

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

BAROSS BENCE

7. FÉLÉVES ENERGETIKAI MÉRNÖK BSC. HALLGATÓ
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA
DOLGOZAT

Energiatárolók és konvencionális erőművek szerepe a jövő tartalék
piacán

Témavezetők:

Biró Bence
PhD hallgató

Prof. Dr. Aszódi Attila
egyetemi tanár

Budapest, 2024

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	1
1. Bevezetés	2
1.1. Téma aktualitásai	2
1.2. Szakirodalmi áttekintés	3
1.3. Dolgozat célja és felépítése	4
2. Magyarországi tartalékpiac felépítése	6
3. Adatok és módszerek	11
4. Eredmények	18
4.1. Kiegyenlítő energia piac összetétele Magyarországon 2030-ban	18
4.2. Kiegyenlítő energia ára Magyarországon 2030-ban	22
4.3. Kiegyenlítő energia igények kielégítése Magyarországon 2030-ban	25
4.4. Energiatárolók működése a villamosenergia- és a tartalék piacon	27
5. Összefoglalás	31
Felhasznált források	32

ELŐSZÓ

Különböző megállapodások születnek arra nézve, hogy hogyan védhető meg a bolygónk és hogyan kerülhető el a klímaváltozás. A megállapodások célul tűzik ki a teljes karbonsemlegeséget 2050-re. Ennek megfelelően a jövőben köszönhetően a növekvő megújuló energia kapacitásoknak a tartalékpiacon megbízhatósága és hatékonysága kulcsszerepet játszik az ellátásbiztonság fenntartásában. A dolgozatomban célja az energiatárolók és a hagyományos erőművek jövőbeli szerepének vizsgálata a tartalékpiacon. Az energiatárolási technológiák folyamatos fejlődése és a megújuló energiaforrások térnyerése új lehetőségeket és kihívásokat hoz a villamosenergia-rendszerek számára. Ezzel párhuzamosan a konvencionális erőművek rugalmassági képességei is fontosak maradnak a piaci stabilitás és az optimális költségelosztás szempontjából.

A dolgozatomban a PLEXOS szoftverben felépített villamosenergia piaci és tartalékpiacon modelljeim alapján elemzem az energiatárolók és a konvencionális erőművek szerepét a 2030-as villamosenergia-rendszerben. Összehasonlítom a piaci mechanizmusokat és a különböző technológiák viselkedését annak megfelelően, hogy azok a villamosenergia-piac mellett a tartalékpiacon is szerepelnek-e. Kitérek a magyarországi tartalékpiacon felépítésére és szerepére is a jövő villamosenergia-rendszerében.

* * *

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, 2024.10.30.

Baross Bence

1. BEVEZETÉS

A klímaváltozás és a globális felmelegedés megkerülhetetlen témává váltak az utóbbi évtizedben. Hatásuk az energiaszektorban is érezteti magát. Az Európai Unió célul tűzte ki a European Green Deal keretein belül [1] a teljes karbonsemlegesség elérését 2050-re, amelyet később a RePower EU [2] egyezség során meg is erősített. Ezeknek a céloknak az elérése érdekében Magyarország is, mint megannyi más ország megújuló energiatermelők telepítésébe kezdett az utóbbi pár évben, amely érzékelteti hatását a villamosenergia-rendszer stabilitásában, megbízhatóságában [3].

1.1. Téma aktualitásai

Köszönhetően a nagy mennyiségű újonnan beépült, időjárásfüggő megújuló energia termelő kapacitásnak szükségszerűvé vált a kiegyenlítőkapacitások növelése is a villamosenergia-rendszerben. Több lehetőség is van a kiegyenlítő energia igény kezelésére. Egyik oldalról a pontosabb menetrendezés jelenthet megoldást a kiegyenlítő energia keletkezésének megakadályozására, azonban a meteorológiai modellek pontosságának növelésében komoly korlátok vannak, így sosem lesznek olyan pontos menetrendek, amelyek minden termelési hibát lefednek. Továbbá nem csak termelés, de fogyasztás oldalon is jelentkezhetnek fogyasztási hiányok vagy többletek. A menetrendek pontosítása mellett a kiegyenlítő energiatermelésre alkalmas erőművek telepítése jelenthet még megoldást. Ezek lehetnek hagyományos fosszilis tüzelőanyaggal működő erőművek, vagy atomerőművek, de lehetnek különböző energiatárolók is.

Különböző fosszilis tüzelőanyagokkal működő erőművek építése időszakosan ugyan megoldást jelenthet a kiegyenlítő energia kezelésére, azonban amennyiben cél 2050-re a teljes karbonsemlegesség elérése, akkor ezeket az erőműveket is idővel ki kell vezetni a villamosenergia-rendszerből. Az atomerőművek nagy egységteljesítményükkel és karbonsemlegességükkel ugyanakkor megoldást jelenthetnek a jövő villamosenergia-rendszerében a folyamatos zsinór-áram termelésére és a modernebb típusú erőművek kiegyenlítő energia termelésére is alkalmasak. Ha azonban gyorsabban telepíthető és gyorsabb teljesítményváltoztatásra alkalmas erőművi egységeket szeretnénk a villamosenergia-rendszerbe építeni, akkor megfelelő választás lehet az energiatárolók telepítése a rendszerbe.

A villamosenergia-tárolásra több lehetőség is létezik [4], azonban jellemzően a piacon a különböző akkumulátoros energiatárolók szerepelnek, valamint egy már évtizedek óta alkalmazott technológia a szivattyús-tározós erőművek. Azon kívül, hogy a piacon is leginkább ezek vannak jelen, Magyarország távlati energiastratégiája is ezzel a két módszerrel foglalkozik részletesebben [5].

A magyar villamosenergia-rendszerben már jelenleg is üzemben vannak akkumulátoros energiatárolók, ezek főleg lítium-ionos akkumulátortelemek. Az összes beépített kapacitásuk 2024 októberi adat alapján elérte a 170 MW beépített teljesítményt és a 270 MWh beépített kapacitást [6]. Ez a szám pedig az évtized végéig csak növekedni fog, mivel a Nemzeti Energia és Klíma-terv alapján 400 MW beépített teljesítmény elérése a cél 2030-ra. Azért, hogy ezt a célt elérje Magyarország egy pályázat is indult, amelynek keretein belül közel 400 MW teljesítményű akkumulátoros energiatároló fog rendszerbe lépni 2026-ig. Ezen felül pedig várható, hogy az évtized végére szivattyús-tározós erőmű is létesülni fog Magyarországon, ehhez kapcsolódóan már több helyszín is megvizsgálásra került [7].

1.2. Szakirodalmi áttekintés

Ahhoz, hogy tisztába kerüljünk a villamosenergia-piaci modellek, illetve ezen belül is a tartalékpiaci modellek aktualitásaival és céljaival fontos körbejárnunk az ilyen típusú modellekről szóló irodalmat akár Magyarországra, akár az egész világra.

Átnézve az irodalmat több olyan cikket is találtam, amelyeknek témája a villamosenergia piac modellezése egy adott országra, térségre. Ezek közül kiemelném Barry Johnstonnak és társainak munkáját [8], akik egy PLEXOS modell segítségével vizsgálták az Írország villamosenergia-rendszerét. Kutatásukban vizsgálták, hogy milyen hatással van az ország villamosenergia-rendszerére a nagy mennyiségben beépülő szélenergia kapacitás. Ehhez létrehoztak és visszamenőleg validáltak egy modellt, amely megfelelően reprezentálta az ír villamosenergia-rendszer sajátosságait.

Tartalékpiaci modellekre is találtam példákat. Voltak, akik azt modellezték, hogy milyen eszközökkel lehetne hatékonyan összekapcsolni az európai tartalékpiacot [9], illetve vannak olyan tanulmányok is, amelyek egy konkrét technológia részvételét elemzik a tartalékpiacon. Nastaran Naseri és társai [10] kutatásukban megvizsgálták, hogy egy akkumulátoros energiatárolónak hogyan optimális részt venni a tartalékpiacon. Modelljüket a német szabályozási rendszerhez igazodva készítették el.

Ahhoz, hogy a megújuló energiatermelők fokozatos térhódítása a villamosenergia-rendszerekben kezelhető legyen tartalékpiacon szinten a termelő vállalatok, szabályozó szervezetek és rendszerüzemeltetők is egyre több modellt késztenek, hogy optimálisan tudjanak részt venni az adott piacokon, vagy, hogy megfelelően tudják üzemeltetni azokat. Ezeket a modellezési megközelítéseket vizsgálta cikkében Pablo González [11], aki kutatásában kitér arra, hogy mik azok a szempontok, amelyeket feltétlenül érdemes figyelembe venni egy ilyen piaci modell megépítésekor, valamint áttekintő irodalomkutatást végez arra vonatkozóan, hogy melyek azok a modellek, amelyek a legtöbb segítséget nyújthatják egy adott probléma megoldásához.

Vannak olyan tanulmányok is, amelyek azzal foglalkoznak, hogy egy akkumulátoros energiatároló rendszer milyen piacokon, milyen bevételek elérésére képes. Ahmed Mohamed és társai [12] kutatásukban vizsgálták, hogy egy akkumulátoros energiatároló rendszernek hogyan változnak a bevételei, ha a villamos energia értékesítés mellett kiegyenlítő energiát is értékesít. Számításaikat a francia villamosenergia-rendszerre végezték el. Arra az eredményre jutottak, hogy ha a tartalékpiacon is aktívan szerepel az akkumulátoros energiatároló rendszer, az nagyjából 76%-os profit növekedést eredményez a számára.

Hasonlóan Maysam Khojasteh tanulmányában [13] azt vizsgálta, hogy egy akkumulátoros energiatároló milyen bevételeket tud elérni egy szél erőművel együttműködve a különböző energia és tartalékenergia piacokon.

Chi Kong Chyong és társa tanulmányukban [14] pedig azt vizsgálták, hogy a Nagy Britanniában üzemben lévő szivattyús energiatárolóknak milyen bevételi forrásaik vannak jelenleg a piacon és mire számíthatnak a jövőben. Vizsgálták egy esetleges új szivattyús energiatároló beruházásának a lehetőségét, de arra jutottak, hogy ha a kiegyenlítő energia piacán nem kínálnak további lehetőségek a tároló számára, akkor nem fogja megérni a beruházás.

1.3. Dolgozat célja és felépítése

Az irodalomkutatás alapján kimondható, hogy sok olyan tanulmány van, amely azzal foglalkozik, hogy az energiatárolóknak milyen lehetőségeik vannak a villamosenergia piacon és hogy milyen modellezési megfontolások alapján lehet ezeket az erőműveket optimálisan üzemeltetni és megépíteni. Úgy gondolom azonban, hogy szükséges vizsgálni azt is, hogy milyen hatással vannak ezek a telepített egységek az adott ország vagy régió villamosenergia-ellátására, -áraitra és tartalékpiacon szolgáltatásaira.

Mivel ilyen típusú modell tudomásommal Magyarországra és a környező országokra még nem készült, ezért nekem célom az, hogy a PLEXOS szoftver segítségével, építve a korábbi munkámra [15] felépítsek egy villamosenergia-piaci modellt órák bontásban 2030-ra, amely képes tartalékpiazi számítások elvégzésére is és együttesen vizsgálja a magyarországi energiatárolók viselkedését adott piaci környezetben. Számításaim során szeretném vizsgálni, hogy milyen hatással van a tartalékpiacon, ha a tervezett akkumulátorok és szivattyús energiatárolók is rendszerbe építésre kerülnek 2030-ra, illetve milyen különbségeket jelentene, ha csak egyik, vagy másik cél valósulna meg.

A következő fejezetben bemutatom a magyarországi tartalékpiacon felépítését, aktuális piaci trendjeit. A harmadik fejezetben kitérek arra, hogy milyen adatok felhasználásának segítségével építettem fel a modelljeimet, illetve elmagyarázom azt is, hogy mit és hogyan modelleztem. A negyedik fejezetben bemutatom a szimulációk során kapott eredményeket, míg az utolsó 5. fejezetben összefoglalom a dolgozatot és következtetéseket vonok le a szimulációim eredményeiből.

2. MAGYARORSZÁGI TARTALÉKPIAC FELÉPÍTÉSE

Ahhoz, hogy pontosan megértsük miért van szükség tartalékpiaci modellekhez, illetve, hogy értelmezni tudjuk a modellem eredményeit szükség van a tartalékpiac szerepének és felépítésének megismerésére. A következő fejezetben bemutatom Gerse Károly Villamosenergia-piacok című könyve alapján [16], hogy miért van szüksége a villamosenergia-rendszernek a tartalékpiaci termékekre és hogy milyen típusú termékek vesznek részt ma a magyar kiegyenlítő energia piacon.

A villamosenergia-rendszereket egy úgynevezett rendszerirányító irányítja, ez a magyar villamosenergia-rendszer esetében a MAVIR [17]. A rendszerirányító feladata többek között az, hogy a rendszerben egyensúlyban tartsa a termelést és a fogyasztást, ezáltal stabilan tartva a rendszer frekvenciáját. Ahhoz, hogy a termelés és a fogyasztás egyensúlya kialakuljon pontosan ismerni kell az adott pillanatban fogyasztani kívánt energia mennyiségét és ugyan annyi energiát kell a rendszerbe táplálni erőművi oldalról.

A megújuló energiatermelők megjelenésével a rendszerben nem csak a fogyasztás előrejelzése vált kulcsfontosságúvá, hanem a termelés is. Ahhoz, hogy a fogyasztás és a termelés egyensúlya minden pillanatban fennálljon nem elegendő a minél pontosabb előrejelzés, hanem szükséges a rendszerben tartalék termelők, illetve fogyasztók fenntartása is, akik akkor lépnek be a rendszerbe, amint felborul annak egyensúlya.

A villamosenergia-rendszer tartalékjai lehetnek olyan hagyományos erőművek, amelyek növelni, vagy csökkenteni képesek a teljesítményüket előre meghatározott teljesítménytartományban, előre meghatározott idő alatt, az ilyen típusú tartalékokat nevezzük meleg tartaléknak. Ezen kívül lehetnek olyan termelők (hideg tartalék), akik álló állapotból képesek termelni szintén előre meghatározott idő alatt, előre meghatározott teljesítmény szinten. Ugyan így léteznek olyan rugalmas fogyasztók is, amelyeknek bekapcsolásával csökkenthető a rendszerben kialakult termelési többlet az adott fogyasztó igényének csökkentésével. Továbbá léteznek még az utóbbi időben egyre népszerűbbé váló energiatároló berendezések is, amelyek adott esetben hálózatra termelni és onnan elfogyasztani is képesek a villamos energiát.

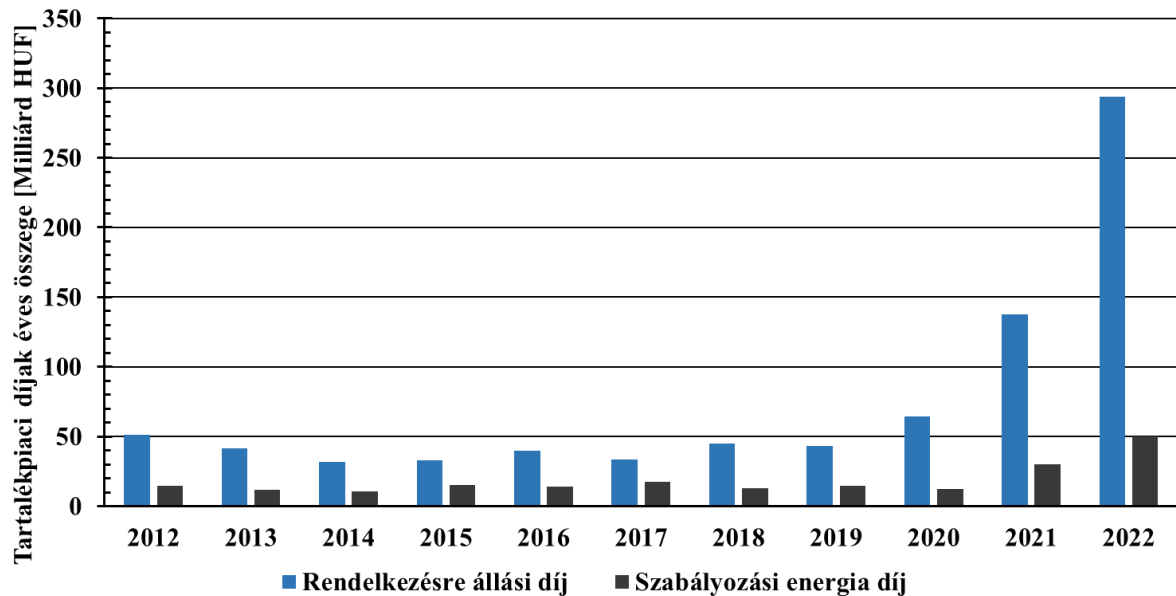
Ahhoz, hogy a rendszerszintű tartalékokat koordinálni lehessen különféle piaci termékek kialakítása szükséges [18]. A villamosenergia-rendszerekben alapvetően három féle tartalékról beszélünk. Létezik primer, szekunder, illetve terciér tartalék is. A primer automatikus, a szekunder lehet automatikus és kézi is, míg a terciér csak kézi szabályozású. Primer szabályozásról

pár másodperces tartományban beszélhetünk, míg szekunder szabályozás esetében percen belüli teljesítmény változtatásról, tercier esetében pedig 15 percen belül igénybe vehető szabályozási teljesítményről. Energiatárolók elsősorban primer és szekunder tartalékként vehetőek igénybe a tartalékpiacon, azon belül is leginkább a szekunder tartalékpiacon. Ennek megfelelően dolgozatomban ennek a piacnak a vizsgálatára fókuszáltam.

A tartalékpiacok működése rendszerirányítóként eltérő lehet, de általánosságban elmondható, hogy hasonlóan működik az energiapiacokhoz. Minden időegységre, ez lehet óra, vagy negyedóra van egy szükséges energiatartalék mennyiség, amelyet a rendszerirányító előre meghatároz. Ezt a mennyiséget adott időszakra a rendszer állapotához képest fel és le irányba is meghatározhatja, azaz többlet termelésre és többlet fogyasztásra, vagy termelés csökkentésre is nyújthat be igényt. Ezekre az előre meghatározott mennyiségekre minden piaci szereplő ajánlatot ad be, amelyet a saját költségei alapján határoz meg. Az ajánlatokat a rendszerirányító sorrendbe állítja és kiválasztja a számára legkedvezőbbeket a szükséges mennyiség eléréséig. Ezek után a győztes ajánlatot tevők az adott időszakra rendelkezésre állási díjat kapnak attól függetlenül, hogy aktiválásra kerül-e az ajánlatuk, azaz, hogy ténylegesen rendszerbe kell-e lépniük. Amennyiben ténylegesen rendszerbe kell lépniük, mivel a rendszer állapota azt az adott időszakban megkívánja, akkor az aktivált mennyiség után aktiválási energia díjat is kapnak. Ezeket a díjakat azok a termelők, vagy éppen fogyasztók fizetik meg, amelyek az adott rendszerállapotot okozták. Tehát azok, akik nem termeltek annyit, mint amennyit előre menetrendeztek, valamint azok, akik többet, vagy kevesebbet fogyasztottak, mint amennyit előre bejelentettek.

Az utóbbi évtizedben a megújuló energiatermelők beépített kapacitásának növekedésével jelentősen nőttek a tartalékpiaci árak is. A kiegyenlítő energia piacon az utóbbi időszakban a stabil éves maximum 50 milliárd Ft-os tartalékpiaci díjakról egészen 300 milliárd Forint körülire nőtt a tartalékpiaci díjakra fordított összeg éves szinten. Ezeket a változásokat az 1. ábrán szemléltettem. Külön oszlopokban látható a rendelkezésre állási díj és a szabályozási energia díj éves értékének változása. Mindkettő értékében jelentős növekedés látható az utóbbi pár évben.

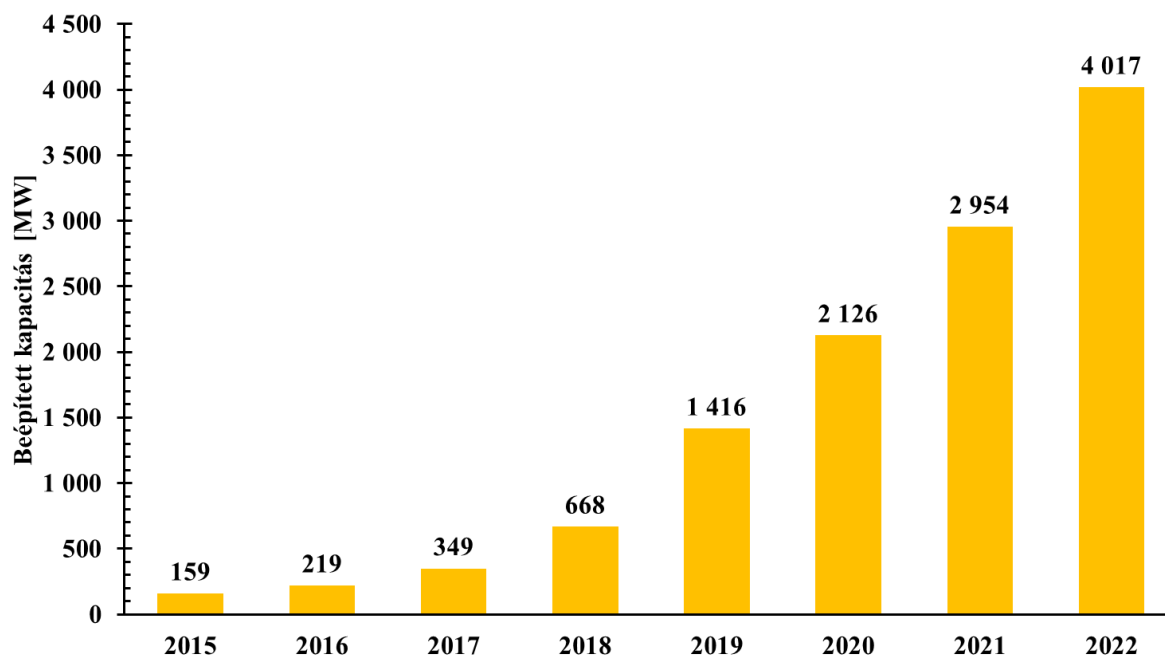
Rendelkezésre állási és szabályozási energia díjak alakulása 2012-től 2022-ig Magyarországon



1. ábra: Rendelkezésre állási és szabályozási energia díjak Magyarországon (adatok forrása [3], saját ábrázolás)

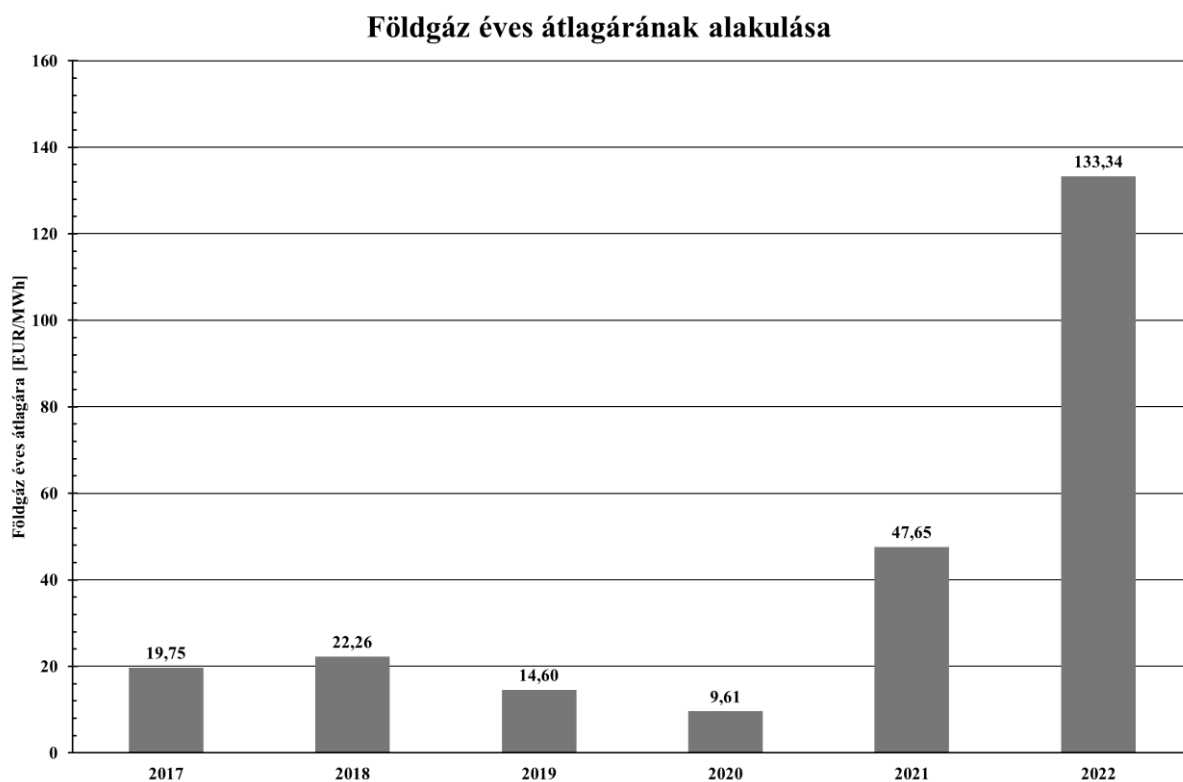
Egyértelmű párhuzam vonható a tartalékpiazi árak növekedése és a megújuló energiatermelők beépített kapacitásának növekedése között. Magyarországon elsősorban a naperőmű beépített kapacitások növekedése az, amely jelentősnek mondható, ezért a 2. ábrán megjelenítettem, hogy 2015-től 2022-ig a Magyar Energetikai és Közmű Hivatal 2022-es adatai [3] alapján hogyan alakultak a naperőművek beépített kapacitásai.

Naperőművek beépített kapacitásának alakulása Magyarországon 2015-2022



2. ábra: Naperőművek beépített kapacitásának alakulása Magyarországon (adatok forrása [3], saját ábrázolás)

Ezen kívül megfigyelhető a kapcsolat földgáz árak növekedése és a tartalékpiaci kiegyenlítő energia díjak változása között is. A földgáz árakat a 3. ábrán jelenítettem meg 2017 és 2022 között.



3. ábra: Földgáz árának alakulása 2017-től 2022-ig (adatok forrása: [19], saját ábra)

Ezek miatt a tényezők miatt tartottam fontosnak, hogy modelljeimben foglalkozzak a tartalékpiacon szimulálásával is. Azt, hogy milyen pontossággal és eszközökkel modelleztem a tartalékpiacon és annak szereplőit a következő fejezetben fejtem ki részletesebben.

3. ADATOK ÉS MÓDSZEREK

Ebben a fejezetben bemutatom, hogy hogyan építettem fel a modelletemet, hogy megfelelő módon tudjam szimulálni a magyar villamosenergia- és tartalék piacot a 2030-as évben. Továbbá kitérek arra is, hogy ehhez milyen adatokra volt szükségem és azokat hogyan állítottam elő.

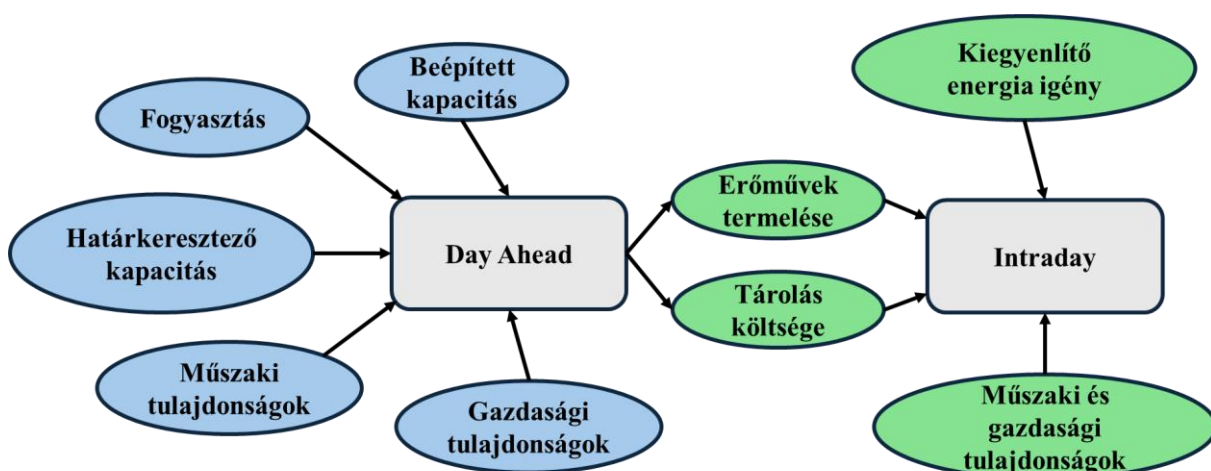
A modellezés során célom az volt, hogy felépítsem Magyarország és a környező országok villamosenergia-piacát 2030-ra, valamint Magyarország tartalékenergia piacát szintén 2030-ra. Azért ezt a dátumot választottam, mivel a legtöbb ország energia stratégiája ezzel a dátummal tűz ki célokat maga elé, így erre az időtávra egyszerűbb bemeneti adatokat szerezni. A villamosenergia modellt már korábbi munkámban is felépítettem, amelyről dolgozatot is írtam a 2023/24-es Tudományos Diákköri Konferenciára [15]. Ezen kívül az alapvető bemeneti adatokban nagyban támaszkodtam témavezetőim - Biró Bence és Prof. Dr. Aszódi Attila - kutatására is [20]. Ennek megfelelően ennek a munkának a legfőbb célja az volt, hogy a már létező modelletem kiegészítsem olyan funkciókkal, hogy a modell képes legyen a tartalékpiaci körülmények modellezésére is Magyarország energiapiacán.

A modellezéshez az Energy Exemplar piacon kapható PLEXOS szoftverét használtam, amelyben lehetőség van egy átlátható felületen különböző erőművek, fogyasztási igények, kiegyenlítő-energia igények, ezekhez tartozó tulajdonságok és a közöttük lévő kapcsolat megadására, valamint a modell megépítése után különböző szimulációk elvégzésére. A PLEXOS a tudományos közösségben egy széles körben használt szoftver. Segítségével az utóbbi időben Nikolaos E. Koltsaklis és társa építettek egy tartalékpiacon és energiapiacon egyaránt szereplő termelőkkel foglalkozó modellt [21], Abhijith Prakash és társai az Ausztrál villamosenergia rendszer tartalékpiacnak alakulását vizsgálták a növekvő megújuló energiatermelés hatásának megfigyelésével [22], míg Ahmed Hassan A. El-Sayed és társai Egyiptom jövőbeli villamosenergia-rendszerének vizsgálatához használták fel a szoftvert [23].

A villamosenergia-piaci modell felépítése az előző munkámhoz képest alapjaiban nem változott meg. A modellezett országok Magyarországon kívül Ausztria, Szlovákia, Románia, Szerbia, Horvátország és Szlovénia voltak. Ukrajna ugyan Magyarország villamosenergia-hálózataival közvetlen kapcsolatban áll, de a háború okozta bizonytalan helyzet miatt az ő villamosenergia-rendszerük jövőjét nehéz megbecsülni, így nem modelleztem. A különböző országokat egy-egy nódusként definiáltam, amelyekhez az egyes országok erőművi portfóliója csatlakozik. Az erőműveket energiaforrás alapján csoportosítottam, mivel erőmű egységre lebontott adatok

nem voltak elérhetőek. Ezeket a nódusokat pedig határkeresztező kapacitásoknak megfelelő vonallal kötöttem össze. Részletesebben a villamosenergia-piaci modell felépítésében korábbi munkámban foglalkoztam.

Ahhoz, hogy a tartalékpiacon is modellezni tudjam PLEXOS-ban szükségem volt két külön modellre is a szimulációk elvégzéséhez. Az első modell, amelyet én „Day Ahead” (magyarul másnapi) modellnek neveztem el pont ugyan úgy működik, mint a szimpla villamosenergia-piac modell. Ez alapján a modell alapján kialakul minden országban egy villamosenergia-ár, az egyes erőművek termelése és kielégítődnek a fogyasztási igények. Ezek után szükség van egy második modellre is, amelyet „Intra Day” (magyarul napon belüli) modellként neveztem el. Ennek feladata, hogy a tartalékpiacon folyamatokat modellezze. Ebben a modellben definiáltam Magyarországra vonatkozó, órás bontású kiegyenlítő energia igényt 2030-ra. Meghatároztam, hogy mely erőművek, illetve energiatárolók alkalmasak arra, hogy ezt a kiegyenlítő-energia igényt kiszolgálják, megadtam azt, hogy mindezt milyen műszaki és gazdasági paraméterek mellett képesek megtenni, illetve megadtam azt is, hogy milyen ára van annak, ha a kiegyenlítő-energia igények nem kerülnek kiszolgálásra. Az „Intra Day” modellnek bemeneti adatai voltak a „Day Ahead” modell erőművi termelés adatai. A szoftver ugyanis így tudja kezelni azt, hogy az energia kiszolgáláson felül milyen lehetőségek adódnak erőművi szinten a kiegyenlítő energia kiszolgálására. Azért, hogy a „Day Ahead”, illetve az „Intra Day” modellek közti kapcsolat könnyebben értelmezhető legyen, ezért a 4. ábrán vizuálisan is megmutatom, hogy milyen file-ok szerepelnek bemenetként egyik, illetve másik modell esetében, valamint, hogy a modellek egymásnak milyen fájlokat adnak át.

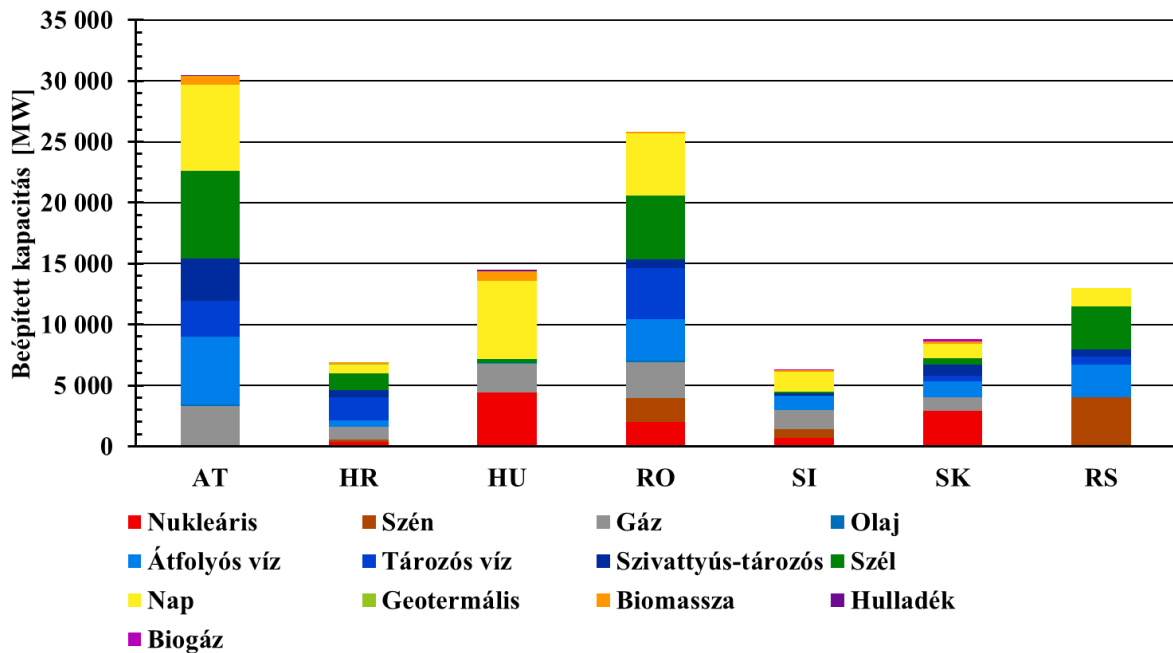


4. ábra: A modellek felépítése és a bemeneti adatok

Miután bemutatom a modellek közti kapcsolatot szeretnék kitérni arra is, hogy milyen adatokat használtam fel ahhoz, hogy a modelleket felépítsem.

Első sorban szükségem volt a villamosenergia-piac modellezésekor felhasznált órás bontású termelési és fogyasztási adatokra 2030-ra, amelyeket témavezetőim tanulmánya [20] alapján építettem bele a modellembe. Ezen kívül az egyes erőművek alapvető tulajdonságai is ezen publikáció alapján kerültek meghatározásra. Ezek közé a tulajdonságok közé tartozik fosszilis erőművek esetén a beépített kapacitás, a fel, illetve leterhelési sebesség, a minimum fel és leterhelési idő, az üzemanyag költsége, illetve a minimum stabil szint. Megújuló erőművek esetében pedig a beépített kapacitás és az órás bontású kihasználási tényezők, amelyek 2019-es adatok alapján lettek prediktálva a beépített kapacitások arányának segítségével 2030-ra. Az energiatárolók esetében pedig ilyen tulajdonságok a teljes körfolyamati hatásfok, valamint a beépített teljesítmény és kapacitás. A 2030-ra tervezett beépített kapacitásokat a 5. ábrán szemléltettem. A magyarországi 400 MW beépített akkumulátor teljesítményhez 800 MWh beépített kapacitást feltételeztem, míg a 600 MW beépített szivattyús tározó teljesítményhez 2 400 MWh-ás tározó kapacitást.

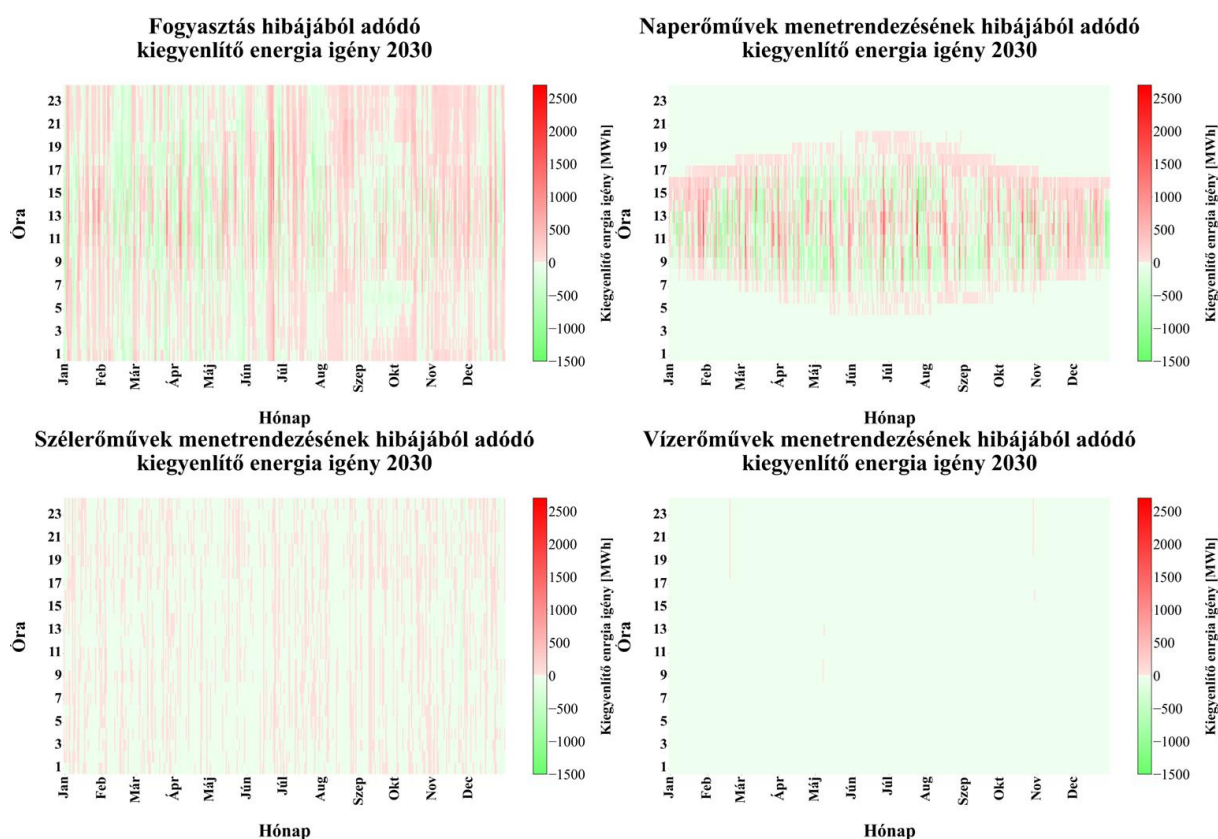
Erőművek beépített kapacitása erőforrás szerint a vizsgált országokban, 2030



5. ábra: Erőművek beépített kapacitása az egyes országokban erőforrás szerint csoportosítva, 2030
(adatok forrása [20], saját ábrázolás)

Ahhoz, hogy a magyarországi tartalékpiacon modellezni tudjam szükség volt Magyarország kiegyenlítő-energia igényére 2030-ban órás bontásban. Modellemben leegyszerűsítve a tartalékpiacon a kiegyenlítő energia igényt szekunder tartalék piaci igényként definiáltam. Az órás bontású adatsort, amely külön fel, illetve le irányban meghatározza a kiegyenlítő energia igényt elő kellett állítanom ahhoz, hogy a szimulációk során a szoftver meghatározhassa, hogy melyik termelő tudja kielégíteni az igényeket. Az adatsor előállításához vettem a kötelező átvételi tarifa (KÁT) mérlegkörbe tartozó erőművek adatait, ugyanis ezeknek menetrendezéséről negyedórás bontásban közöl adatokat a MAVIR havi szinten [24]. Úgy gondoltam, hogy ezeknek az erőműveknek a menetrendezési hibái megfelelő módon reprezentálják a teljes erőművi portfólió menetrendezési hibáit. Ennek megfelelően vettem a 2023-as év összes hónapjában a KÁT mérlegkörbe tartozó nap, szél, illetve vízerőművek napi menetrendjét és valós termelését negyedórás bontásban. A negyedórás adatokból órás felbontású adatsort hoztam létre átlagolással, majd képeztem a különbségüket. Minden energiaforrású erőmű esetében arányosítottam a különbségeket a beépített kapacitásokkal 2030-ra, majd összegeztem az így kialakult menetrendezési hibákat. Azért, hogy a fogyasztás hibájától se tekintsek el vettem a 2023-as évi órás

bontású bruttó rendszerterhelés becslést [25] és kivontam belőle a bruttó hitelesített rendszerterhelés tényét és hasonlóan, mint a termelési adatoknál arányosítottam az értékeket a 2030-as tervezett fogyasztásnak megfelelően. Ezután előjel helyesen összegeztem a kialakult különbségeket és kettéválasztottam az adatsort pozitív, illetve negatív értékekre. A pozitívok a rendszerben úgy jelentkeztek, mint le irányú kiegyenlítő energia igény, a negatívok pedig úgy, mint fel irányú kiegyenlítő-energia igény. Az adatsor pontosítását későbbi munkáimban tervezem akár az erőművek kieséseinek modellezésével, akár más menetrend változást okozó tényezők feltárásával. Az 6. ábrán hőterképek segítségével meg is jelenítettem, hogy a különböző termelők, illetve a fogyasztás menetredezésének hibája milyen mértékben járult hozzá a kiegyenlítő energia igények kialakulásához. Minél nagyobb le irányú kiegyenlítő kapacitás igény alakult ki adott órában annál zölddebb a diagramm és minél nagyobb fel irányú kiegyenlítő kapacitás igény annál pirosabb. Jól látható a léptékekből, hogy elsősorban a fogyasztási hiba, valamint a naperőművek termelési hibája az, ami befolyásolja a kiegyenlítő energia igények mértékét.



6. ábra: Modellezés során felhasznált óras bontású adatsorok a fogyasztás és a megújuló erőművek menetredezési hibájából

A kiegyenlítő igényeken kívül szükség volt még egyéb bemenő adatokra is a tartalékpiacon modellezéséhez. A számítások során úgy határoztam, hogy a kiegyenlítő energia kiegyenlítését a magyarországi gázerőművek, atomerőművek, biomassza erőművek, illetve szivattyús-tározós erőművek és az akkumulátorok fogják végezni. Ennek megfelelően ezeknél az erőmű típusoknál szükséges volt megadni egy úgynevezett „reserve VO&M charge”-ot, amely az adott erőmű típus költségét jelenti, amelyet a kiegyenlítő-energia előállítására fordít. Ezeket az értékeket az adott erőmű maximális energiatermelő költségeként határoztam meg, mivel úgy gondoltam, hogy amikor kiegyenlítő-energiát kell termelni egy adott erőműnek, maximális a költsége. Az energiatárolók esetében azért, hogy pontosabb eredményt kapjak úgy határoztam meg a tároló kiegyenlítő energia előállítására fordított árát, hogy hozzáadtam a maximális energiatermelő költségéhez az adott órában a tárolóba betöltött villamos energia árát. Ezzel a módszerrel figyelembe tudtam venni azt, hogy a tárolónak előzetesen költsége van azzal, hogy energiát kell vételeznie a hálózatról (szivattyús-tározós erőművek esetében a víz magasabb helyre szivattyúzásához, míg akkumulátorok esetében az akkumulátor töltéséhez) hogy készen álljon a tartalékpiacon részvételre. Az adott órában az energiatárolóban eltárolt villamosenergia költségét a „Day Ahead” modellből tudtam kinyerni óras bontásban.

A kiegyenlítő energia kiszolgálására alkalmas erőművek esetében vannak további paraméterek is, amelyek befolyásolják a hatékonyságukat a tartalékpiacon kiszolgálásakor. Ilyen bemenő paraméter a minimum stabil szint, amely meghatározza, hogy az adott erőmű milyen minimális teljesítmény alatt képtelen a villamosenergia-termelésre. Azért, hogy pontosabb eredményeket kapjak a beépített nukleáris kapacitást ketté szedtem Magyarország esetében Paks I-re és Paks II-re. Paks II esetében modernebb technológiát feltételezve a minimum stabil szintet a teljes beépített kapacitás 50%-ra vettem fel, míg Paks I esetében ez az érték 90% lett. Ezen kívül figyelembe kell még venni a fel és a leterhelési sebességet is az erőművek esetében, valamint a minimum üzemelési és állási időket is. Ezeket a kiegyenlítő energia előállítás számára is fontos adatokat az 1. táblázatban jelenítettem meg azoknak az erőműveknek az esetében, amelyek részt vesznek kiegyenlítő energia szolgáltatásában.

	Biomassza	Gáz	Paks I	Paks II
Beépített kapacitás [MW]	148	2400	2000	2400
Minimum stabil szint [MW]	44,4	1032	1800	1200
Felterhelési faktor [MW/perc]	31,84	98,93	58,67	117,35
Leterhelési faktor [MW/perc]	31,84	113,33	58,67	117,35
Minimum üzemelési idő [h]		3,2	10	10
Minimum állási idő [h]		4,2	18	18

1. táblázat: Kiegyenlítőenergia szolgáltatás céljából fontos műszaki tulajdonságok

Energiatárolók esetében a tartalékpiac modellezés során mérvadó paraméterek voltak a minimum, illetve a maximum töltöttségi szint, valamint a teljes körfolyamati hatásfok is. A teljes körfolyamati hatásfok a szimuláció során 77,48% volt a szivattyús-tározós erőmű esetében és 86,49% az akkumulátor esetében. Minimum töltöttségi szintet pedig a teljes beépített kapacitás 10%-ában határoztam meg.

A modellezés során az energiatárolóknál volt még egy paraméter, amelyet szükséges volt beállítanom. Ez a paraméter a „Price Following”, amely egy 0-tól 1-ig terjedő skálán állítható. Az 1-es érték azt jelenti, hogy az energiatároló üzemelése során teljes mértékben arra törekszik, hogy a saját bevételét maximálja és nincs tekintettel arra, hogy a rendszerállapot mit kíván meg tőle, a 0-s érték pedig az ellenkezője, azaz a tároló teljes mértékben a villamosenergia-rendszer érdekeit szolgálja és célja a hálózatnak legoptimálisabb stratégia alkalmazása. A modellemben ezt az értéket 0,5-nek vettem fel azt feltételezve, hogy a jövőbeli szabályozások miatt az energiatárolók a villamosenergia-rendszer érdekeit is követni fogják, nem tisztán a haszonszerzés lesz a céljuk. A jövőben hasznosnak tartok egy érzékenységvizsgálatot arra nézve, hogy ennek a változónak a változtatása milyen hatással lenne a szimulációim eredményére.

A modelljeimben első körben csak a magyar piacon kialakult kiegyenlítő energia igényekkel foglalkoztam, de nagyban növelné az eredmények pontosságát, ha a későbbiekben a többi vizsgált ország kiegyenlítő energia igényét is figyelembe venném a modellek elkészítésekor. Munkám folytatásában mindenképpen szeretnék azzal is foglalkozni, hogy milyen hatással lenne a magyar villamosenergia-piacra az, ha a külföldi erőművek is részt tudnának venni Magyarországi tartalékpiacán, illetve ha a külföldi igények kiszolgálása is kritérium lenne.

4. EREDMÉNYEK

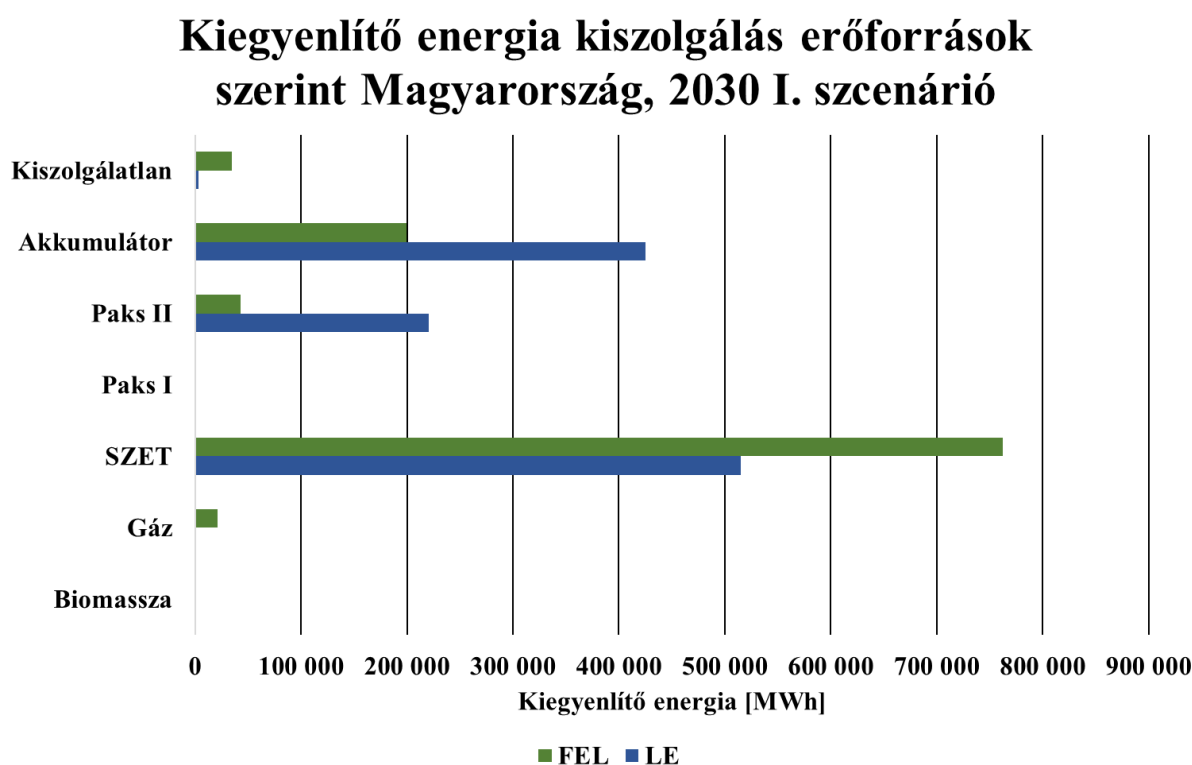
Ebben a fejezetben bemutatom, hogy milyen eredményre vezettek a szimulációim. A megépített modellem alapján 4 féle scenáriót vizsgáltam, ezeknek az eredményeit fogom összehasonlítani ebben a fejezetben. A 4 scenárió közül az első scenárióban úgy számoltam, hogy a magyar villamosenergia-rendszer rendelkezik a beépített akkumulátor és szivattyús-tározós erőmű kapacitással is. A második scenárióban azt feltételeztem, hogy csak a tervezett akkumulátor kapacitás fog beépülni a rendszerbe, a harmadik scenárióban pedig csak a szivattyús-tározós erőmű kapacitással számoltam. A negyedik scenárió különlegessége pedig az volt, hogy sem akkumulátor sem pedig szivattyús-tározós erőmű beépített kapacitással nem számoltam a magyar villamosenergia-rendszer esetében.

4.1. Kiegyenlítő energia piac összetétele Magyarországon 2030-ban

Ebben a fejezetben bemutatom, hogy az egyes scenáriókban milyen típusú erőművek mekkora mértékben járulnak hozzá a kiegyenlítő-energia igények ellátásához, valamint megvizsgálok azt, hogy milyen ára lesz egyes scenáriókban ennek a szolgáltatásnak. Továbbá kitérek arra is, hogy az általam definiált kiegyenlítő energia igénynek hány százaléka marad kiszolgáltatatlanul a különböző scenáriók esetében.

A kiegyenlítő energia kiszolgáltatását az első scenárióban zömében a szivattyús-tározós erőmű, illetve az akkumulátorok végezték a szimuláció eredménye alapján. Az kiegyenlítő energia erőforrások szerinti megoszlását az első scenárióban a 7. ábrán szemléltettem. Az ábrán jól látható, hogy míg az akkumulátor inkább a le irányú kiegyenlítő energia kiszolgáltatását végzi, addig a szivattyús-tározós erőmű a fel irányú kiegyenlítő energiából vállal többet. Ez véleményem szerint annak köszönhető, hogy mivel a szivattyús-tározós erőmű hosszabb tárolási kapacitással rendelkezik, ezért arányaiban kevesebbszer van teljesen kisütött állapotban, mint az akkumulátor így, ha igény van rá képes további energia kisütésére. Észrevehető, hogy Paks I és a beépített biomassza kapacitás szinte egyáltalán nem vesz részt ebben az esetben a kiegyenlítő energia piacon. Ez egyrészt annak köszönhető, hogy a biomassza erőművek beépített kapacitása elenyésző a többi erőmű kapacitásához képest. Paks I esetében viszont annak, hogy kedvezőtlenebb tulajdonságai miatt, mint például a maximum beépített kapacitásának 90%-áig történő leterhelés, vagy a lassabb fel és leterhelési sebesség nem képes versenyezni a nálánál sokkal kedvezőbb tulajdonságokkal rendelkező erőműtípusokkal. Ezek az eredmények

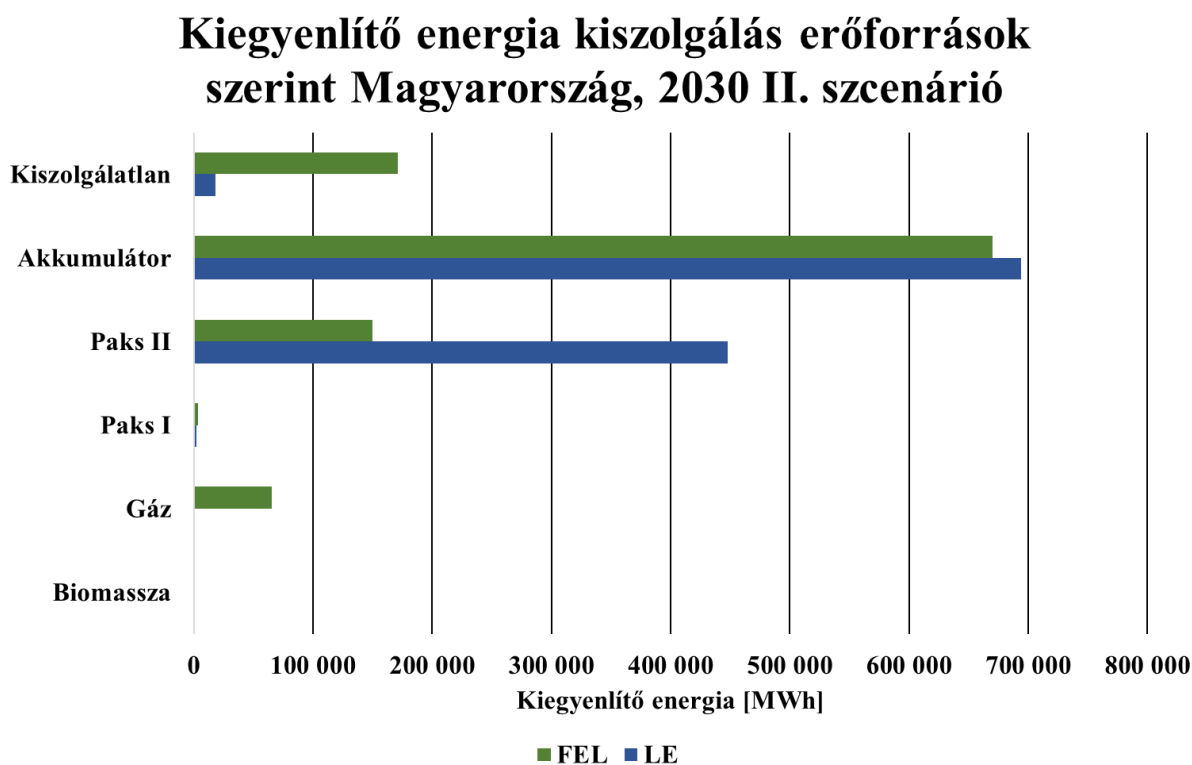
is hűen mutatják azt, hogy egy régebbi típusú atomerőműnek nem feladata a kiegyenlítő energia igények ellátása. Érdekes megfigyelni azt is, hogy a gáz tüzelőanyaggal működő erőművek leginkább csak a fel irányú kiegyenlítő-energia piacon vesznek részt, azon is nem túl nagy mértékben. Ez annak köszönhető, hogy a vizsgált erőművek közül ezek a típusú erőművek nyújtják legdrágábban a kiegyenlítő energiát. Kiszolgáltatlan kiegyenlítő energia is marad valamennyi a rendszerben, ez ebben az esetben fel irányú és jellemzően azért alakulhat ki, mivel olyankor van rá igény, amikor már alapvetően akkora az erőművek termelése, hogy nem tudnak több energiát szolgáltatni. Ilyenkor a valóságban ezt a kiegyenlítő energia mennyiséget külföldről szerzi be a rendszerirányító. A modellemben lehetőség van megadni egy olyan árat, amely azt mutatja meg, hogy mennyibe kerül az, ha nincs kiszolgálva az igényelt kiegyenlítő energia mennyiség. Ezt én 1000 \$/MWh-ra vettem fel.



7. ábra: Kiegyenlítő energia kiszolgálása erőforrások szerint Magyarországon 1. scenárió

Hasonlóan az első scenárióhoz a második scenárióban is az energiatárolók azok, amelyek a kiegyenlítő energia igény nagy részét kiszolgálják. Ebben az scenárióban csak akkumulátor kapacitásról beszélünk, mivel szivattyús-tározós erőművel itt nem számoltam. A kiegyenlítő energia igények kiszolgálásának megoszlását a második scenárióban a 8. ábrán szemléltettem

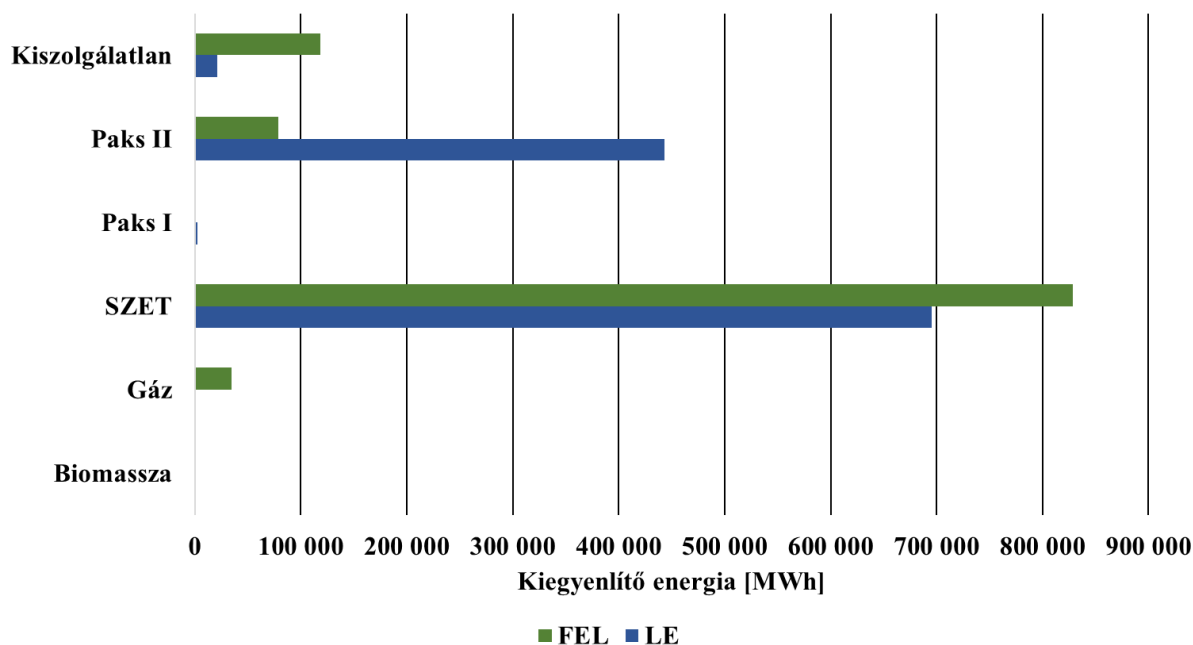
hasznos módon, mint az első scenárió során. Paks I és a biomassza erőművek ebben a scenárióban sem termelnek jelentős mennyiségű kiegyenlítő energiát, azonban ha minimálisan is, de megjelennek a piacon. Paks II viszont jelentős szolgáltatóvá lép elő a le irányú kiegyenlítő energia kiszolgáltatásában. Ez azért fordulhat elő, mivel az erőmű jellemzően zsinórban termel és az állandó termelési szinthez képest gazdaságosan leterhelhető, ha szükséges. Kiszolgáltatlan energia továbbra is jellemzően fel irányban keletkezik. Ebben az scenárióban több, mint az elsőben mivel több olyan üzemiállapot is létrejön, amikor már nem lehet több erőművet felterhelni és nincs több kisüthető energia a tárolókban.



8. ábra: Kiegyenlítő energia kiszolgáltatása erőforrások szerint Magyarországon 2. scenárió

A harmadik scenárió figyelve a 9. ábrán jól látható, hogy a szivattyús-tározós erőmű több fel irányú kiegyenlítő energiát tud szolgáltatni, mint az akkumulátor a 2-es scenárióban köszönhetően nagyobb teljesítmény-kapacitás arányának. Ezzel pedig csökkenti egyrészt Paks II és a gázerőművek által megtermelendő fel irányú kiegyenlítő energia mennyiségét, más részről pedig kevesebb kielégítetlen kiegyenlítő energia keletkezik a rendszerben, mint a második scenárióban. Paks I és a biomassza erőművek továbbra sem játszanak szerepet Magyarország kiegyenlítő energia igényének ellátásában.

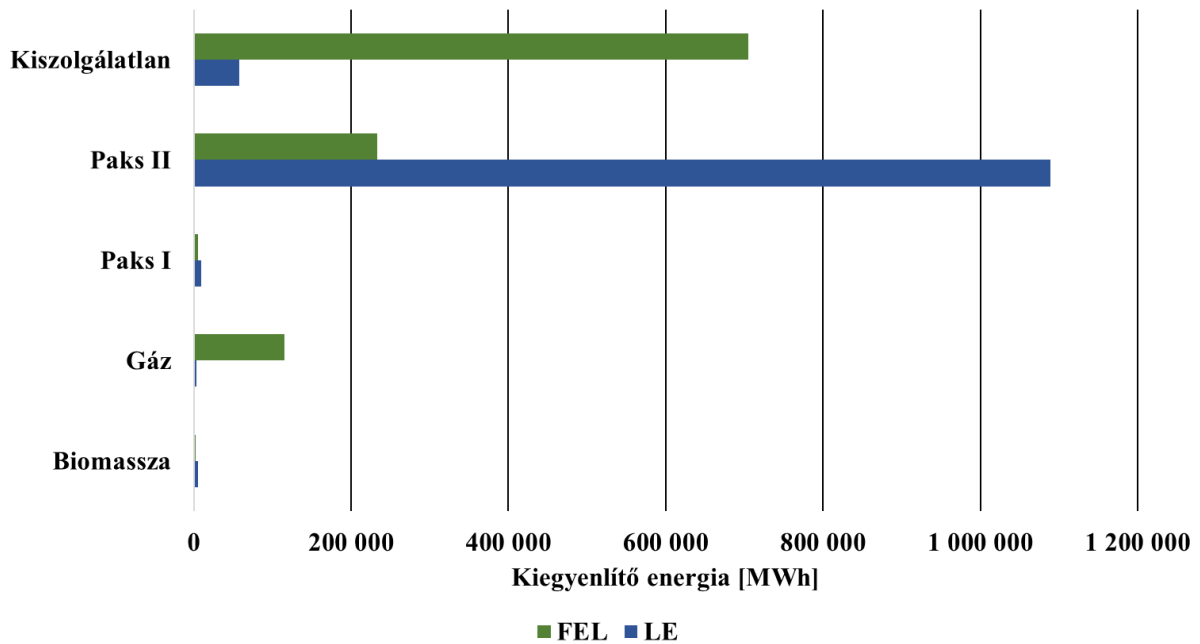
Kiegyenlítő energia kiszolgálás erőforrások szerint Magyarország, 2030 III. scenárió



9. ábra: Kiegyenlítő energia kiszolgálása erőforrások szerint Magyarországon 3. scenárió

Az utolsó negyedik scenárióban, amit a 10. ábrán szemléltettem jól látható, hogy az energiatárolók hiányát leginkább Paks II. leterhelésével igyekszik pótolni a rendszer. Ez le irányban egészen jól működik, azonban fel irányú kiegyenlítő energia esetében nem képes megoldani az energiatárolók okozta hiányt. Ezért alakulhat ki több mint 700 GWh-nyi kiegyenlítetlen fel irányú kiegyenlítő energia ebben az scenárióban.

Kiegyenlítő energia kiszolgálás erőforrások szerint Magyarország, 2030 IV. scenárió



10. ábra: Kiegyenlítő energia kiszolgálása erőforrások szerint Magyarországon 4. scenárió

Összességében elmondható, hogy Paks I szinte egyáltalán nem vesz részt a kiegyenlítő energia igények kielégítésében, míg a beépített biomassza kapacitások nem mérvadóak rendszerszinten. Jól látható az is megfigyelve a négy scenáriót, hogy energiatárolók hiányában a fel irányú kiegyenlítő energia kielégíthetetlen, valamint az is biztos, hogy Paks II szerepe a kiegyenlítő energia piacokon, főleg le irányban mérvadó lesz 2030-ban a szimulációk alapján.

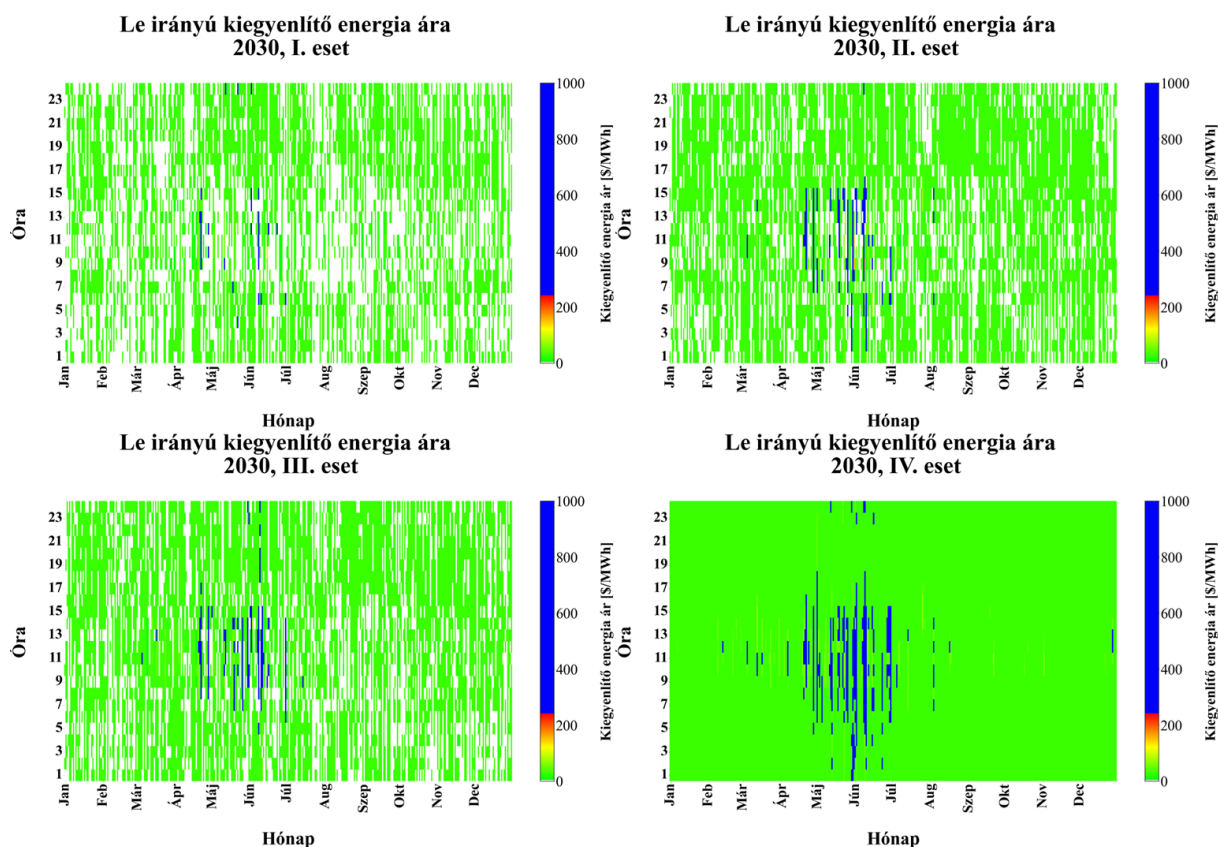
4.2. Kiegyenlítő energia ára Magyarországon 2030-ban

Ebben a fejezetben bemutatom, hogy a szimulációk eredménye alapján milyen árak várhatóak mind a fel, mind a le irányú kiegyenlítő energia piacokon Magyarországon 2030-ban. Először szeretném az árak változását bemutatni, azután pedig kitérek arra is, hogy egyes scenáriókban milyen gyakoriak a kiszolgáltatlan órák, illetve, hogy a kiszolgáltatlan mennyiségek hogyan aránylanak a teljes igényelt mennyiséghez képest.

A 11. ábrán hőtésképek segítségével jelenítettem meg, hogy hogyan alakul a le irányú kiegyenlítő energia ára Magyarországon 2030-ban. A hőtésképek az év minden óráját képesek egyetlen ábrán bemutatni. Vízszintes tengelyen az év 365 napja található (megjelenítve az adott

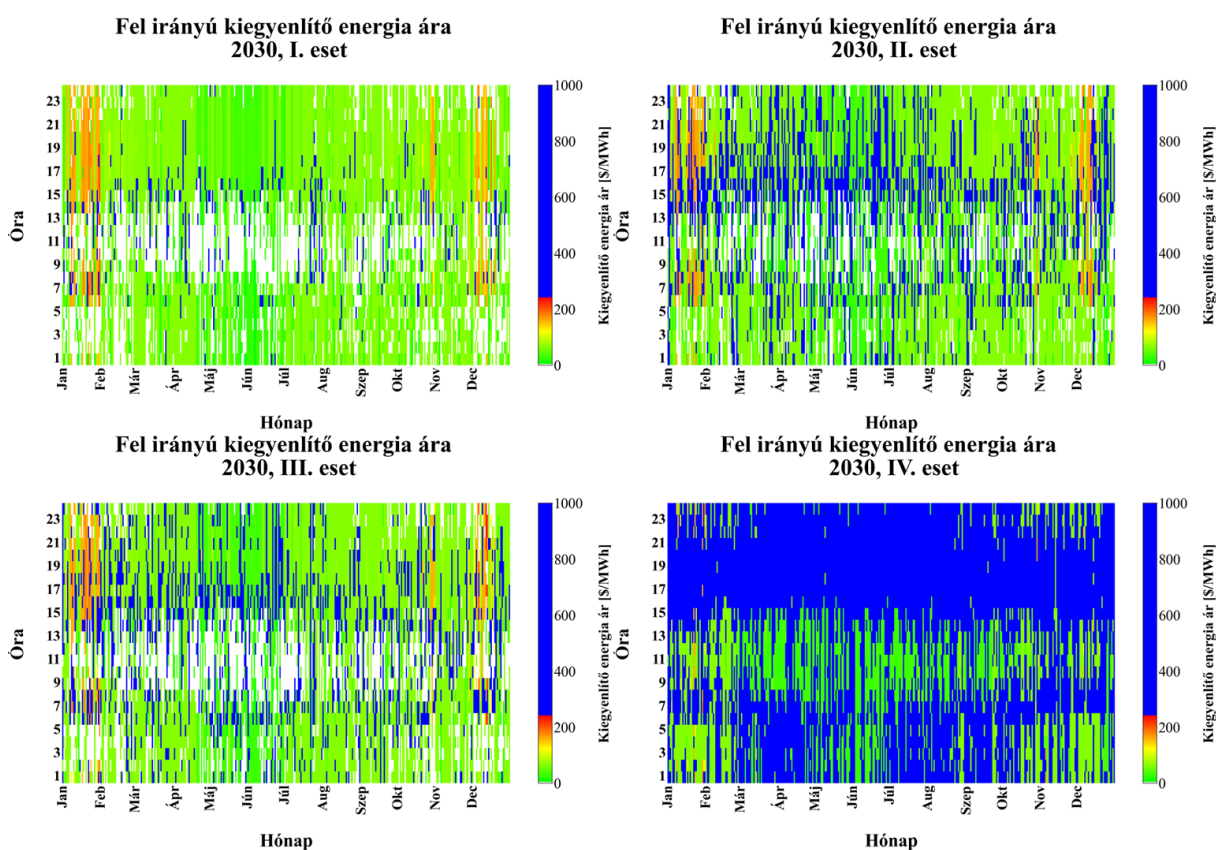
hónap első napját a hónap nevének rövidítésével), míg a függőlegesen a napon belüli órák láthatók (megjelenítve minden második órát), így mind a 8 760 óra bemutatásra kerülhet. Ebben az esetben kék színnel jelenítettem meg azokat az órákat, amikor az árak 240 \$/MWh fölé mennek. Ez csak akkor fordul elő, amikor marad kiszolgáltatlan kiegyenlítő energia igény a magyar rendszerben. A többi értéket zöldtől a sárgán át a pirosig jelenítettem meg, ahol a teljesen zöld szín 0 közeli értéket, a teljesen sárga szín 120 \$/MWh közeli értéket, míg a teljesen piros szín 240 \$/MWh-ás értéket jelent.

Megfigyelhető a 11. ábrán, hogy le irányban jellemzően egységesen alacsonyak a kiegyenlítő energia árak. Ez annak köszönhető, hogy az erőművek leterheléskor nem számítanak fel magas árakat a kiegyenlítő energia kiszolgáltatásáért. Az utolsó scenárióban azért jelenik meg majdnem nullaként a kiegyenlítő energia ára szinte egész évben, mivel ekkor szinte teljes évben Paks II szolgálja ki. Paks II-nek pedig olcsónak mondható körülbelül 30 \$/MWh-ás a felajánlott kiegyenlítő energia ára.



11. ábra: Le irányú kiegyenlítő energia ára a különböző scenáriók esetén

Hasonlóan a le irányú árakhoz, a fel irányúakat is megjelenítettem hőtérképek segítségével a 12. ábrán. Összehasonlítva a le irányú árakkal jól látszik, hogy ezek lényegesen magasabbak, valamint a kiszolgáltatlan órák száma is számottevően nagyobb az összes scenárióban. Mind a négy scenárió esetében megfigyelhető, hogy amikor a naperőművek üzemelnek, akkor egyrészt kevesebbszer fordul elő felszabályozási igény, vagy amikor előfordul akkor se okoz magas kiegyenlítő energia árakat a piacon. Szembetűnő a 4. scenárió esetében, hogy az órák nagy százalékában kiegyenlítetlen marad a szabályozási energia igény, innen is jól látszik, hogy energiatárolók nélkül ez a piac megoldatlan maradna.



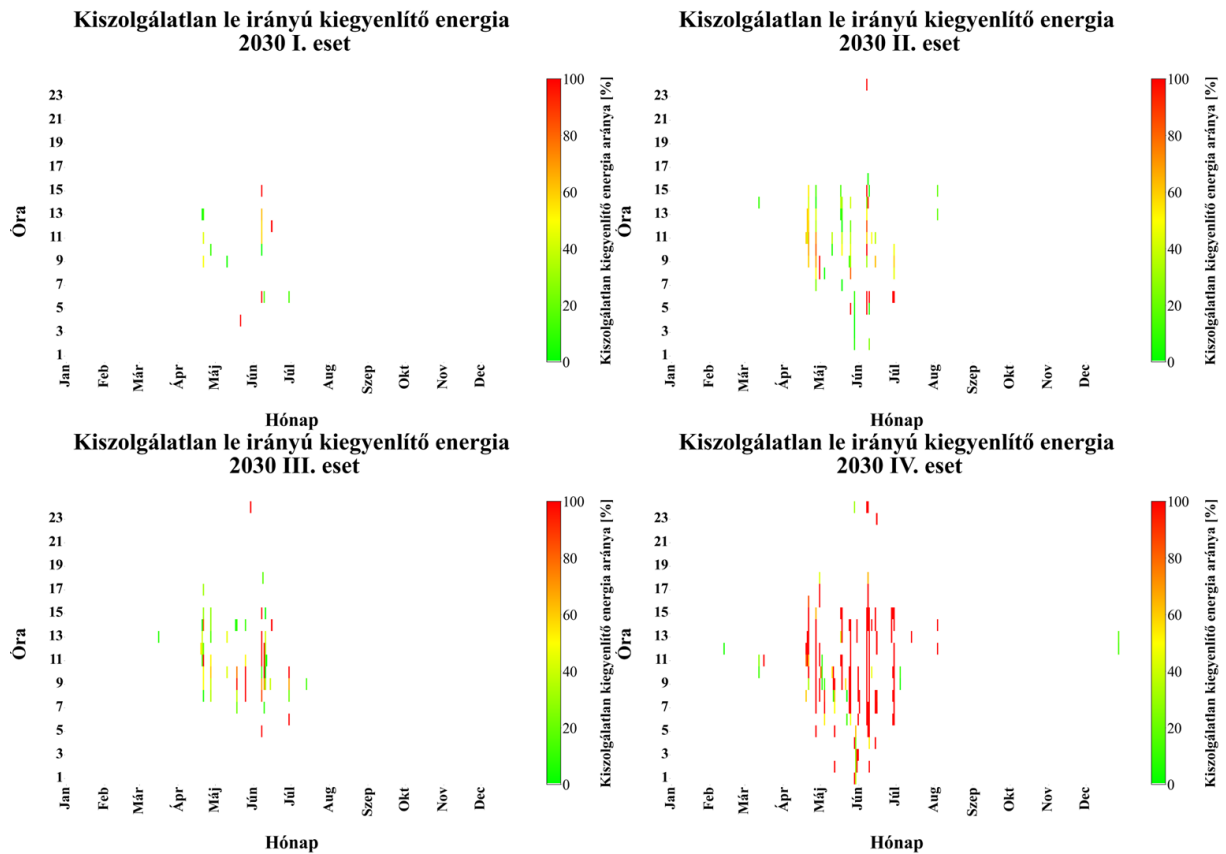
12. ábra: Fel irányú kiegyenlítő energia ára a különböző scenáriók esetén

Összességében elmondható az 11. és 12. ábra eredményeiről, hogy mindenképpen abban az esetben a legkedvezőbbek a piaci árak, amikor mindkettő típusú energiatároló jelen van a piacon, olyankor ugyanis nem jellemzőek a kiszolgáltatlan időszakok, valamint a magas árak sem. Ezen kívül fontos megjegyezni azt is, hogy mint az a korábbi ábrákból is kiderült a le irányú kiegyenlítő energia igény kiszolgálásával energiatárolók nélkül sincsen nagy probléma, fel irányú kiszolgálásával viszont már annál inkább.

4.3. Kiegyenlítő energia igények kielégítése Magyarországon 2030-ban

Ennek a résznek a célja bemutatni azt, hogy egyes scenáriók esetében mekkora mértékű kiegyenlítő energia marad kielégítetlenül mind fel, mind le irányban. Azért fontos vizsgálni ezt, mivel ez az a mennyiségű kiegyenlítő energia, amelyet külföldről kell beszereznie a magyar rendszerirányítónak és amelynek ára lényegesen nagyobb, mint ha hazai környezetben állították volna elő.

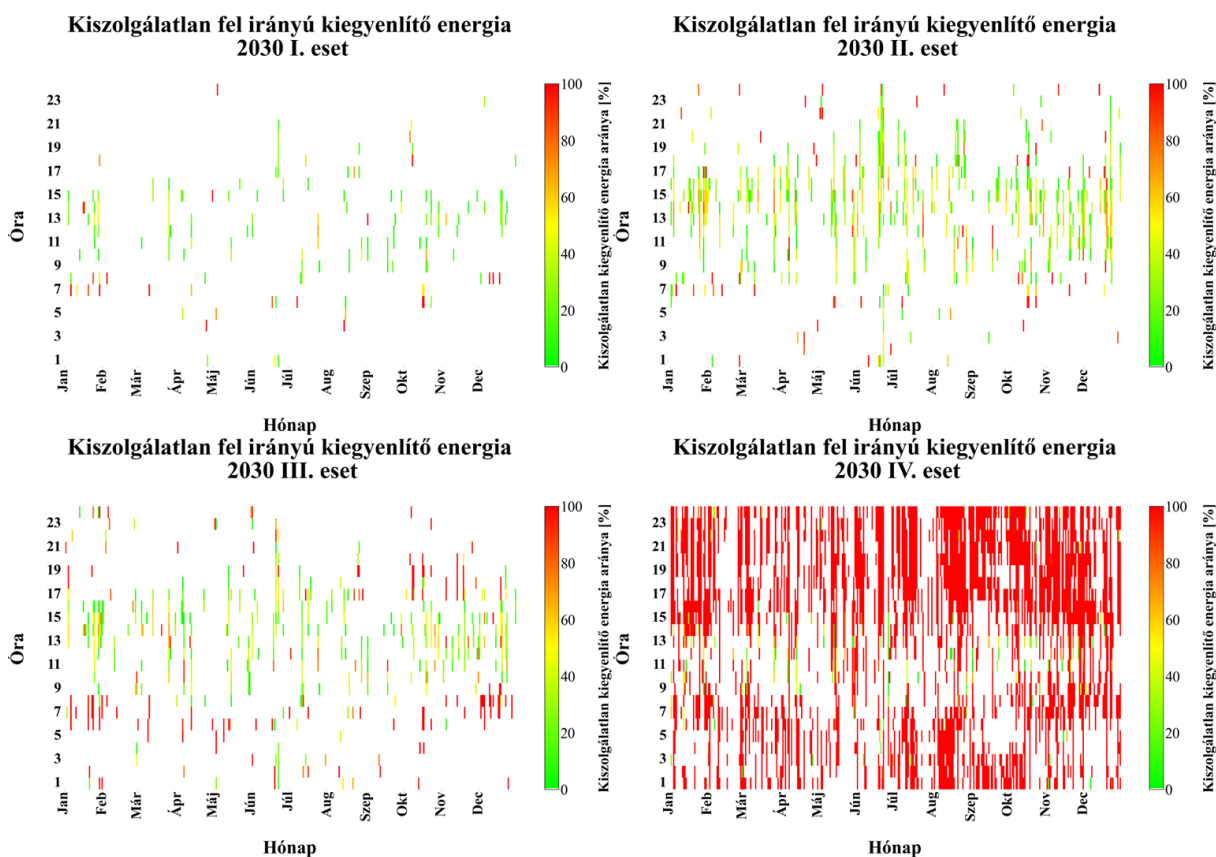
Hasonlóan az árakhoz ezúttal is hőtérképeket használtam ahhoz, hogy megjelenítsem a kiszolgáltatlan energia mennyiségeket. A kiszolgáltatlan le irányú kiegyenlítő energia mennyiségeket a 13. ábrán jelenítettem meg minden scenárióra. Ezeknél a hőtérképeknél zöldtől a pirosig jelenítettem meg az értékeket, ahol a teljesen zöld értékek jelentik azt, amikor a kiszolgáltatlan kiegyenlítő energia adott órában a teljes igényelt mennyiséghez képest minimális, míg a teljesen piros értékek pedig azt, amikor semennyi kiegyenlítő energiát nem tud kielégíteni a rendszer. A négy scenáriót összehasonlítva megfigyelhető, hogy hasonló órákban alakul ki kiegyenlítetlen kiegyenlítő energia, viszont azoknak mértéke különbözik. Ezekben az órákban a kiegyenlítő energia igény olyan nagy, hogy kiegyenlítése lehetetlen a hazai rendszer számára, viszont nem mindegy, hogy annak csak 10-20%-át kell külföldről fedezni, vagy adott esetben a teljes mennyiséget.



13. ábra: Le irányú kiszolgáltatatlan kiegyenlítő energia aránya a teljes kiegyenlítő energia igény arányában a különböző scenáriók esetén

Újra érdemes összevetni a le irányban kialakult eredményeket (13. ábra) a fel irány eredményeivel (14. ábra). Akárcsak az árak esetében most is megfigyelhető a 14. ábrán, hogy lényegesen több órában és lényegesen nagyobb mértékű a kiegyenlítetlen kiegyenlítő energia mennyisége. Azonban, ha jobban megfigyeljük az ábrát látható, hogy az első 3 scenárió esetében ugyan több olyan óra is van, amikor marad kiegyenlítetlen kiegyenlítő energia a rendszerben, viszont ezeknél a scenárióknál ez az adott órai igény jellemzően kis százalékát jelentik. Egyedül a 4. scenárió az, ahol sok is a kiegyenlítetlen óra, ráadásul általában a teljes mennyiség hiányzik a rendszerből. Látható még az ábrákon az is, hogy a naperőművi termelésnek a kiegyenlítetlen kiegyenlítő energia arányában is van jelentősége. Általában az első három scenárióban, amikor van energiatároló a rendszerben, akkor azokban az órákban van kiegyenlítetlen kiegyenlítő energia, amikor naperőművi termelés van, viszont akkor kisebb mértékben. Ezek jellemzően naperőmű menetrendezési hibák lehetnek. Teljes kiegyenlítetlenségek viszont azokban az órákban figyelhetők meg, amikor a fogyasztás csúcson van napon belül, azaz a

reggeli és esti órákban. A negyedik scenárió, amikor semmilyen energiatároló nincs a rendszerben teljesen fenntarthatatlan, az órák nagy részében a teljes kiegyenlítő energia igény kiélégítetlen.



14. ábra: Le irányú kiszolgáltatatlan kiegyenlítő energia aránya a teljes kiegyenlítő energia igény arányában a különböző scenáriók esetén

Összefoglalva a kiegyenlítő energia kiszolgáltatásának mértékéről készített elemzést elmondható, hogy jellemzően a fel irányú kiegyenlítő energia ellátása problémás és nehezen oldható meg energiatárolók nélkül. Viszont amennyiben csak szivattyús-tározós erőmű vagy akkumulátorok találhatók a rendszerben akkor sincs akkora probléma, mivel arányaiban az igény nagy része kiegyenlítésre kerül, de egyértelműen az a legkedvezőbb scenárió, ha mindkét energiatároló megtalálható a magyar rendszerben.

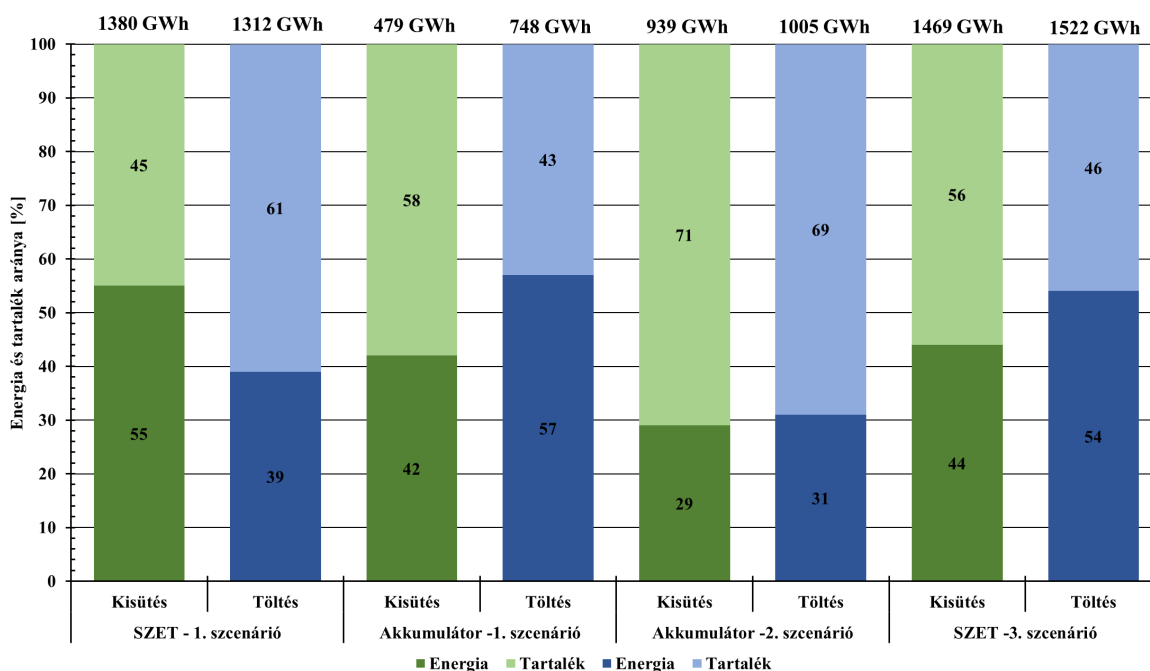
4.4. *Energiatárolók működése a villamosenergia- és a tartalék piacon*

Ebben a fejezetben bemutatom, hogy a szivattyús-tározós erőmű, illetve az akkumulátorok milyen gyakorisággal választják a kiegyenlítő energia piacot az energia piac helyett, illetve

foglalkozok azzal is, hogy hogyan növelhető meg az energiatárolók kihasználtsága azzal, ha különböző piacokon szerepelve több bevétel elérésére lesznek képesek.

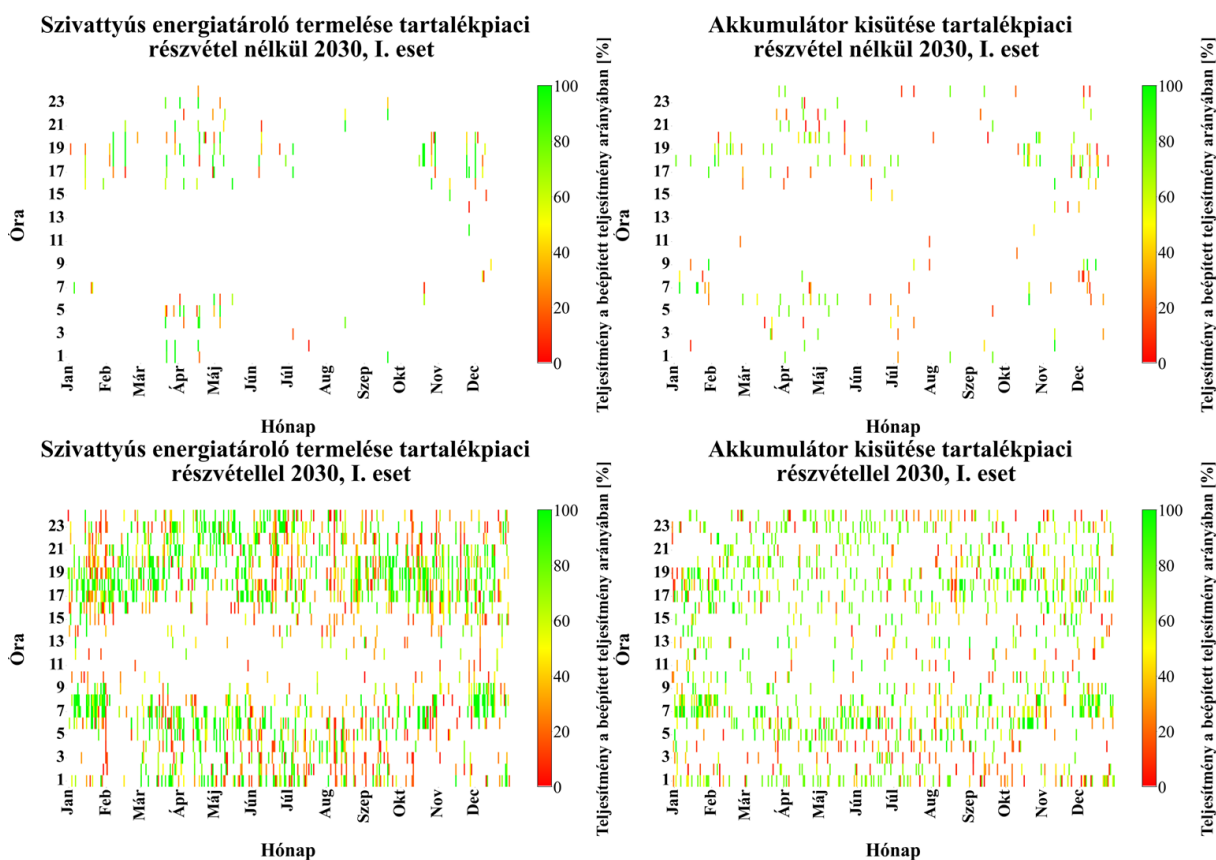
A 15. ábra bemutatja, hogy különböző scenáriók esetében az energiatárolók kisütésüknek, illetve töltésüknek mekkora részével vesznek részt az energia, illetve a tartalék piacokon. Az energiatárolók bevételi forrása a két piacot figyelembe véve jöhet egyrészt ár arbitrázs tevékenységből az energiapiacon, illetve fel és le irányú kiegyenlítő energia értékesítésből a tartalékpiacon. Ezeknek a bevételi forrásoknak a kiaknázása érdekében használják jobban egyik, illetve másik piacot, figyelve az ott kialakult ár környezetre. Az oszlop diagramok tetején megjelenik az, hogy különböző scenáriókban mennyi energiát töltött és sütött ki az adott energiatároló. Megfigyelhető a 15. ábrán, hogy mind az akkumulátor, mind a szivattyús-tározós erőmű többet van használatban akkor, amikor egyedül szerepel a villamosenergia-rendszerben, ahogy az várható volt. Ha az arányokat vizsgáljuk általánosságban elmondható, hogy nagyobb részben tartalékpiacon szerepelnek az energiatárolók, de energiapiaci részvételük sem elhanyagolható.

Energiatárolók töltésének és kisütésének megoszlása az energia és a tartalékpiac között Magyarország, 2030



15. ábra: Energiatárolók töltésének és kisütésének megoszlása az energia és a tartalék piac között Magyarországon 2030-ban

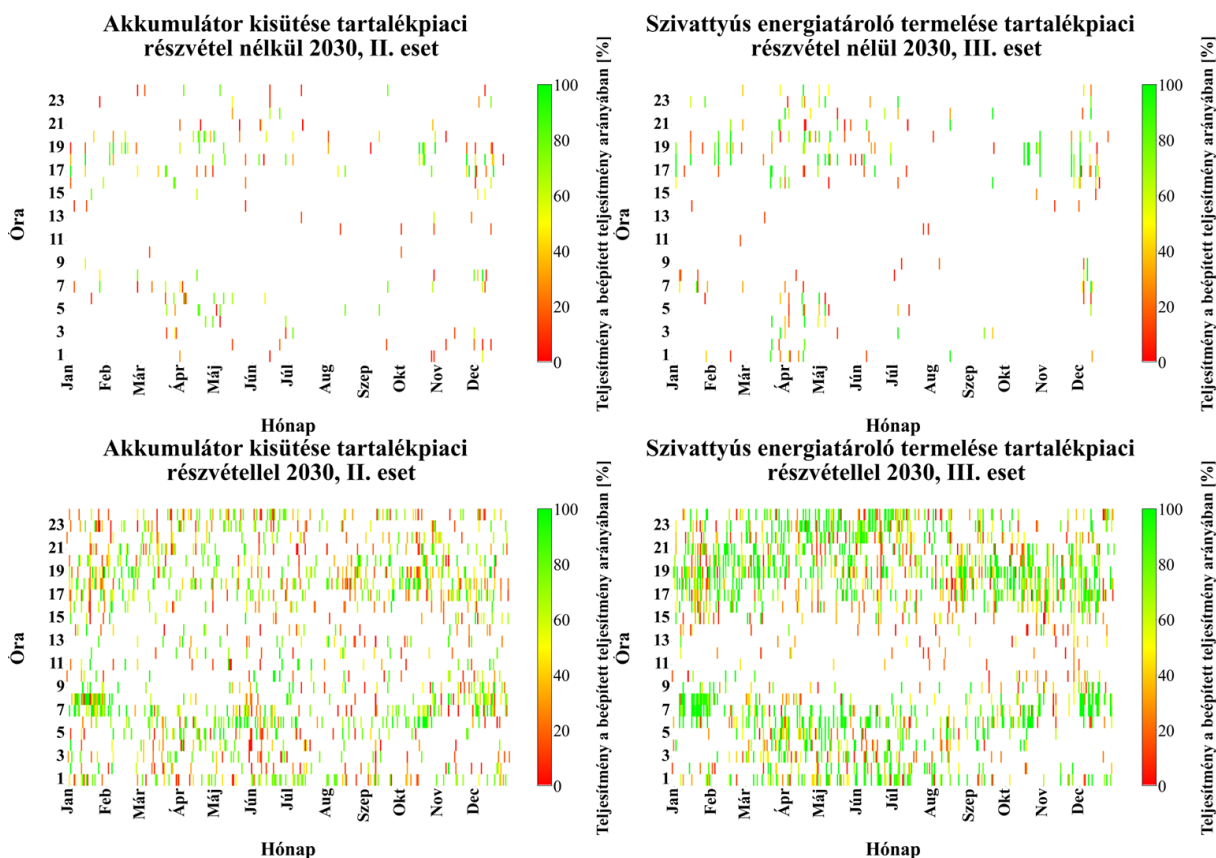
Azért, hogy összehasonlítható legyen az energiatárolók termelése abban az esetben, amikor szerepelnek kiegyenlítő energia piacon és amikor nem, készítettem hőterképeket az energiatárolók termeléséről különböző scenáriókban. Ezeket a hőterképeket a 16. és a 17. ábrán jelenítettem meg. A 16.-on az 1. scenárió esetén látható a szivattyús-tározós erőmű, illetve az akkumulátor termelése a maximális teljesítményük arányában. Fehérrel azok az órák, amikor a termelés nulla, pirossal azok az órák, amikor volt termelés. Pirossal azok az órák, amikor minimális volt a termelés, zölddel pedig azok, amikor maximális. A 17. ábrán ugyan így megfigyelhető a 2. és a 3. scenárió esetében az akkumulátor és a szivattyús-tározós erőmű termelése az év minden órájában a maximális teljesítmény arányában.



16. ábra: Energiatárolók kisütése tartalékpiacon részvétellel és anélkül az első scenárióban

Ha megfigyeljük az ábrákat látható, hogy jelentősen többet termel mindkettő típusú energiatároló akkor, amikor tartalékpiacon igényekkel is számol a modell. Ez az eredmény nem meglepő, hiszen a tartalékpiacon részvétel minden energiatároló számára jelentős bevételnövekedéssel járhat. Mind a szivattyús-tározós erőmű, mind pedig az akkumulátor hasonlóan üzemel abban a scenárióban, amikor együtt vannak piacon, valamint amikor külön. Látható továbbá, hogy a

naperőművek termelése jelentős szerepet játszik abban, hogy termelnek-e az energiatárolók, ugyanis azokban az órákban, amikor naperőművi termelés van a rendszerben egyrészt telítettség van, tehát termelt energiára nincs szükség, másrészt pedig, ha kiegyenlítésre van szükség akkor a villamosenergia-rendszerben olcsóbb olyan erőműveket felterhelni, amelyek már amúgy is le vannak terhelve a rendszer telítettsége miatt, jellemzően például Paks II-t a szimulációk során.



17. ábra: Energiatárolók kisütése tartalékpiacon részvétellel és anélkül a második és a harmadik szcenárióban

Összességében elmondható az 16. – 17. ábrák eredményeiről, hogy az energiatárolók kihasználtságának jól tesz a tartalékpiacon való részvétel. Ezen kívül a szimulációk eredménye alapján, ha lehetséges inkább a tartalékpiacon értékesítenek a tárolók, de az értékesített mennyiség eltérő lehet annak függvényében, hogy mennyire telített tárolóval az adott piac.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az utóbbi évtizedek kihívásai a globális felmelegedés, klímaváltozás komoly kihívás elé állítják az energiapiacot is. A karbonsemlegességet célzó intézkedések hatása érzékelteti magát egész Európában és Magyarországon is. A kitűzött célok eléréséhez elengedhetetlen a megújuló energiatermelők beépített kapacitásának növekedése, a menetrendezhetőség romlása és a villamosenergia-rendszer szabályozhatóságának előtérbe kerülése. Ezeknek megfelelően az energia és tartalék piac kapcsolata és az energiatárolók szerepe felértékelődik a jövőben.

Dolgozatomnak fő célja az volt, hogy összeállítsak egy olyan modellt korábbi munkámra építve, amely képes Magyarország és a környező országok villamosenergia- és tartalék piacát együttesen modellezni. A modell megépítése után 4 scenárió mentén vizsgáltam, hogy a magyarországi kiegyenlítő energia igények kielégítésében milyen lehetőségei vannak a piacnak és hogy az energiatárolóknak milyen szerep jut ezeken a piacokon.

A modellt sikeresen megépítettem és elláttam bemeneti adatokkal. Előállítottam Magyarország 2030-as órás bontású kiegyenlítő energia igényét felhasználva a különböző menetrendi hibákat. Előállítottam egy modellt, ami képes külön vizsgálni az energia piaci és a tartalékpiaci részvételt.

A szimulációk során arra az eredményre jutottam, hogy a tartalékpiaci igények kiszolgálásában elengedhetetlen szerep jut a jövőben az energiatárolóknak. Megmutattam, hogy a fel irányú kiegyenlítő energia igények kielégítése lehetetlen energiatároló kapacitások nélkül. Valamint összehasonlítva a különböző scenáriókat kiderült, hogy a kiegyenlítő árak alacsonyan tartásában nem csak az energiatárolóknak, de az atomerőműveknek is nagy szerep jut a jövőben.

További lehetőségeket látok a jövőben kutatásom folytatására, ezek közül a következők a legérdekesebbek:

- Tartalékpiaci vizsgálatok kiterjesztése a környező országok piacára is
- Érzékenységvizsgálatok elvégzése a teljes modellre (pl.: gáz árak, „Price Following”)
- Kiegyenlítő energia igény órás bontású adatsor pontosítása, validálása
- Villamosenergia-piac és tartalékpiac modell kiterjesztése Európára
- Energiatárolók bevételeinek, profitjának, megtérülésének összevetése az energia és a tartalék piacokon

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] "The European Green Deal." Accessed: Oct. 29, 2024. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [2] "REPowerEU." Accessed: Oct. 29, 2024. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en
- [3] "A magyar villamosenergia-rendszer 2022. évi adatai." Accessed: Oct. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.mekh.hu/a-magyar-villamosenergia-rendszer-2022-evi-adatai>
- [4] K. Gerse, *Energiatárolók*. Akadémiai Kiadó, 2020. doi: 10.1556/9789634544937.
- [5] 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
- [6] "Engedélyesek listája." Accessed: Oct. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.mekh.hu/engedelyesek-listaja>
- [7] "Borsodban is megkezdődnek a szivattyús energiatároló létesítésének lehetőségét vizsgáló kutatófúrások." Accessed: Oct. 23, 2024. [Online]. Available: <https://kormany.hu/hirek/borsodban-is-megkezdodnek-a-szivattyus-energia-tarozo-letesitesenek-lehetoseget-vizsgalo-kutatofurasok>
- [8] B. Johnston, D. Al Kez, and A. Foley, "Assessing the effects of increasing offshore wind generation on marginal cost in the Irish electricity market," *Appl Energy*, vol. 374, p. 123892, Nov. 2024, doi: 10.1016/J.APENERGY.2024.123892.
- [9] N. E. Koltsaklis and A. S. Dagoumas, "Incorporating unit commitment aspects to the European electricity markets algorithm: An optimization model for the joint clearing of energy and reserve markets," *Appl Energy*, vol. 231, pp. 235–258, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.09.098.
- [10] N. Naseri, Y. Ghiassi-Farrokhfal, W. Ketter, and J. Collins, "Understanding and managing the participation of batteries in reserve electricity markets," *Decis Support Syst*, vol. 165, p. 113895, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.DSS.2022.113895.
- [11] P. González, J. Villar, C. A. Díaz, and F. A. Campos, "Joint energy and reserve markets: Current implementations and modeling trends," *Electric Power Systems Research*, vol. 109, pp. 101–111, Apr. 2014, doi: 10.1016/J.EPSR.2013.12.013.
- [12] A. Mohamed, R. Rigo-Mariani, V. Debusschere, and L. Pin, "Stacked revenues for energy storage participating in energy and reserve markets with an optimal frequency regulation modeling," *Appl Energy*, vol. 350, p. 121721, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.APENERGY.2023.121721.

- [13] M. Khojasteh, P. Faria, and Z. Vale, "A robust model for aggregated bidding of energy storages and wind resources in the joint energy and reserve markets," *Energy*, vol. 238, p. 121735, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.121735.
- [14] 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.
- [15] Baross Bence, "Különböző energiatárolási technológiák vizsgálata nagy időfelbontású szimulációk segítségével," 2023.
- [16] Gerse Károly, *Villamosenergia-piacok*. BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, 2014.
- [17] "MAVIR - Az energia irányítója." Accessed: Oct. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.mavir.hu/web/mavir/home>
- [18] E. Andreae, A. G. Johnsen, R. Reinert, M. H. Mortensen, and T. Weckesser, "Cost minimization of a hybrid PV-to-methanol plant through participation in reserve markets: A Danish case study," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 68, pp. 190–201, May 2024, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2024.04.158.
- [19] "Dutch TTF Natural Gas Calendar (TTF=F)." Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Available: <https://finance.yahoo.com/quote/TTF%3DF/history/?filter=history&period1=1514764800&period2=1672444800&frequency=1mo>
- [20] B. Biró and A. Aszódi, "Investigating the role of nuclear power and battery storage in Hungary's energy transition using hourly resolution electricity market simulations," *Heliyon*, vol. 10, no. 9, p. e29841, May 2024, doi: 10.1016/J.HELIYON.2024.E29841.
- [21] N. E. Koltsaklis and J. Knápek, "Assessing flexibility options in electricity market clearing," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 173, p. 113084, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.RSER.2022.113084.
- [22] A. Prakash, R. Ashby, A. Bruce, and I. MacGill, "Quantifying reserve capabilities for designing flexible electricity markets: An Australian case study with increasing penetrations of renewables," *Energy Policy*, vol. 177, p. 113551, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.ENPOL.2023.113551.
- [23] A. H. A. El-Sayed, A. Khalil, and M. Yehia, "Energy storage systems impact on Egypt's future energy mix with high renewable energy penetration: A long-term analysis," *J Energy Storage*, vol. 95, p. 112583, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.EST.2024.112583.
- [24] "KÁT adatpublikáció." Accessed: Oct. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.mavir.hu/web/mavir/kat-adatpublikacio>
- [25] "Rendszerterhelés Terv és Tény adatok (Bruttó, Nettó)." Accessed: Oct. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.mavir.hu/web/mavir/rendszerterheles>