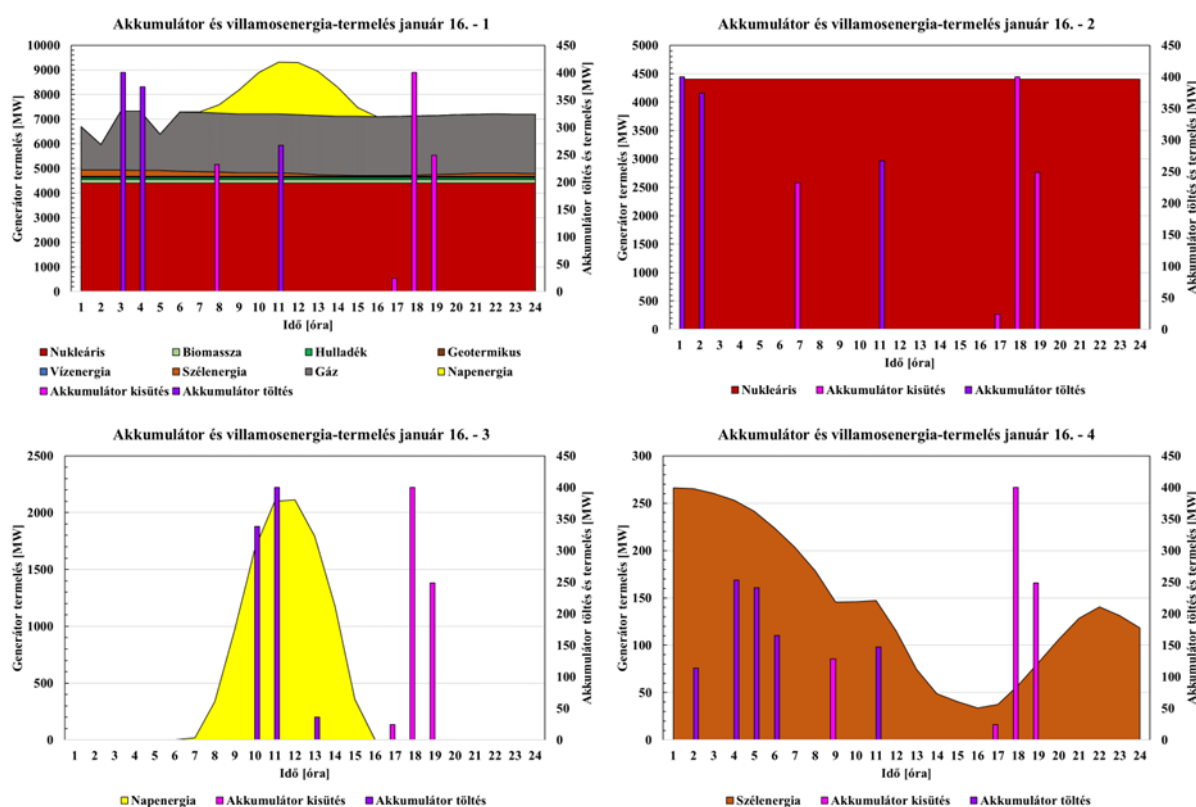
3.2.2. ÜZEMÁLLAPOTOK

Ebben a fejezetrészen mutatom be napi lefutási diagramokon a különböző évszakokra jellemző akkumulátor üzemállapotokat. Vizsgálom, hogy milyen különbségek ismerhetők fel a 4 eset között és megnézem, hogy ezek milyen okokra vezethetők vissza.

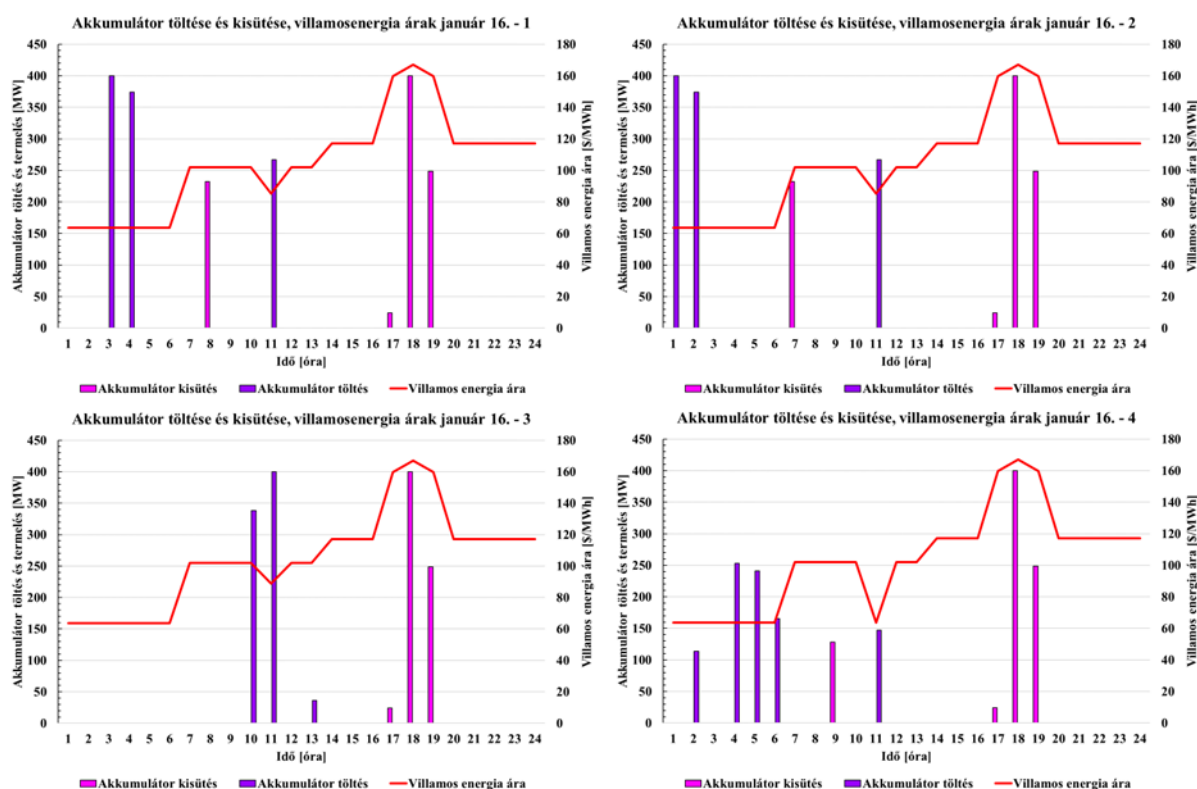
3.2.2.1. Tél

A villamosenergia-termelés napi lefutását és az akkumulátor termelését, illetve töltését a 12. diagramokon ábrázoltam. A különböző szcenáriókat figyelve látszik, hogy az első két eset között minimális különbség adódik. Létrejön egy éjszakai túlermelésnek köszönhető akkumulátor töltés, amely töltésnek egy része a reggeli csúcsidőszakban vissza is termelődik a hálózatba. A 4-es esetben is megfigyelhető éjszakai töltődés, a különbség viszont az, hogy ebben az esetben több kisebb részletben töltődik fel az akkumulátor. Ez annak köszönhető, hogy ilyenkor csak a szélenerőmű termelésnek megfelelő mennyiségben tud vételezni villamos energiát. Minden

esetben megfigyelhető egy töltési időszak a nap közepén köszönhetően a naperőművek termelésének. Különbséget jelent a vételezett villamos energia mennyisége is az esetek között. Ennek oka, hogy a 3-as eset kivételével az akkumulátorok töltöttségi szintje nem minimális, azaz valamennyi villamos energia már be van tárolva éjszakáról. Ami minden scenárió esetén meg egyezik az az esti órákban történő kitermelés. Ilyenkor minden esetben az összes kiadható villamos energiát kiadják az energiatárolók a hálózatra. Ennek oka a 13. ábrán megfigyelhető ár-
változás, ami mindegyik esetben hasonló karakterisztikát mutat.



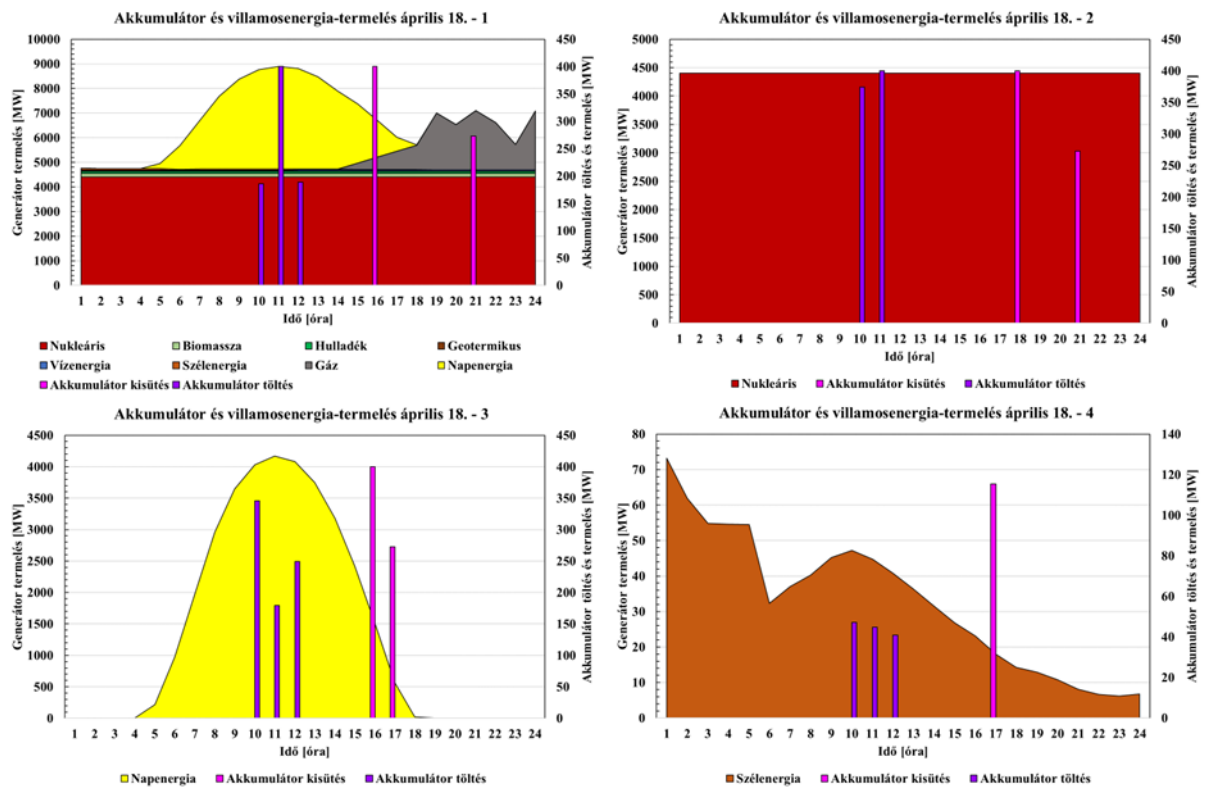
12. ábra Akkumulátor termelése és töltése, a kiemelt energiatermelő termelése a négy scenárió esetén január 16.



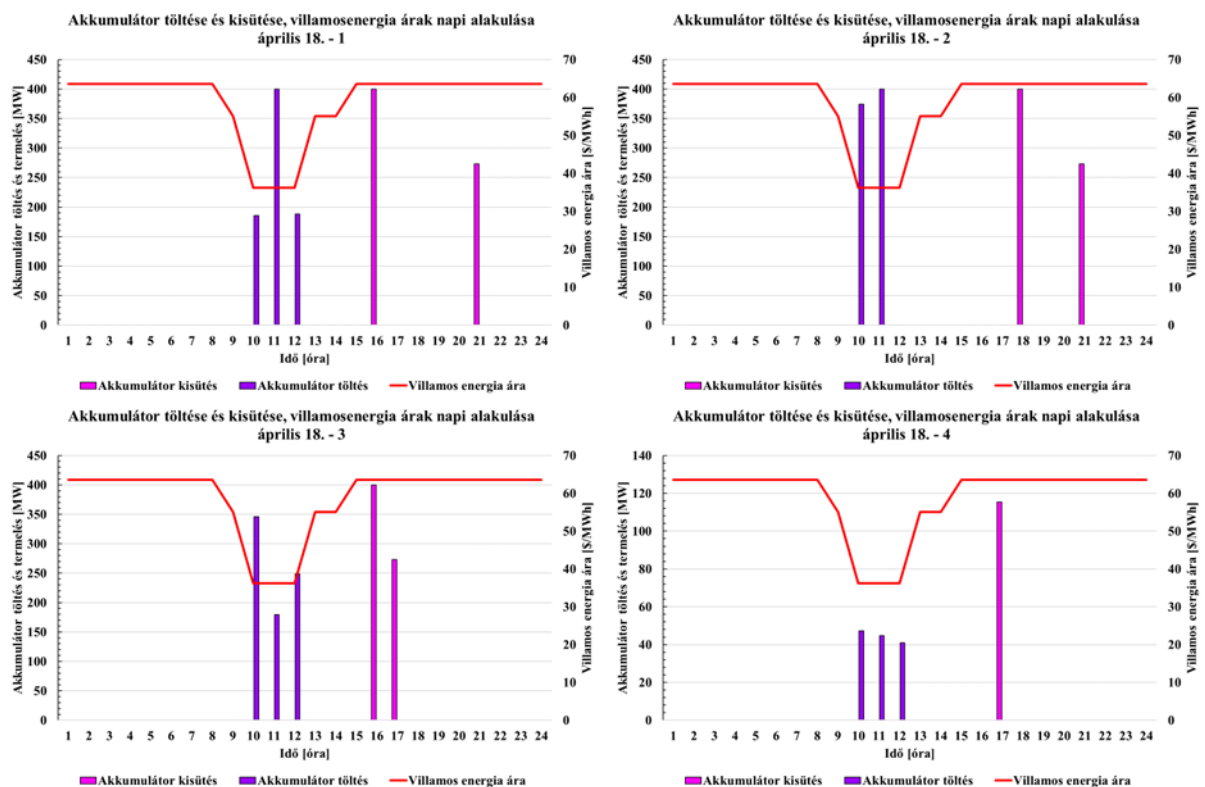
13. ábra Akkumulátor töltése és termelése, villamos energia ár a négy scenárió esetén január 16.

3.2.2.2. Tavasz

A tavaszi évszak vizsgálatához egy áprilisi napot választottam ki. A napi lefutásokat a 14. diagramon, míg az árak változását a 15. diagramon ábrázoltam. Ebben az évszakban már nem jellemző az éjszakai villamosenergia vételezés, ugyanis itt már nem csökken le éjszaka a villamos energia ára, csak egy napközbeni árzuhanás érzékelhető, köszönhetően a fotovoltaikus naperőművek termelés növekedésének. Ilyenkor a vizsgált négy eset között a különbséget az jelenti, hogy az a termelő, amiből tölteni tudjuk az akkumulátort mennyit termel. Ezért látható az, hogy a 4-es esetben kevesebb villamos energiát tud csak felvenni az akkumulátor. A kitermelések minden esetben az esti órákban történnek meg, amikor a naperőművi termelés lecsökken és a fogyasztás megnő.



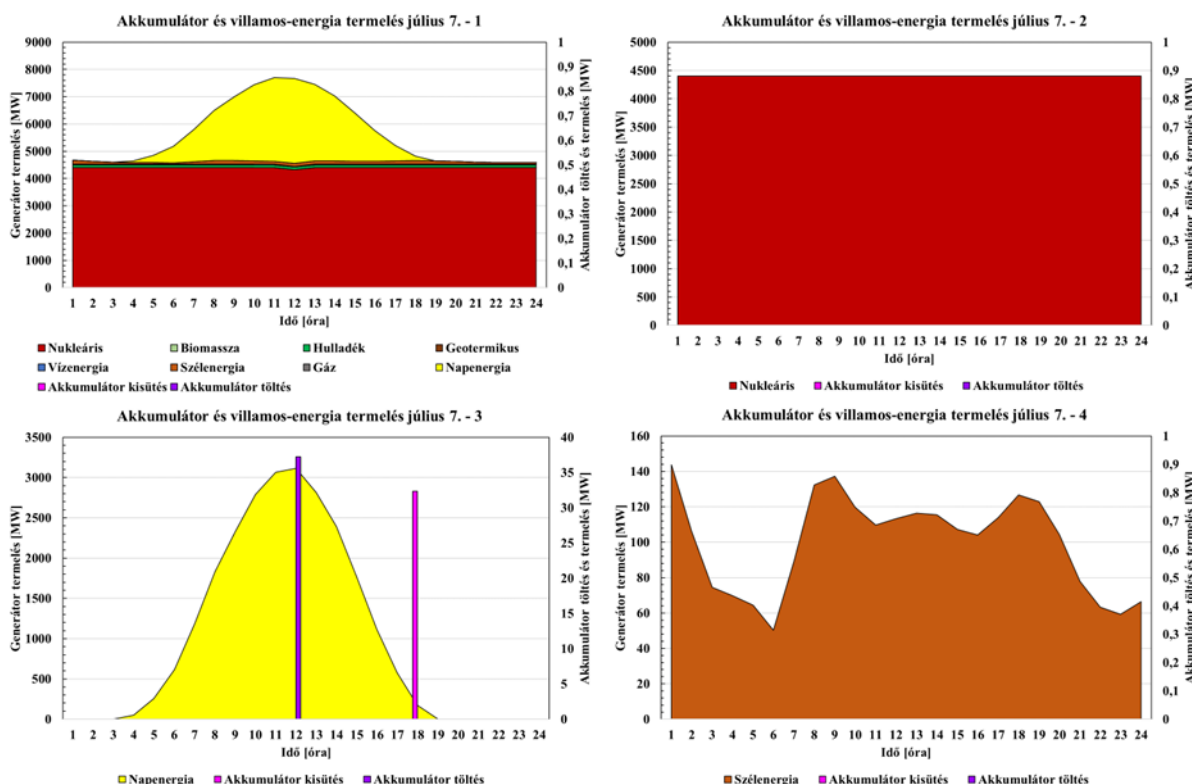
14. ábra Akkumulátor termelése és töltése, a kiemelt energiatermelő termelése a négy scenárió esetén április 18.



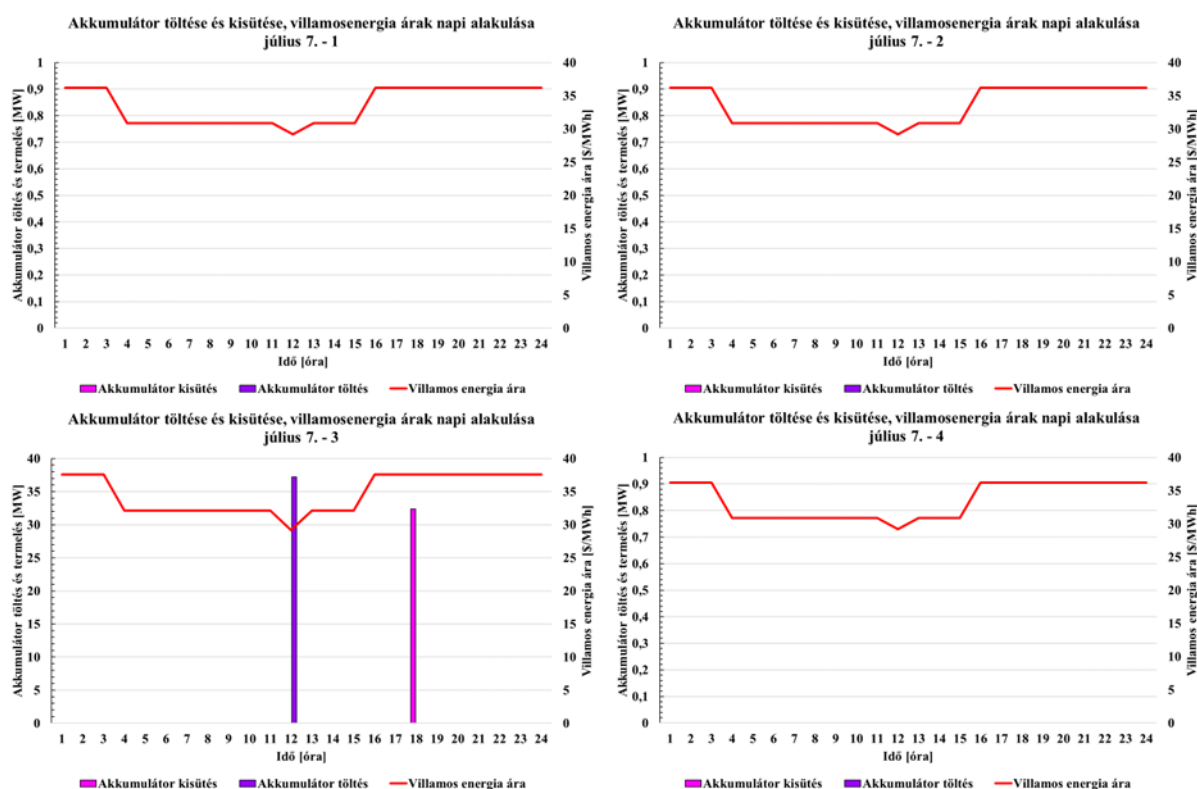
15. ábra Akkumulátor töltése és termelése, villamos energia ár a négy scenárió esetén április 18.

3.2.2.3. Nyár

Ugyan úgy, ahogy az előző évszakoknál ábrázoltam a termelés napi lefutását a 16. ábrán, valamint a villamosenergia-ár változását a 17. diagramon. Némiképp meglepő lehet, hogy a nyári időszakban azt tapasztaljuk, hogy nem üzemel az akkumulátor. Egyedül a 3-as esetben van töltése és termelése, akkor is elég kicsi. Ez annak köszönhető, hogy ha megnézzük a villamosenergia-ár nagyon keveset változik napon belül, és nem alakul ki akkora különbség, hogy megérje az akkumulátornak üzemelni. A 3-as esetben minimálisan nagyobb ingadozik az ár, ennek köszönhető, hogy működésbe lép az akkumulátor. Vannak nyáron olyan napok is, amikor megfigyelhető termelés, de jellemzően nem ingadozik eleget a villamos energia ára ahhoz, hogy üzemeljenek az akkumulátorok.



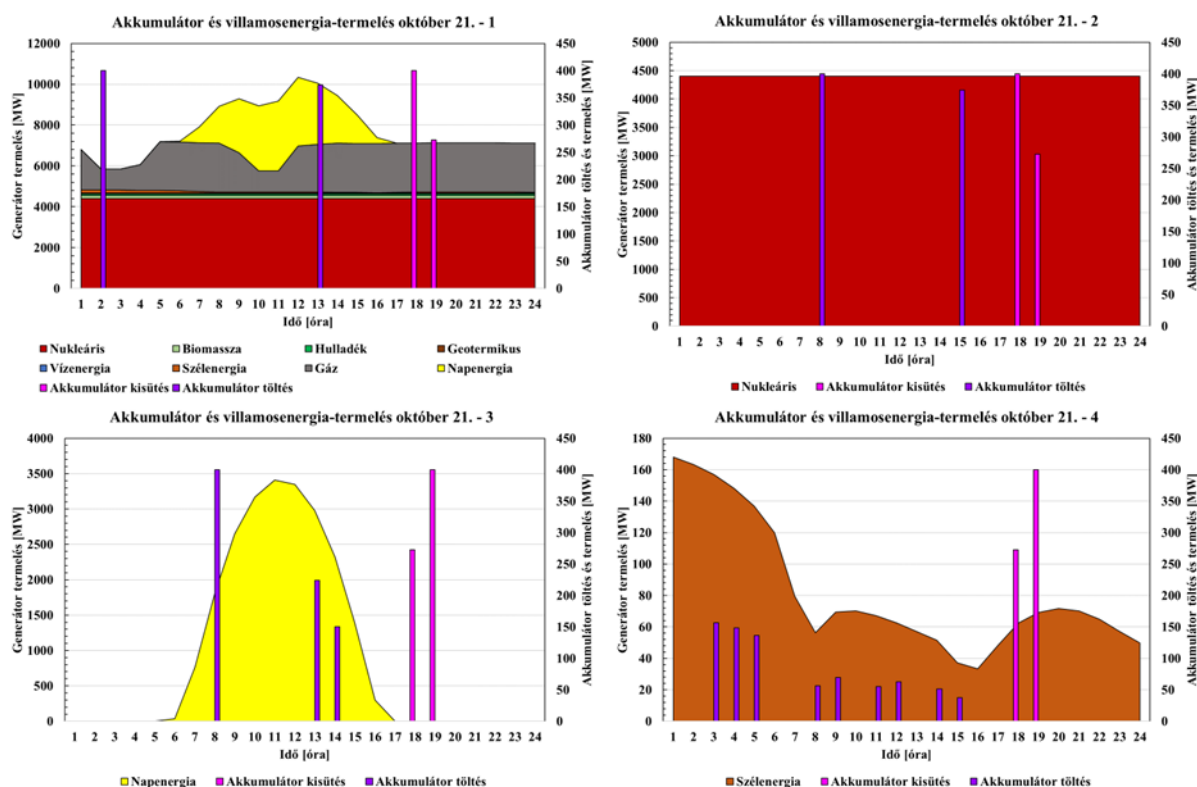
16. ábra Akkumulátor termelése és töltése, a kiemelt energiatermelő termelése a négy szcenárió esetén július 7.



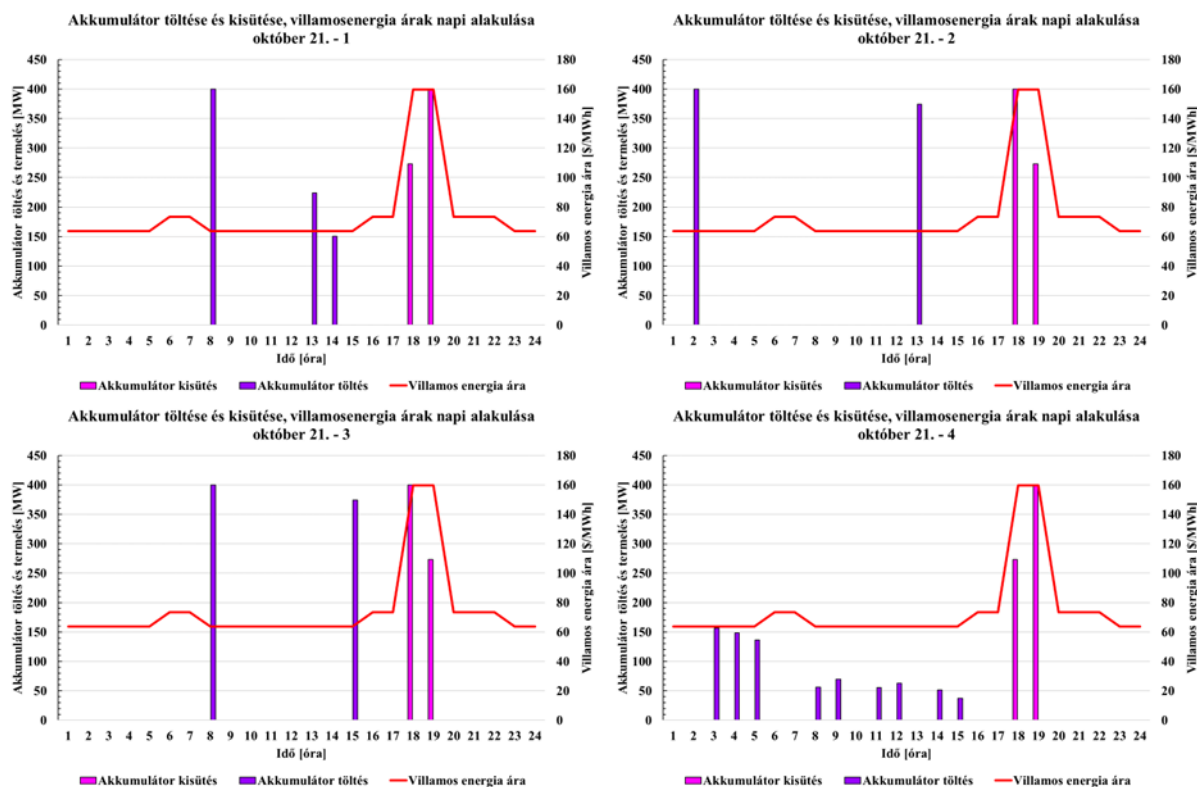
17. ábra Akkumulátor töltése és termelése, villamos energia ár a négy scenárió esetén július 7.

3.2.2.4. Ősz

Ősszel a második és a harmadik esetben csak a napközbeni termelés jellemző. A 18. ábrán látszik a generátorok termeléséből, hogy amint a naperőművek termelése elér egy szintet, elkezdi töltődni az akkumulátor. Az 1-es és a 4-es esetben továbbá látszik, hogy éjszaka is van töltés. Azért töltődik az akkumulátor minden esetben már korábban, mint várnánk, mivel a 19. ábrán látszik, hogy az esti órákban egy jelentős ár növekedés következik be. Ez az ár növekedés pedig lehetőséget ad az akkumulátor termelésére minden esetben.



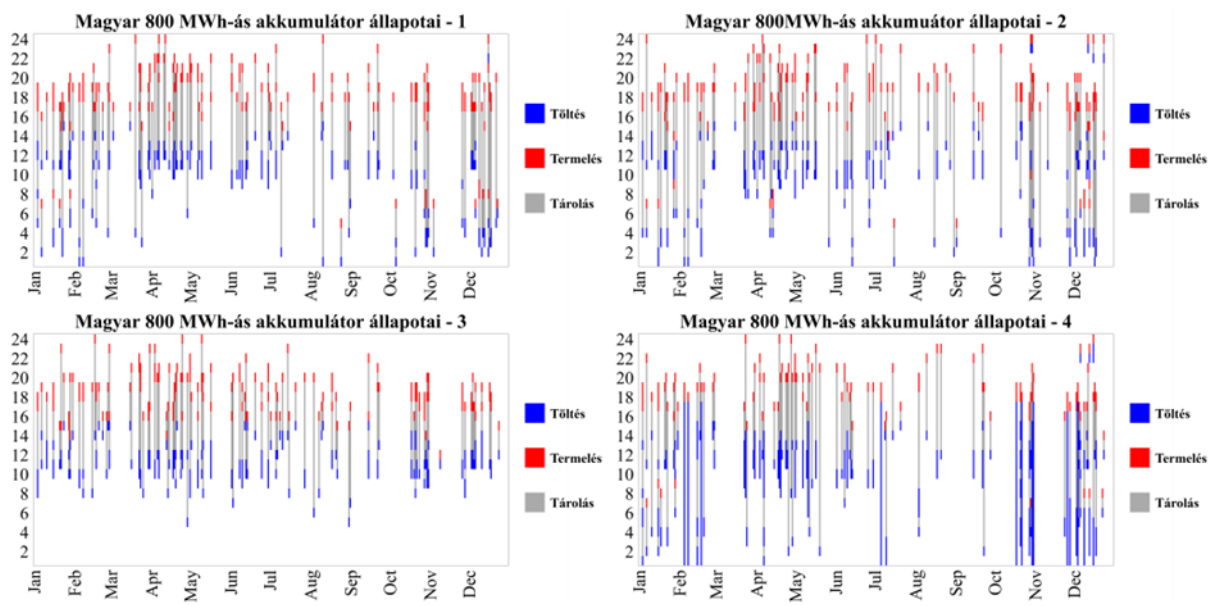
18. ábra Akkumulátor termelése és töltése, a kiemelt energiatermelő termelése a négy szcenárió esetén október 21.



19. ábra Akkumulátor töltése és termelése, villamos energia ár a négy szcenárió esetén október 21.

3.2.2.5. Hőtérfépek

Összesítve legjobban hőtérfépeken ábrázolható az akkumulátorok állapota. Ezért készítettem el a 20. ábrát, ahol a 4 különböző eset állapotai látszanak. Kék szín jelöli azt az állapotot, amikor az akkumulátor töltődik, piros, amikor termel és szürke, amikor tartja az energiaszintjét. A fehér szín pedig azokat az órákat mutatja, amikor üres az energiatároló. A hőtérfépek alapján látszik, hogy az első két esetben jellemző az éjjeli és a napközbeni töltés is, míg a 3-as esetben kizárólag napközben tud feltöltődni az akkumulátor köszönhetően annak, hogy a naperőművi termelés csak napközben jelentkezik. A 4-es eset pedig annyiban tér el a többitől, hogy sokkal hosszabb töltődési ciklusokkal üzemel az akkumulátor a szélerőművek alacsonyabb termelésének köszönhetően. Összességében elmondható, hogy mind a négy esetet vizsgálva, vannak időszakok, amikor az akkumulátor egyáltalán nincs használatban. Használaton kívül legtöbbször a 4-es esetben van az akkumulátor, de a másik három esetben is megfigyelhetők ezek az állapotok, egy márciusban, egy a nyár elején, valamint ritkán van használatban az akkumulátor a szeptember elejétől november elejéig tartó időszakban. Bíró Bence TDK dolgozatához képest jelentős különbséget mutatnak ezek a hőtérfépek, mivel az ő eredményei nem mutatnak ennyi használaton kívüli állapotot. Ez annak köszönhető, hogy az én dolgozatomban kisebb gázárakkal számoltam, ami kisebb ár ingadozást eredményez, nem alakulnak ki akkora különbségek a napközbeni és az esti villamos energia árak között. Ebből arra lehet következtetni, hogy kapcsolat van a kialakult gáz ár, illetve az akkumulátor kihasználtsága között. Ezzel kapcsolatos érzékenységi vizsgálatot érdemes lehet folytatni a jövőre nézve, mely egy érdekes kutatási feladat lehet a modellem továbbfejlesztésénél. Azokban az időszakokban, amikor az akkumulátor nem tud ár-arbitrázs tevékenységből megfelelő bevételhez jutni, érdemes lesz a szekunder tartalék piacon részt vennie, hogy további bevételekre tegyen szert.



20. ábra Akkumulátor üzemállapotai

4. ÖSSZEFOGLALÁS/EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A klímaváltozás és a globális felmelegedés komoly kihívás elé állítja az egész világot. Nagyon fontos a következő évekre nézve, hogy a világ megoldja a karbonsemlegesség problémáját. A karbonsemlegességet az energiaszektorban is fontos lesz elérni, ennek megfelelően az Európai Uniónak is, és benne Magyarországnak is komoly vállalásai vannak arra nézve, hogy hogyan fogja az energiaszektorát fejleszteni. Egyik legfontosabb fejlődési cél, hogy a villamosenergia-termelésben növekedjen a megújuló energiaforrások részaránya. Ennek eléréséhez elengedhetetlen lesz valahogyan megoldani a villamosenergia-rendszer szabályozását is, ugyanis a megújuló energiatermelőknek köszönhetően egyre inkább kiszámíthatatlanná válik az energiatermelés.

Ennek a dolgozatnak fő célja volt az energiátárolók modellezése a magyar villamosenergia-rendszerben. Modelleztem Magyarország és a környező országok villamosenergia-rendszerét és különböző scenáriók mentén vizsgáltam, hogy a szivattyús-tározós erőmű, illetve az akkumulátor milyen paraméterek mellett lenne képes működni energiátárolóként a magyar villamosenergia rendszerben. Az akkumulátor esetén összehasonlítást végeztem, hogy milyen energiaforrásról üzemelve lenne képes leghatékonyabban ellátni a magyar rendszer igényeit.

Arra az eredményre jutottam, hogy a szivattyús tározós erőmű profitábilisan lenne képes működni a magyar villamosenergia-rendszerben úgy is, ha csak ár-arbitrázs tevékenységből származik bevétele. Megvizsgáltam, hogy hogyan működik a szivattyús tározós erőmű a különböző évszakokban és arra jutottam, hogy ősszel és télen általában két betárolási, kitárolási ciklussal üzemel, míg nyáron és tavasszal csak egyel. A kutatásom alapján egyértelműen kijelenthető, hogy egy szivattyús-tározós erőmű építése negatív hatással van a magyar villamosenergia-rendszerben kialakult árakra, és pozitív hatással van a rendszer CO₂ intenzitására, azonban ezek a hatások meglehetősen alacsonyak, hiszen a SZET kapacitása nem összevethető a magyar rendszer nagyságával, hiszen csak a magyar villamosenergia-termelés 0,6 %-ért lenne felelős.

Az akkumulátorok összehasonlítására irányuló kutatásomnak az lett az eredménye, hogy akkor képes legtöbbet termelni az akkumulátor, ha atomerőművi termelés mellé van telepítve, köszönhetően az atomerőművek állandó és kellően nagy termelési kapacitásának. Profitabilitás szempontjából szintén ebben az esetben éri meg legjobban a telepítés. Összehasonlítva a különböző eseteket az egyes évszakokra azt kaptam eredményül, hogy az akkumulátor közvetle-

nül a hálózatra kapcsolva nagyon hasonlóan működik, mint a nukleáris energiaforrásról üzemelve. A napenergiáról működéskor érthető okok miatt napközbeni töltésre korlátozódik az akkumulátor, míg a szél erőművekről történő töltés esetén egyértelmű korlátozó tényező, hogy nincs elegendő teljesítménye a magyar szél erőműveknek, ahhoz, hogy az akkumulátor igényeit ellássák.

Ezen dolgozatban megkezdett kutatás folytatására sok lehetőséget látok, ezek közül a következők a legérdekesebbek:

- Szekunder tartalékpiacon modellezése
- Akkumulátoros energiatárolás és szivattyús tározós erőművek együttműködésének vizsgálata a magyar villamosenergia-rendszerben
- Különböző akkumulátoros energiatárolási módok (Lítium ion, savas ólom, nikkel, folyékony akkumulátorok) összehasonlítása
- Villamosenergia-tárolási módok vizsgálata európai szintű modellekben
- Energiatároló egységek építésének szimulációja PLEXOS szoftver segítségével

5. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] K. Gerse, *Energiatárolók*. Akadémiai Kiadó, 2020. doi: 10.1556/9789634544937.
- [2] V. 'Rácz, "The role of storage solutions in the energy transition," Mar. 2023. Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: https://rekk.hu/downloads/events/Viktor%20Racz_REKK_The%20role%20of%20storage%20solutions_20230316.pdf?fbclid=IwAR1epDe_Wwseo-DJn_9Z3CBY5X8jDZUc2xhi00EdP3PyplY8drRcLA7usl0
- [3] Innovációs és Technológiai Minisztérium, "Nemzeti Energia- és Klímaterv," 2020. Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/hu_final_necp_main_hu_0.pdf
- [4] "Iparági konzultáció - Villamosenergia-tárolók." Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: https://www.mekh.hu/iparagi-konzultacio-villamosenergia-tarolok?fbclid=IwAR0DVMpzAR4p--VfyFI_iCVpvwvTxov2MfRMMyx3lI_Rh7SA7VFZgDA3Ozbw
- [5] N. Naval, J. M. Yusta, R. Sánchez, and F. Sebastián, "Optimal scheduling and management of pumped hydro storage integrated with grid-connected renewable power plants," *J Energy Storage*, vol. 73, p. 108993, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.EST.2023.108993.
- [6] J. Li *et al.*, "The potential assessment of pump hydro energy storage to reduce renewable curtailment and CO2 emissions in Northwest China," *Renew Energy*, vol. 212, pp. 82–96, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.RENENE.2023.04.132.
- [7] C. K. Chyong and D. Newbery, "A unit commitment and economic dispatch model of the GB electricity market – Formulation and application to hydro pumped storage," *Energy Policy*, vol. 170, p. 113213, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.ENPOL.2022.113213.
- [8] Y. Ko, G. Choi, S. Lee, and S. Kim, "Economic analysis of pumped hydro storage under Korean governmental expansion plan for renewable energy," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 214–220, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.EGYR.2019.08.047.
- [9] B. Steffen, "Prospects for pumped-hydro storage in Germany," *Energy Policy*, vol. 45, pp. 420–429, Jun. 2012, doi: 10.1016/J.ENPOL.2012.02.052.
- [10] M. Shabani, E. Dahlquist, F. Wallin, and J. Yan, "Techno-economic comparison of optimal design of renewable-battery storage and renewable micro pumped hydro storage power supply systems: A case study in Sweden,"

- Appl Energy*, vol. 279, p. 115830, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.115830.
- [11] A. G. Olabi *et al.*, “Battery energy storage systems and SWOT (strengths, weakness, opportunities, and threats) analysis of batteries in power transmission,” *Energy*, vol. 254, p. 123987, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2022.123987.
- [12] M. Haji Bashi, L. De Tommasi, and P. Lyons, “Electricity market integration of utility-scale battery energy storage units in Ireland, the status and future regulatory frameworks,” *J Energy Storage*, vol. 55, p. 105442, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.EST.2022.105442.
- [13] M. S. Guney and Y. Tepe, “Classification and assessment of energy storage systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 1187–1197, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.11.102.
- [14] A. Rangarajan, S. Foley, and S. Trück, “Assessing the impact of battery storage on Australian electricity markets,” *Energy Econ*, vol. 120, p. 106601, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.ENERCO.2023.106601.
- [15] Z. Dalala, M. Al-Omari, M. Al-Addous, M. Bdour, Y. Al-Khasawneh, and M. Alkasrawi, “Increased renewable energy penetration in national electrical grids constraints and solutions,” *Energy*, vol. 246, p. 123361, May 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2022.123361.
- [16] H. Zsiborács, G. Pintér, A. Vincze, Z. Birkner, and N. H. Baranyai, “Grid balancing challenges illustrated by two European examples: Interactions of electric grids, photovoltaic power generation, energy storage and power generation forecasting,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 3805–3818, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.06.007.
- [17] “PLEXOS.” Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.energyexemplar.com/plexos>
- [18] “National energy and climate plans.” Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/national-energy-and-climate-plans-necps_en#final-necps
- [19] B. 'Biró, “Út az energiaválságból egy fenntartható energiagazdálkodásba – Magyarország és a szomszédos országok villamosenergia-ellátásának nagy felbontású szimulációja és elemzése.” Nov. 01, 2022.
- [20] “HUDEX Magyar Derivatív Energiatőzsde.” Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://hudex.hu/hu/piaci-adatok/foldgaz/napi-adatok>
- [21] “Hátszelet kapott az eddig mindig elkaszált erőműterv.” Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.vg.hu/energia-vgplus/2023/09/hatszelet-kapott-az-eddig-mindig-elkaszalt-eromuterv>