

Kácsor Enikő

A megújuló áramtermelés támogatására vonatkozó aukciók elemzése

Matematika Tanszék

Témavezető: Dr. Magyarkuti Gyula egyetemi docens

©Kácsor Enikő

Budapesti Corvinus Egyetem

Közgazdasági és Gazdaságinformatikai Doktori Iskola

A megújuló áramtermelés támogatására vonatkozó
aukciók elemzése
Ajánlatadási viselkedés modellezése a német naperőmű aukciókon

Doktori értekezés

Kácsor Enikő

2021. Budapest

Tartalomjegyzék

Ábrák jegyzéke	6
Táblázatok jegyzéke	9
1. Bevezetés	11
1.1. A dolgozat legfontosabb eredményei	11
2. Megújuló energia támogatása az Európai Unióban	17
2.1. Támogatási formák	18
2.2. Európai Unió megújuló politika	23
2.3. Támogatások a német árampiacon	27
2.4. Támogatások Magyarországon	33
3. LCOE számítás	41
3.1. Fajlagos áramtermelési költség (LCOE) számítás	41
3.2. Módosított LCOE számítás	47
3.3. A támogatási szint igény eloszlása	64
4. Az aukcióelméleti modell	67
4.1. Aukciók modellezése a szakirodalomban	70
4.2. Az elméleti modell felépítése	76
5. Az egyensúly megkeresése	85
5.1. Egyenáras aukció	85
5.2. Ajánlati áras aukció	86
6. Eredmények	97
6.1. Egyenáras aukció	97
6.2. Ajánlati áras aukció	99
7. Összefoglalás	103
Irodalomjegyzék	109
Függelékek	123

Az EEMM modell technikai specifikációja	125
Az iteráció egyes lépéseire tartozó ábrák és eloszlásfüggvények	127
A normális eloszlásból induló, 10 000 adatpontot tartalmazó eset	127
A normális eloszlásból induló, 1 000 adatpontot tartalmazó eset	132
Az egyenletes eloszlásból induló, 1 000 adatpontot tartalmazó eset	138
A normális eloszlásból induló, 1 000 adatpontot tartalmazó, döntetlent is figyelembe vevő eset	144
Rövidítések jegyzéke	147

Ábrák jegyzéke

2.1. Technológiai érettség fázisai, és a megfelelő támogatási forma, forrás: saját ábra Foxon et al., 2005 alapján	19
2.2. Megújuló energia felhasználási arány az áramszektorban az Európai Unió tagállamaiban, 2017 forrás: Eurostat, 2019	25
2.3. Német kapacitásmix 2009-ben és 2019-ben, forrás: Fraunhofer, 2019	29
2.4. Magyar kapacitásmix 2017-ben, forrás: Mezősi et al., 2019	34
3.1. Feltételezett termelési profilok az év különböző időszakában, forrás: EEMM adatok	46
3.2. Saját LCOE becslés a szakirodalom tükrében, forrás: Fraunhofer, 2018; Fraunhofer, 2015; Lazard, 2017; IEA, 2017; Irena, 2018; EEMM adatok	47
3.3. Az EEMM modell működési logikája	56
3.4. Beépített kapacitások alakulása Németországban, 2020, 2050, forrás: saját ábra	59
3.5. Német valós és modellezett tartamdiagram, 2014, forrás: ENTSO-E és EEMM	60
3.6. Német modellezett havi referenciaárak, 2020-2050, forrás: EEMM mo- dell eredményei	62
3.7. Beruházási költség szintek 0 támogatásigényhez különböző WACC és OPEX értékek esetén	64
3.8. LCOE' tapasztalati eloszlása, 10 000 generált beruházási költség érték alapján, forrás: saját ábra	65
5.1. Az ajánlati függvény alakja az F_1 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	89

5.2.	Az ajánlati függvény alakja az F_2 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	91
5.3.	Az ajánlati függvény alakja az F_3 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	92
5.4.	Az ajánlati függvény alakja az F_4 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	93
5.5.	Az ajánlati függvény alakja az F_5 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	94
1.	A nyerés valószínűsége különböző ajánlatok esetén, F_1 ajánlati eloszlást feltételezve, forrás: saját ábra	127
2.	Az illesztett F_2 ajánlati eloszlás, forrás: saját ábra	128
3.	A nyerés valószínűsége különböző ajánlatok esetén, F_2 ajánlati eloszlást feltételezve, forrás: saját ábra	128
4.	Az illesztett F_3 ajánlati eloszlás, forrás: saját ábra	129
5.	A nyerés valószínűsége különböző ajánlatok esetén, F_3 ajánlati eloszlást feltételezve, forrás: saját ábra	129
6.	Az illesztett F_4 ajánlati eloszlás, forrás: saját ábra	130
7.	A nyerés valószínűsége különböző ajánlatok esetén, F_4 ajánlati eloszlást feltételezve, forrás: saját ábra	130
8.	Az illesztett F_5 ajánlati eloszlás, forrás: saját ábra	131
9.	A nyerés valószínűsége különböző ajánlatok esetén, F_5 ajánlati eloszlást feltételezve, forrás: saját ábra	131
10.	Az ajánlati függvény alakja az F_1 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	132
11.	Az ajánlati függvény alakja az F_2 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	132
12.	Az ajánlati függvény alakja az F_3 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	133
13.	Az ajánlati függvény alakja az F_4 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	133
14.	Az ajánlati függvény alakja az F_5 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	134
15.	Az ajánlati függvény alakja az F_6 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	134
16.	Az ajánlati függvény alakja az F_7 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	135
17.	Az ajánlati függvény alakja az F_8 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	135
18.	Az ajánlati függvény alakja az F_9 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	136

19.	Az ajánlati függvény alakja az F_{10} ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	136
20.	Az ajánlati függvény alakja az F_{11} ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	137
21.	Az ajánlati függvény alakja az F_1 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	138
22.	Az ajánlati függvény alakja az F_2 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	138
23.	Az ajánlati függvény alakja az F_3 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	139
24.	Az ajánlati függvény alakja az F_4 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	139
25.	Az ajánlati függvény alakja az F_5 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	140
26.	Az ajánlati függvény alakja az F_6 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	140
27.	Az ajánlati függvény alakja az F_7 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	141
28.	Az ajánlati függvény alakja az F_8 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	141
29.	Az ajánlati függvény alakja az F_9 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	142
30.	Az ajánlati függvény alakja az F_{10} ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	142
31.	Az ajánlati függvény alakja az F_{11} ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	143
32.	Az ajánlati függvény alakja az F_1 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	144
33.	Az ajánlati függvény alakja az F_2 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	144
34.	Az ajánlati függvény alakja az F_3 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	145
35.	Az ajánlati függvény alakja az F_4 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra	145

36. Az ajánlati függvény alakja az F_5 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra 146

Táblázatok jegyzéke

- 3.1. LCOE számításhoz kapcsolódó inputok a szakirodalomban és a saját számítás esetén, zárójelben a becsült sáv minimum és maximum értékei, forrás: Fraunhofer, 2018; Fraunhofer, 2015; Lazard, 2017; IEA, 2017; Irena, 2018 45
- 4.1. A német naperőművi aukciókon eddig támogatott kapacitások mennyiségei MW-ban, 2017-2019, forrás: Bundesnetzagentur (2019) 80
- 4.2. A német naperőművi aukciókon részt vevő szereplők száma, 2017-2019, forrás: Bundesnetzagentur (2019) 81
- 4.3. A német naperőművi aukciókon beadott átlagos projektenkénti kapacitás MW-ban, 2017-2019, forrás: Bundesnetzagentur (2019) 81
- 6.1. A német naperőművi aukciók eredményei és a modellezett eredmények az ajánlati áras aukció esetén, 2017-2019, forrás: Bundesnetzagentur (2019) és saját számítás 101

1. fejezet

Bevezetés

DOLGOZATOMBAN A MEGÚJULÓ áramtermelés támogatásához kapcsolódó aukciókat vizsgálom. A megújuló energia támogatása világszerte fontos eszköze a klímaváltozás elleni küzdelemnek. Egyre több helyen ismerik fel, hogy a támogatások hatékony allokációját az aukciók biztosíthatják. Az Európai Unióban ezért már jogszabályi kötelezettség a támogatások ilyen módon történő kiosztása (Európai Bizottság, 2014), így az aukciók vizsgálat kétségtelenül aktualitás és releváns téma.

A disszertációban a következő főbb kutatási kérdésekre keresem a választ:

- Milyen eloszlás alapján alakulnak ki a szereplők költségei (értékelésük), ha a beruházási költségre teszünk eloszlás feltételezést, és figyelembe vesszük a jövőbeli áramárak alakulását is?
- Hogyan lehet meghatározni az aukción a Nash-egyensúlyi ajánlati függvényt, ha nem kizárólag szigorúan monoton növekvő függvényeket vizsgálunk?
- Mennyiben különböznek ezek az ajánlatiárak (pay-as-bid) és az egyenáras (uniform price) esetben, és ebből milyen szakpolitikai következtetéseket vonhatunk le?

1.1. A dolgozat legfontosabb eredményei

Disszertációmban a német naperőművekre vonatkozó prémium típusú támogatások aukción történő kiosztását modellezem. Az aukciók elemzéséhez a sztenderd aukcióelméleti keretrendszert használom. Ennek segítségével modellezem a résztvevők ajánlatadási viselkedését.

Az aukcióelméletben szokásos licitálás ebben az esetben fordított módon történik, hiszen a résztvevők nem vásárolni, hanem eladni szeretnének. Így a költségeiknek megfelelően arra tesznek ajánlatot, hogy mi az a minimális energiaegységenkénti támogatási szint, ami mellett megvalósítanák a projektjüket. A nyertesek tehát a legalacsonyabb licitet benyújtó szereplők lesznek.

Az ajánlatadás modellezésének első lépéseként a szereplők valós költségeit határozom meg. A dolgozat fontos hozzáadott értéke, hogy a szakirodalomban széleskörben alkalmazott LCOE (levelised cost of electricity) módszertant bővítem, továbbfejleszttem (lásd részletesen a 63. oldaltól).

A szokásos modellekhez képest még figyelembe veszem a támogatási időszak után várható bevételeket is. Ehhez egy külön modellel elvégzem a német nagykereskedelmi áramárak előrejelzését is a következő 30 évre vonatkozóan (részletek a 62. oldalon).

A beruházási költségek esetén pedig egy-egy eloszlásból indulok ki fix értékek helyett. Így az aukcióelméleti keretrendszerbe is illeszkedő módon erre a módosított LCOE értékre vonatkozóan is generálni tudok egy tapasztalati eloszlást, egy adott eloszlás feltételezés mellett szimulált beruházási költségekből számolva a támogatási igényt (a kapott eloszlást lásd a 3.8. ábrán). Ez a dolgozat második fontos eredménye.

A modellezés során az aukciók technológia-specifikus jellegéből fakadóan szimmetrikus aukciókat feltételezek. Ezen belül két különböző szabályrendszert vizsgállok. Az egyenáros (uniform price) aukciók esetén a szereplők a valós költségeikkel éppen megegyező támogatási szintre tesznek ajánlatot (ennek részletes meggondolását lásd 85. oldalon, illetve a korábbi aukcióelméleti irodalomból is következik, (Krishna, 2010)), míg az ajánlatiáras (pay-as-bid) esetben már tere van a stratégiai viselkedésnek az ajánlatadáskor. Ezutóbbi esetén tehát jóval bonyolultabb az ajánlatok modellezése.

A szakirodalomban ezért szokás egyszerűsített megközelítést alkalmazni (pl. Anatolitis & Welisch (2017) és Anatolitis (2016)), ekkor a szereplők a többi szereplő ajánlatadására vonatkozóan egy adott eloszlást feltételeznek, függetlenül attól, hogy ez az eloszlás optimális viselkedés eredményeként áll-e elő vagy sem.¹ A másik tipikus megközelítés a Nash-egyensúlyi ajánlati függvények megkeresése.

Ezen két lehetőség adta az ötletet az iteratív egyensúlykereséshez. Első lépésként tesztelem, hogy az egyszerűsített megközelítés Nash-egyensúlyhoz vezet-e: vagyis szimmetrikus esetben a többi szereplőre feltételezett eloszláshoz kapcsolódó optimális ajánlatadás a feltételezett eloszlási mintázatot adja-e vissza. Ha a feltételezésrendszer nem konzisztens, akkor iteráció segítségével megpróbálom meghatározni azt a többi szereplőre vonatkozó eloszlás feltételezést, amely esetén az optimális viselkedésből kirajzolódó ajánlati eloszlás ezzel megegyezik. Így megkapható a Nash-egyensúlyi ajánlatadási mintázat, hiszen ekkor ez minden szereplő legjobb válasza is lesz egyben. Ehhez hasonló iterációs megközelítést alkalmazott például Novshek & Sonnenschein (1982), valamint Osepayshvili et al. (2005).

Az alkalmazott iterációs algoritmus használatának másik oka, hogy az analitikus felírással szemben itt monoton, de nem szigorúan monoton növvő ajánlati függ-

¹ A szerzők modelljében találkozunk tanulással, ez azonban csak az eloszlás egyetlen paraméterére, a várható értékre korlátozódik.

vények is lehetségesek. Ezen kívül az iteráció alkalmazásával az is kezelhető, hogy a folytonos értékelés eloszlásokkal szemben előfordulhat (ahogy látni fogjuk elő is fordul) olyan értékeléseloszlás, amely egy-egy pont előfordulásához pozitív valószínűséget rendel.

Az elemzés során arra jutok, hogy az általam vizsgált konkrét esetben az egyszerűsített megközelítés nem vezet Nash-egyensúlyra, a feltételezett és kapott ajánlati eloszlás jelentősen eltér. Az iterációval azonban eljuthatunk olyan kimenetekhez, ahol a kapott és feltételezett ajánlati eloszlás már nagyon hasonló.

Az egyensúly-keresés a következőképpen történik:

- Első lépésként a többi szereplő ajánlataira vonatkozóan élek egy feltételezéssel, e mellett vizsgálom egy kiválasztott szereplő optimális ajánlatadási viselkedését.
- Következő lépésként ellenőrzöm, hogy az így adódó ajánlati eloszlás megegyezik-e a többi szereplőre feltételezett ajánlati eloszlással. Ha igen, akkor Nash-egyensúlyban vagyunk. Ha nem, akkor az így kapott új ajánlati eloszlást feltételezem a következő lépésben a többi szereplőről.
- Ismét meghatározom az új feltételezések mellett a kiválasztott szereplő optimális ajánlat adási stratégiáját. Majd ellenőrzöm, hogy Nash-egyensúlyban vagyok-e.
- Az iteráció kétféleképpen érhet véget. Ha az optimális viselkedés megegyezik a többiekéről feltételezettel, akkor (a szimmetriából fakadóan) minden szereplő a legjobb választ adja a többiek ajánlatára, vagyis Nash-egyensúlyban vagyunk. A másik megállási kritérium akkor lép életbe, ha a feltételezett és kapott ajánlati eloszlások közötti távolság csökkenés után növekedésbe vált, ekkor ugyanis feltételezhető, hogy „eltávolodunk” a Nash-egyensúlytól, így az utolsó még csökkenést eredményező lépésnél az iteráció megáll.

Amennyiben az iteráció a második megállási kritérium mentén ér véget, egy úgynevezett „pszeudo-Nash-egyensúly”-t kapunk. Ekkor ugyanis nem mondható el, hogy a feltételezett és kapott ajánlatadási stratégia pontosan megegyezne, a szereplők azonban ezt a stratégiát fogják választani, mint „legjobb becslés”. Ahogy az eredményekből is látható, az ilyen pszeudo-Nash-egyensúly esetén előfordulhatnak a szokásostól eltérő ajánlatadási stratégiák is, amik mellett már nem feltétlenül teljesül a bevételi ekvivalencia tétel sem.

Az egyensúly keresés logikája bármilyen aukció esetén alkalmazható, bár az közel sem egyértelmű, hogy kis lépésszámon belül minden esetben megtalálható a megoldás. Az iterációt a normális ajánlati eloszlás feltételezése mellett egyenletes eloszlást feltételezve is elvégeztem. Megvizsgáltam továbbá, hogy mennyiben különböznek az eredményeket, ha a szereplők számolnak vagy ha nem számolnak a

döntetlen lehetőségével. Az általam felvázolt rendszerben a módszer minden vizsgált esetben kevés lépésszámon belül megoldást adott, és a fenti változtatások az eredményeket nem befolyásolták érdemben.

Az egyensúly megtalálása után, és azt felhasználva szimuláció segítségével az aukciókat le is játszom, és az eredményeket összevetem a különböző szabályrendszerek esetén (lásd a 97. oldaltól). A rendelkezésre álló adatok alapján a valós aukciós eredményekkel is összehasonlítom a kapott adatokat. Így a fenti elméleti megoldásokon túl a dolgozat fontos gyakorlati eredményekkel is szolgál.

A számszerű eredmények a vizsgált keretrendszerben a következők. A német naperőművi aukciókat a korábbi részvételi adatok alapján 100 szereplő elindulását feltételezve modellezem, minden szereplő esetén 5 MW -os projektméretet teszek fel, a támogatható mennyiség pedig 200 MW, vagyis 40 nyertes lesz.

Az általam vizsgált modellben a szereplők jelentős része, nagyjából 7-8%-a számára támogatás nélkül is megérné megvalósítani a beruházást, de a várható többletprofit reményében ezek a szereplők is elindulnak az aukción. Az elmúlt néhány év nemzetközi aukciói megmutatták, hogy ezen szereplők részvétele reális feltevés, ugyanis több esetben is a jövőbeli áramár várakozásoknál jóval alacsonyabb támogatási szint alakult ki az aukciókon (jó példák erre a legutóbbi spanyol naperőművi és szélerőművi aukciók, melyek eredményeit 2021 elején publikálták: a támogatási szintek 15 és 30 €/MWh között alakultak, miközben a spanyol nagykereskedelmi áramárak február elején 50 €/MWh környékén mozogtak). Ez pedig azt jelenti, hogy a szereplőknek nincs szüksége a piaci árakon felüli többletre ahhoz, hogy megépítsék a projektjüket, csupán annak biztonságára, hogy egy adott (várhatóan a jövőbeli áramáraknál jóval alacsonyabb) összeget biztosan megkapjanak az általuk termelt áramért a támogatási időszak alatt.

Az egyenáras aukció esetén a szakirodalom korábbi eredményei alapján az én modellemben is minden szereplő a valós értékelésének megfelelő ajánlatot ad be. 1000 db lejátszásból számolva a kialakuló támogatási szintek 64,8 és 71,6 €/MWh között mozognak, az átlagos támogatás szint 68,4 €/MWh, az átlagos összköltség nettó jelenértéke pedig (a teljes támogatási időszakra számítva, 2019-es €-ban) körülbelül 5,95 millió euro.

Az ajánlati áras szabályrendszer esetén az iterációval nem találom valódi Nash-egyensúlyt, csak pszeudo-Nash-egyensúlyt. A kapott eredmények nagyon hasonlóak akár normális, akár egyenletes eloszlás feltételezéssel élek az iteráció kezdő lépéseként. Érdekes eredmény, hogy ha az első alkalommal, amikor a feltételezett és kapott ajánlatok közötti különbség megnő kilépünk az iterációból (a szereplők ekkor F_4 ajánlati eloszlást feltételeznek), akkor a várható összköltség elég közel van az egyenáras esetben kapotthoz (6,07 millió euró). Ha azonban továbblépünk, akkor a későbbi iterációs lépések során további pszeudo-Nash-egyensúly(ok)ra akadhatunk, melyek esetén már jelentősen eltér a várható összköltség és a nyertes ajánlatok eloszlása. Ezekben az esetekben várhatóan jóval magasabb lesz a teljes kifizetendő

támogatás: 7,00-7,09 millió euró körül alakul, ami több mint 17%-kal magasabb az egyenáras esetről. Ezen egyensúlyi helyzetek esetén a feltételezett és kapott ajánlatok már közelebb vannak egymáshoz, mint az első kilépés esetén. Abban az esetben tehát, ha a szereplők az első megállási kritérium után még tovább vizsgálódnak, szignifikánsan eltérő egyensúlyi ajánlati függvényeket is kaphatunk.

A két szabályrendszer eredményei kapcsán további különbség, hogy az egyenáras aukciók esetén az 1000 lejátszott esetből a legnagyobb és legkisebb kialakuló összköltség meglehetősen távol esik egymástól: a két érték 4,32 és 7,53 millió eurónak adódik, vagyis az átlaghoz képest az eredmények egy $\pm 27\%$ -os sávban szóródnak.

Ezzel szemben az ajánlati áras esetben a különböző egyensúlyi kimenetekre vonatkozó eredmények jóval kisebb szórást mutatnak: 6,07-os átlag esetén $-1,5\% + 5,1\%$ -os sávon belül marad az összköltség mind az 1000 lejátszott aukció esetén. A 7 milliós átlaggal rendelkező esetekben pedig még kisebb ez az érték: $\pm 1,3\%$ -on belül marad az összköltség az átlaghoz képest, és az aukciók több mint 96%-a esetén gyakorlatilag megegyezik az átlaggal.

A döntéshozók szempontjából tehát, amennyiben a szabályok meghatározásakor elsődleges szempont az összköltség minél alacsonyabb szinten tartása, ugyanakkor a költségek alakulásának kiszámíthatósága is fontos, a következő tanulságok vonhatóak le.

Az egyenáras esetben a költségkockázat elsősorban abból fakad, hogy az adott aukción résztvevők esetén mik (az ismert támogatásigény eloszlásból adódó) konkrét realizációk, vagyis, hogy mik a résztvevők tényleges támogatásigényei - ettől függően a várható összköltségnél 27%-kal magasabb, de akár ennyivel alacsonyabb érték is elképzelhető. Ezzel szemben az ajánlati áras esetben a kockázatot az jelenti, hogy melyik ajánlatadási stratégia valósul meg. Az adott stratégia mellett már elhanyagolható annak hatása, hogy az adott aukción résztvevők esetén (az ismert támogatásigény eloszlásból) éppen milyen realizációk adódtak. Attól függően azonban, hogy melyik stratégia kerül kiválasztásra a várható összköltség az egyenáras aukción várhatóhoz képest 2-18%-kal magasabb lehet.

Bár a vizsgált aukció a német rendszer (ésszerűen egyszerűsített) modellje, technológiaspecifikus (tehát alapvetően szimmetrikusnak tekinthető), pay-as-bid aukciókat kapacitás korláttal több országban is rendeznek (például Görögország, Spanyolország, Portugália). Ezért a kapott eredmények – akár az aukció kimenetére, akár a licitfüggvény alakjára, akár az iteráció gyorsaságára vonatkozóan – irányadóak lehetnek sok más ország aukciói esetén is. Különösen akkor, ha a várható jövőbeli áramárok mellett sok résztvevő projektje támogatás nélkül is megtérülő lenne.

A munka a következő felépítést követi: a konkrét kutatási kérdéseknek és a kutatásom céljának rövid bemutatását követően áttekintem az Európai Unió megújuló politika összefoglalására. Bemutatom miért fontos ez a terület, és hogy milyen fej-

leményeket láthattunk az elmúlt évek során, illetve mi várható a közeljövőben. Ezután bemutatom a német árampiacot és támogatási rendszert. Ezt követően röviden kitérek a magyar piacra is. Ismertetem a legújabb fejleményeket, és röviden megindoklom, hogy miért nem a hazai aukciókat modellezem.

A harmadik fejezet a megújuló technológiák költségeinek becsléséről szól. Először ismertetem a szakirodalomban használatos LCOE (levelised cost of energy) számítási keretrendszert, majd a német árampiacra vonatkozóan a napenergia esetén saját becslést készítek. A dolgozat fontos hozzáadott értéke, hogy a szokásos LCOE számításon túlhaladok, az eredeti módszertant továbbfejleszttem, és ezt a módosított LCOE számítást használom fel az aukcióelméleti modellemhez. Ehhez egy külön modellel elvégzem az áramárak előrejelzését is a következő 30 évre vonatkozóan.

A negyedik fejezetben ismertetem az aukcióelméleti modelletem. A modellezési keretrendszer és a feltételezések részletes ismertetése után rátérek a szereplők optimalizációjára, és az egyensúlyi licitfüggvények megkeresésére. Az ajánlati áras esetben két megközelítés mellett is megkeresem az egyensúlyt: az iterációt normális és egyenletes eloszlás feltételezéssel is elindítom. Majd az aukció lejátszását is elvégzem szimuláció segítségével. A modellt két különböző szabályrendszer esetén (ajánlati áras és egyenáras) építem fel, és mindkét esetben le is játszom az aukciót.

A kapott eredményeket összevetem egymással, illetve más szerzők eredményeivel is. A megszokottól némileg eltérően a fontosabb munkák ismertetése mindenhol az adott fejezet elején, szorosan ahhoz kapcsolódóan kerül bemutatásra. Ezekben az összefoglalókban minden terület esetén összegyűjtöm az eddig felhalmozott fontosabb kutatási eredményeket, kiemelem, hogy ezek tükrében a kutatásom miért tekinthető relevánsnak, és hogy mit tesz hozzá az eddigi irodalomhoz.

Végül az utolsó fejezetben összefoglalom a legfontosabb eredményeket, felvázolom a további lehetséges kutatási irányokat, és kísérletet teszek rá, hogy bemutassam az eredmények gyakorlati alkalmazásának lehetőségeit.

2. fejezet

Megújuló energia támogatása az Európai Unióban

A TÉMA RELEVÁNCIÁJÁT az elmúlt években elfogadott Európai Uniói jogszabályokban foglalt követelmények adják, melyek hatására Európa-szerte egyre több országban tartanak a megújuló áramtermelés támogatásának kiosztására aukciókat (pl.: Dánia, Franciaország, Németország, Hollandia, Olaszország, Írország, az Egyesült Királyság és Portugália, (Wigand et al., 2016)), de számos afrikai és dél-amerikai ország is ebbe az irányba indult el (pl. Zambia (del Río, 2017a), Peru (del Río, 2017b), Brazília vagy Dél-Afrika, (Wigand et al., 2016)).

A következő fejezetben röviden bemutatom a különböző támogatási formákat, kitérve arra, hogy a technológia fejlettségének egyes stádiumaiban milyen támogatást érdemes alkalmazni. Néhány példán keresztül bemutatom azt is, hogy milyen piaci/szabályozói kudarcok vezettek az aukciók bevezetéséhez. Ezek az információk azért is fontosak, hogy az olvasó kontextusba helyezhesse az aukciókat, megértse azok bevezetésének és alkalmazásának jelentőségét nemcsak a jelenben, de a jövőre vonatkozóan is.

Ezt követően egy rövid áttekintést nyújtok az Európai Unió megújuló politikájának alakulásáról az elmúlt tíz év során, kitérek a különböző célok kitűzésére, azok meghatározásának módjára, és arra, hogy pontosan mire vonatkoznak, és ez milyen hatással van az áramszektorra. Ez a rész hivatott bemutatni, hogy miért releváns a megújuló energia támogatásának kiosztását vizsgálni, és szintén láthatóvá válik, hogy a téma a jövőben is aktuális marad.

Ezután rátérek a német árampiac bemutatására, és az elmúlt évek megújuló politikájának (mely „Energiewende”, vagyis „Energiafordulat” néven vált híressé) ismertetésére. A német piac tekinthető talán Európa leginkább előrehaladott piacának a megújuló energia támogatásának terén, az aukciók esetén pedig ez az ország rendelkezik a legnagyobb tapasztalattal, így a rendszer is a legkiforrottabbak közé tartozik. Ez megfelelő kereteket biztosít az itt működő aukciók elemzésére.

Végül a magyar árampiac és támogatási rendszer rövid bemutatásával zárom ezt

a bevezető fejezetet. A támogatási rendszer történeti áttekintésén túl kitérek arra, hogy miért vettem el a magyar aukciós rendszer modellezését, illetve bemutatom a legfrissebb fejleményeket, melyek különösen aktuálisak: az első aukciót ugyanis 2019 szeptemberében írták ki, az ajánlatok az év végéig várták. 2020-ban pedig a második aukció is kiírásra került, ennek eredményhirdetése 2020 februárjában várható. Az első aukció előzetes eredményeit a fejezet megírását követően tették közzé, ezért azok elemzése nem képezi jelen munka részét.

2.1. Támogatási formák

A megújulóenergia-termelés még napjainkban sem számít teljesen érett technológiának. Ez azt jelenti, hogy támogatás nélkül, piaci körülmények között a legtöbb befektető még nem valósítaná meg a projekteket, szükség van valamiféle anyagi, vagy akár szabályozási támogatásra ahhoz, hogy a beruházások megtörténjenek.

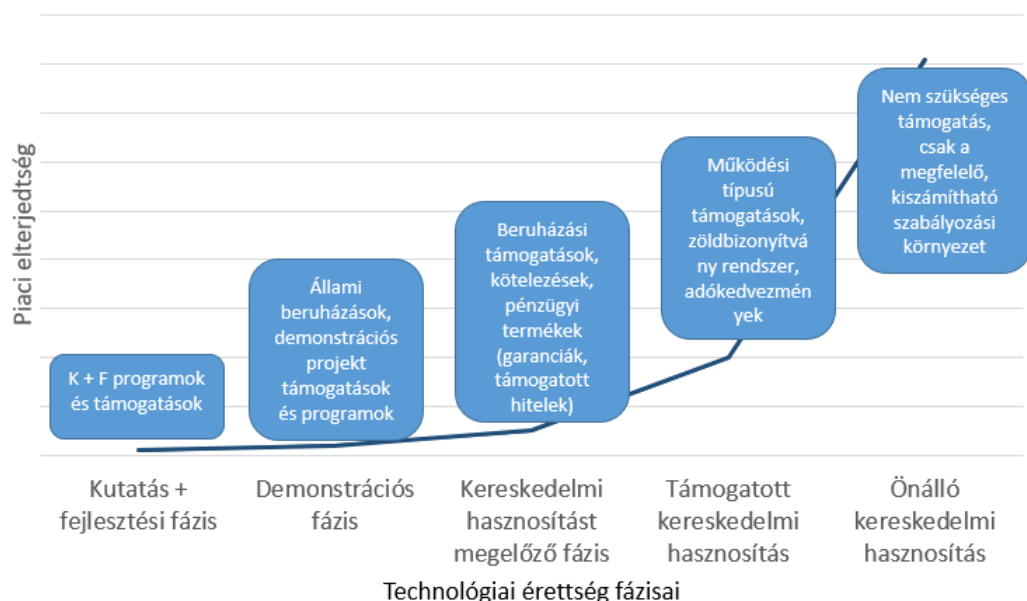
A technológiákat az életszakaszuktól függően különböző módon érdemes támogatni. Az ezzel foglalkozó irodalom jellemzően érettségi szakaszokat különböztet meg, és minden ilyen szakasz esetén meghatározza azt a támogatási formát, ami a legjobban ösztönzi az innovációt, a technológia további fejlődését.

A megfelelő támogatás eléri, hogy kellő tőke áramoljon az adott technológia fejlesztésébe, megvalósuljon a kutatás, később egy-egy demonstrációs projekt, majd egyre több – még ha csak támogatással is, de – megtérülő, gazdaságosan üzemelő beruházás.

A különböző támogatástípusok azért fontosak, hogy az adott technológia az érettségének megfelelő segítséget kapjon: se többet, se kevesebbet; vagyis a támogatás elegendő legyen az adott projekt megvalósításához, a technológia további fejlődéséhez, de ne kerüljön sor túltámogatásra. A 2.1. ábra ezt a szakirodalomban szokásos csoportosítást, és a különböző érettségi szintek esetén alkalmazandó támogatástípusokat foglalja össze.

Ahogy az ábrán is látható, a még kevésbé érett technológiák esetén (ilyen jelenleg például a széndioxid-megkötés és -tárolás, angolul carbon capture and storage, vagyis CCS technológia, vagy az ár-áply erőművek, angolul tide and wave) komolyabb beavatkozás szükséges: konkrét demonstrációs alapok üzemeltetése, vagy egy-egy projekt állami tőkéből történő megvalósítása. Kiváló példa erre a 2021 februárjában bejelentett innovációs verseny is, ahol Elon Musk 100 millió dollár nagyságrendű nyereményt ajánlott fel új CCS technológiák kifejlesztésére.

Ilyen projektekre azért van szükség, hogy az elméletből a gyakorlatba való átültetés során fellépő esetleges problémákat valós környezetben lehessen tesztelni, egy-egy prototípus segítségével. Az érettebb technológiák esetén szokásos a beruházási támogatások nyújtása (sok országban jellemző támogatási forma ez a megújuló hőtermelő beruházások ösztönzésére), illetve a különböző pénzügyi eszközök (pl. állami garancia), nyújtása, vagy kockázatközösségek szervezése (utóbbi kettő



2.1. ábra. Technológiai érettség fázisai, és a megfelelő támogatási forma, forrás: saját ábra Foxon et al., 2005 alapján

jellemző például a nagy kezdeti kockázatokkal járó geotermikus beruházások esetén).

A megújuló energia támogatásának lehetséges módjaival, az egyes országokban alkalmazott különböző formáival a korábbi években szerzőtársaimmal közösen több kutatásban is foglalkoztam. Elsősorban a megújuló alapú távhőtermelés támogatását, ösztönzési lehetőségeit vizsgáljuk néhány évvel ezelőtti cikkeinkben (Mezősi et al., 2016 és Mezősi et al., 2017b), ahol modellezés segítségével elemezzük a magyar távhőpiac lehetőségeit.

A legtöbb megújulóáram-termelő technológia már túl van a kezdeti fázisokon, és a „támogatott kereskedelmi működés” szakaszában tart. Manapság már nem csak a szárazföldi, de úgy tűnik lassanként az „offshore” (vagyis tengeri) szélenergia is ide tartoznak, a naperenergia és a biomassza-, biogázenergia mellett.

Ezeknek a technológiáknak ugyan még szüksége van a támogatására, de már elegendő a működési támogatások nyújtása, ami az előzőekhez képest kevésbé nyújt pénzügyi biztonságot a befektetőnek, hiszen csak a projekt élettartamának legvégére történik meg a teljes megtérülés, és a teljes kezdeti tőkebefektetést a beruházónak kell eszközölni. A legtöbb megújuló projekt esetén a költségek legnagyobb része a beruházáskor merül fel, az üzemeltetés ugyanis nagyon olcsó, szemben például egy fosszilis erőművel, hiszen az üzemanyag költség nulla (ez alól kivételt jelentenek a biomassza és biogáz erőművek).

Tehát, ahogy láthattuk a legtöbb esetben a megújuló erőművek jövedelmezőségét manapság már működési támogatás formájában érdemes elősegíteni. Ez valóban Európa legtöbb országában ennek megfelelően működik.

A működési támogatásnak is számtalan formája van azonban, melyek némelyike jobban, mások kevésbé nyújtanak biztonságot a befektetőnek, és helyeznek ezzel párhuzamos terhet a támogatási kasszára vagy a rendszer üzemeltetőire. A következőkben röviden összefoglalom a fontosabb működési támogatási formákat, és bemutatom, hogy mi vezetett ahhoz, hogy Európa-szerte egyre inkább eltolódjon a hangsúly a „piackonform” támogatási formák felé.

Az áramtermelés területén több működési támogatási forma megkülönböztethető, de mindegyik lényege, hogy a támogatás valamilyen módon egy egység (1 MWh vagy 1 kWh) megújuló forrásból előállított áramra vonatkozik.

Az egyik ilyen támogatás az úgynevezett (zöld)bizonyítványrendszer, melynek keretében a kibocsátott zöld áram minden egysége után egy kereskedhető „bizonyítvány” jár. Ez a rendszer nagyon hasonlít az EU szén-dioxid kibocsátási kvóta kereskedelmi rendszeréhez: míg előbbiben jellemzően a fogyasztók (vagy az őket ellátó kereskedők) kötelezettek bizonyos mennyiségű bizonyítvány beszerzésére, utóbbi esetén a termelők kénytelenek megvenni a kibocsátási kvótákat, hogy tevékenységüket végezhessék. A bizonyítványok és kvóták árát a kereslet és kínálat határozza meg. Ilyen rendszerrel találkozhatunk Romániában, illetve korábban Lengyelországban is, ahol a megújulók mellett a kapcsolt termelést (egyszerre áramot és hőt is előállító erőművek) is támogatta a rendszer (res-legal, 2019).

Egy másik, sokkal népszerűbb támogatási forma, az úgynevezett FiT (Feed-in Tariff), magyarul legjobban kötelező átvételként fordítható támogatási forma. Ennek lényege, hogy a beruházó minden megtermelt egység áramot egy előre meghatározott áron tud értékesíteni – jellemzően egy kijelölt piaci szereplő (ez lehet a rendszerirányító, vagy egy mérlegkör felelős) az, aki kötelezően átveszi a teljes mennyiséget, függetlenül attól, hogy az adott órában milyen árakkal szembesülne a termelő a nagykereskedelmi piacon.

A támogatás tehát nem csak abban áll, hogy az eladott áram ára fix, hanem abban is, hogy garantáltan átvételre kerül minden egység áram (akár abban az extrém helyzetben is, ha negatív árak alakulnak ki egyébként a piacon, vagyis bizonyos termelők hajlandóak fizetni azért, hogy átvegyék tőlük az áramot – Németországban a megújulók ugrásszerű térnyerésével egyre gyakrabban találkozunk hasonló szituációval).

Ez a támogatási forma tehát nem ösztönzi a termelőket arra, hogy a keresleti és kínálati viszonyokat figyelembe véve alakítsák a termelésüket: amikor süt a nap/fúj a szél, ők biztosan termelni fognak.

Különösen érdekes ez például a biomassza erőműveket üzemeltetők esetén, hiszen ők nincsenek kitéve az időjárási viszontagságoknak, így egy másfajta támogatással könnyedén rávehetőek lennének, hogy a biomasszát akkor tüzeljék el, amikor a piacnak is legnagyobb szüksége van az áramra.

Egy FiT típusú támogatási rendszer ezt egyáltalán nem ösztönzi. Nagy előnye is éppen ebből fakad azonban: a beruházó várható bevételei függetlenek a piaci

áraktól, ezért a projekt jóval kisebb kockázattal jár, hiszen az egész élettartam alatt fix cash-flow számolható – természetesen csak azokra az órákra, amikor az erőmű termelni fog, ezzel kapcsolatosan továbbra is megmarad a bizonytalanság, főleg az időjárásfüggő erőművek esetén (szélerőművek és naperőművek).

A legtöbb EU-s tagállamban ezt a formát használták a megújuló energia támogatására sok-sok éven át. Bizonyos országokban a mai napig széles körben elérhető támogatási forma – egyes országokban nemcsak áramtermelés, de megújuló vagy kapcsolt hőtermelés esetén is.

FiT típusú támogatás manapság is elérhető például Ausztriában, Franciaországban, Portugáliában vagy Szlovákiában (res-legal, 2019). A legtöbb helyen (pl.: Horvátország, Csehország, Németország, Görögország, Lengyelország, Nagy-Britannia) azonban csak bizonyos kiemelt beruházói kör jogosult rá, jellemzően a legkisebb, háztartási méretkategóriába eső erőművek építói (res-legal, 2019).

Az utóbbi években kialakult óvatosság a támogatási formával szemben nem véletlen: több ország is nehéz helyzetbe került az adminisztratív módon, előre meghatározott FiT szint bevezetése után. Csehország, Szlovákia és Spanyolország esete is intő például szolgálhat: mindhárom ország rendkívül kedvező támogatási rendszert vezetett be a 2000-es évek végén, így 2009-2011 környékén ugrásszerűen megnőtt a napelemek ¹ száma (Diallo et al., 2018). Ez nemcsak a hirtelen megugró támogatási igény miatt volt problémás, de a rendszerbiztonság fenntartása is komoly kihívást jelentett a hirtelen megérkező nagy arányú időjárásfüggő kapacitás mellett.

Amellett, hogy a támogatási forma semmilyen piaci viselkedésre nem ösztönöz, kellő technológiai fejlettség mellett láthatóan „túl nagy biztonságot” is jelentett a befektetőknek. Az igazi vonzóerő azonban még ezek mellett is nagy valószínűséggel a túl magasán meghatározott átvételi ár volt.

A szabályozhatóságok ugyanis képtelenek voltak időben lereagálni a támogatások miatt felfutó iparág fejlesztései nyomán végbement költségcsökkenést, így az egyre olcsóbb és olcsóbb projektek megvalósítása ugyanazon átvételi ár mellett egyre jövedelmezőbb volt. Végül több országban is visszamenőleges módosításokra szorultak, mérsékeltek a támogatást, vagy adókat vetettek ki bizonyos támogatotti körre.

A fenti példák hívták életre, illetve tették népszerűvé a prémium típusú támogatásokat, melyek alkalmazása mára a legtöbb támogatási rendszer esetén EU-s előírássá vált. Az úgynevezett FiP (vagy Feed-in Premium) típusú támogatások esetén a beruházó maga kell, hogy értékesítse az áramot a nagykereskedelmi piacon, ezen felül azonban támogatásként egy plusz bevételi elemre jogosult, minden egység értékesített áram után.

Ennek a plusz támogatás elemnek több formája is lehetséges: az úgynevezett lebegő prémium hasonlít leginkább a FiT típusú támogatásokhoz, ekkor ugyanis a kapott prémium nagysága változik („lebeg”), annak megfelelően, hogy mekkora a

¹ szokás rájuk photovolatikus erőműként, vagy PV-ként hivatkozni

piaci ár, ugyanis a támogatás meghatározásakor azt a fix árszintet lövik be, amire a beruházó által eladott áram árát kiegészítik. Tehát, ha például a rögzített támogatási szint 80 €/MWh, a termelő egyik órában 60, másikon 40 €/MWh-s áron tudott értékesíteni, akkor első esetben még 20 €-t, a második esetben még 40 €-t kap minden megtermelt egység (megawattóra) áramért. Összességében tehát minden egység áramért 80 €/MWh jár neki.

Ez nagyon hasonlóan tűnik a FiT típusú támogatáshoz, egy fontos különbség azonban, hogy a legtöbb ország nem számol el minden egyes órára vonatkozóan a támogatottakkal, hanem egy adott időszak átlagos árait veszi figyelembe. Tehát, ha az adott időszakban az átlagárhoz képest egy magasabb termeléssel súlyozott átlagáron tudott értékesíteni valaki, akkor még jobban is járhat, mintha FiT -et kapott volna, ha alacsonyabb áron, akkor azonban rosszabbul jár.

Ez megteremti egyrészt az ösztönzöttséget arra, hogy a szereplők reagáljanak a piaci folyamatokra, másrészt azáltal, hogy a termelőknek maguknak kell a megtermelt áram eladásáról gondoskodniuk elősegíti a piacintegrációt, és a kevésbé torzított piaci működést (a piac például beárazhatja a vélekedését az erőművek előrejelzéseinek pontosságával kapcsolatban hosszabb távú termékek esetén).

Ezen támogatástípus esetén további két fajtát különböztetünk meg: a támogatás adható oly módon, hogy ha a rögzített támogatási szintet meghaladják a piaci árak, akkor egyszerűen a prémium elem legyen nulla (a német piacon például ezzel találkozhatunk), de az is egy lehetőség, hogy ebben az esetben negatív prémium alakuljon ki, vagyis a piaci ár előre rögzített támogatási szint feletti részét a szereplőnek a támogatási kasszába vissza kelljen fizetnie.

Előbbi tekinthető a prémium típusú támogatási rendszerek közül a legkedvezőbbnek, hiszen a FiT -hez hasonló bevételek szinte biztosan garantáltak, de még ezen felül is lehetséges további bevétel, ha az áramárak nagyon magas szintre mozdulnának el (a támogatás pedig az előre meghatározott szintnél magasabb áramárak esetén egyszerűen nulla, kockázat a támogatás elszaladásában csak akkor várható, ha az áramárak nagyon leesnek).

Ebben az esetben némi önszabályozás is megvalósulhat, hiszen ha nagyon mérsékel (például a magas áramárak miatt) megújuló erőműveket létesíteni, akkor sok ilyen kapacitás épül, melyek (a nulla határköltség miatt) egy megfelelő mennyiség üzembe lépése után lenyomják a piaci árakat (ezt a szakirodalomban „merit-order-effect”-nek nevezik, lásd például: Welisch, M., Ortner, A., & Resch, G. (2016)).

A még egyértelműbb ösztönzés a piacon való aktív részvételre az úgynevezett fix prémium esetén érhető el. Ebben az esetben a termelő egy rögzített nagyságú támogatást kap minden megtermelt egység áramért, pl. 20 €-t, megawattóránként. Szintén neki kell gondoskodnia az áram értékesítéséről, de amennyiben 60 €/MWh-ért tudja eladni az áramot, akkor összesen 80 €-t kap megawattóránként, ha csak 40 €/MWh-ért, akkor összesen csak 60 €-t. Ez tehát még direkter ösztönzést jelent az erőművek számára, hogy azokban az órákban termeljenek, amikor a piacnak

legnagyobb szüksége van az áramra.

Itt ismét érdemes megjegyezni, hogy azon termelők esetén, akik közel 0 határköltséggel termelnek, ez az ösztönzés gyakorlatilag csak a negatív árak esetén érvényesül, de például egy biomassza erőmű esetén (különösen akkor, ha az nem képes az év összes órájában termelni) már komolyabb hatással lehet a menetrend tervezésre.

További előny, hogy a naperőművek és szélenergia-erőművek esetén egy ilyen típusú rendszer az energia tárolását is ösztönzi: kellően nagy napon belüli árkülönbségek esetén már előfordulhat, hogy megéri eltárolni a termelt áramot (például egy lítiumos akkumulátor segítségével), és csak akkor értékesíteni, amikor ez jóval magasabb áron lehetséges.

Az Unió szabályozás a konkrét támogatási formán túl számos egyéb tényezőt is rögzített, mellyel igyekszik elősegíteni, hogy megszűnjön a túltámogatás, és minél zavartalanabb legyen a megújuló termelők integrációja a villamosenergia-rendszerbe. Az EU-s előírások további részleteit a következő fejezetben ismertetem.

2.2. Európai Unió megújuló politika

Ebben a fejezetben röviden bemutatom az Európai Unió megújuló energiához kapcsolódó politikáját. A fontosabb jogszabályok ismertetésén túl igyekszem az egyes szabályok mögött álló szándékokat is bemutatni, valamint rávilágítani, hogy miért volt szükség bizonyos esetekben a korábbi szabályok módosítására, és új megkötések, szigorúbb szabályok szerinti támogatási rendszerek bevezetésére.

Az Európai Unió megújuló energia támogatására irányuló politikája szorosan kapcsolódik a klímacélokhoz, a megújuló energia felhasználásának növelése azonban számos egyéb pozitív externális hatással is kecsegtet, a levegő minőség javulásán keresztül egészen a fosszilis tüzelőanyagok esetén az import függőség csökkentéséig.

A klímavédelem és a megújuló azonban olyan szorosan összekapcsolódnak, hogy az energiapiachoz kapcsolódó EU által előírt cselekvési tervek elkészítése (korábban: Megújuló Energia Hasznosítási Cselekvési Terv) most már egy egységes tervként kell, hogy elkészüljön az ország klímastratégiájával. Az új dokumentum neve Nemzeti Energia- és Klímaterv (NEKT) (Európai Parlament és a Tanács, 2018). A tervek első változatának (tervezetének) benyújtása 2018 végén, 2019 elején történt, a végleges változatokat 2019 végéig kellett elkészíteniük az egyes tagállamoknak, figyelembe véve a Bizottság tervezetek alapján tett javaslatait.

Az EU minden tagállamától elvárja a megújuló energia felhasználás növelését, mely elvárást különböző megújuló energia felhasználási arányszámokra vonatkozó célok formájában különböző céldátumokkal meg is fogalmaz. A konkrét célok ismertetése előtt röviden bemutatom, hogy pontosan mire is vonatkoznak ezek az

arányszámok, hogyan kell értelmezni őket, és mi az oka a számítás ilyen módon történő előírásának.

A megújuló arányszámok a teljes energiaszektorra lefedik: a közlekedést, a hűtés-fűtési szektort és az áramszektort. Az arányszám meghatározásakor a teljes megújuló alapú hazai energiatermelést kell viszonyítani az ország teljes primerenergia felhasználásához. A mutató tehát azt méri, hogy az ország a teljes energiafelhasználásának hány százalékát képes maga megújuló energiából előállítani, fedezni.

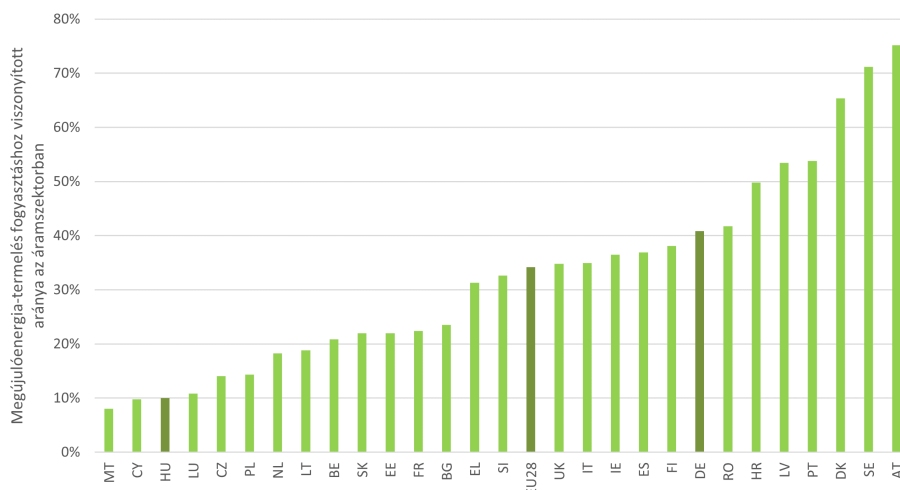
Ez a számítási mód azt eredményezi, hogy előfordulhat 100%-nál magasabb megújuló arány is, olyan országok esetén, amik fogyasztásuknál nagyobb mennyiségben hasznosítanak megújuló energiát, természetesen ekkor a fennmaradó többletet exportálják. Ez azonban nem jellemző: a legfrissebb elérhető adat a 2019-es érték, az EU28 átlagos megújuló arányszáma 18,9%. 50% felett csupán egyetlen tagállam teljesít, a meglehetősen előnyös adottságokkal rendelkező Svédország, a teljes megújuló arány náluk 56,4% (Eurostat, 2021).

Az egyes szektorok esetén külön-külön is meghatározásra kerültek az arányszámok, vagyis külön közlekedési, hűtés-fűtési és áramszektorra vonatkozó arányszámokról is beszélhetünk. Dolgozatomban témájából fakadóan természetesen a továbbiakra vonatkozóan leginkább releváns mutató az áramszektorra vonatkozó arányszám. Itt az EU28-as átlag 2019-re 34,2%, míg a legmagasabb aránnyal Ausztria rendelkezik (75,1%), a fent említett Svédország pedig 71,2%-kal követi a második helyen.

Néhány Európai Unió kívüli, környező ország esetén már előfordulnak 100% közeli, vagy akár azt meghaladó értékek is: Izlandon az elfogyasztott áram 100,6%-át, Albániában 88,5%-át termelik meg megújuló energia források segítségével (Eurostat, 2021). Utóbbi esetén a magyarázat, hogy az ország áramtermelésében semmilyen fosszilis erőmű nem kap szerepet, az import mellett gyakorlatilag csak víz-erőművekre támaszkodik az albán áramszektor. Az ország árampiacát részletesen elemeztük szerzőtársaimmal többek között a South East Europe Electricity Roadmap (SEERMAP) kutatás keretein belül (Szabó et al., 2017a).

Norvégia 2019-ben 110,8%-os arányszámmal dicsekedhetett, vagyis jelentősen több megújuló alapú áramot állított elő, mint amennyit elfogyasztott (mindeközben egyébként az EU nagy mennyiségben vásárol Norvégiától földgázt és kőolajat). Magyarország az utolsó néhány tagállam között foglal helyet 10,0%-os arányszámával, míg Németország az átlagot meghaladó 40,8%-os arányt ért el 2019-ben (Eurostat, 2021). Az EU28-ra vonatkozó adatokat a 2.2. ábrán foglalom össze.

A célok meghatározása 2020-ra (Európai Bizottság, 2009) és 2030-ra (Európai Tanács, 2014) vonatkozóan különböző módon történt. Míg az első esetben a célokat országos szinten fektették le, addig 2030-ra már Európai Unió szinten kerültek meghatározásra. A 2020-as célok esetén egy össz-EU-s célt osztottak le az országok között oly módon, hogy minden ország lehetőségeihez mérten kell, hogy hozzájáruljon ezen összesített cél teljesítéséhez. A megújuló energia mellett két másik



2.2. ábra. Megújuló energia felhasználási arány az áramszektorban az Európai Unió tagállamaiban, 2017 forrás: Eurostat, 2019

fontos célt is kitűztek:

- 20% üvegházhatású gáz kibocsátáscsökkentés (az 1990-es szinthez képest)
- 20%-os megújuló energia felhasználási arány
- 20%-os energiahatékonyság-növelés

A leosztás során figyelembe vették többek között az egy főre eső GDP értékeket, illetve természetesen azt is, hogy milyen kezdőpontból indultak az egyes országok. Ennek megfelelően a megújuló arány tekintetében viszonylag széles skálán mozogtak a rögzített értékek: Málta számára 10%-os arányt, Svédország számára 49%-os arányt írtak elő (Európai Bizottság, 2009).

A 2030-as célok ezzel szemben egészen más logika mentén kerültek meghatározásra. Az első lépés itt is egy teljes Európai Unióra vonatkozó cél meghatározása volt, mégpedig a következők szerint:

- Legalább 40% üvegházhatású gáz kibocsátáscsökkentés (az 1990-es szinthez képest)²
- Legalább 32%-os megújuló energia felhasználási arány
- Legalább 32,5%-os energiahatékonyság-növelés

Ezeket a célokat azonban a korábbiakkal ellentétben nem osztották le országos szintre. Az EU-nak együttesen kell teljesítenie ezeket a vállalásokat. Éppen ezért

²2020 végén ezt a célszámot az EU 55%-ra módosította, 2050-re pedig karbonsemlegességet hirdetett. Lásd részletesen: https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action_en

újra és újra felmerül, hogy milyen mechanizmust fog választani az EU abban az esetben, ha a céldátumhoz közeledve úgy tűnik nem sikerül teljesíteni a célokat.

Ekkor ugyanis szükség lehet valamilyen központi beavatkozásra, ami elősegíti, hogy elérjük a kitűzött csökkentéseket. Az egyik ötlet ezek közül egy központi aukció szervezése, melynek költségvetését azok a tagállamok fedezik, melyek nem haladtak kellően előre a célok teljesítése terén, a megújuló energia termelését vállaló beruházók pedig bármely tagállamból érkezhettek, és bármely tagállam területén megvalósíthatják a projektjüket (Blüchner et al., 2018). Ez azonban egyelőre nincs napirenden, hiszen egyelőre a 2020-as célok teljesítésének vizsgálata aktuális. A célok teljesítését a pandémia miatt visszaeső kereslet a legtöbb tagállamban segítette. Kérdés, hogy a gazdaság helyreállása után az országok képesek lesznek-e a visszazárkózott kereslet mellett is fenntartani a számokat.

A jogszabályok a 2020-as célok esetén is lehetőséget biztosítanak arra, hogy egy ország (részben) egy másik ország területén megtermelt megújuló energia támogatásán keresztül teljesítse kötelezettségeit. Ilyen típusú támogatás kiosztására azonban egyelőre kevés esetben volt példa – ezek egyikét, a dán-német közös aukciót a következő fejezetben mutatom be részletesen.

A 2020-2030-as időszakban azonban az EU nemcsak lehetőségként, de bizonyos országok számára kötelezettségként írta elő, hogy támogatási rendszerüket ki nyissák más országok felé. Tíz ország (köztük Magyarország) került a kötelezettek listájára (Blüchner, 2019).

Ennek a szabálynak az oka elsősorban egy versenyhatósági kérdés: a legtöbb országban a megújuló energia támogatása a fogyasztóktól beszedett járulékon keresztül történik. Éppen ezért az import áram – melyet egy másik tagállamban termeltek meg – versenyhátrányba kerülhet az itthon termelt árammal szemben, ugyanis a járulék rákerül, a hazai támogatási rendszer juttatásaiból azonban (az aukció megnyitása nélkül) nem részesülhet.

A jogszabályok másik része a támogatás kiosztásának módját szabályozta (Európai Bizottság, 2014). Ahogy fent bemutattam, több országban is komoly problémákat okozott, hogy az adminisztratív módon, előre meghatározott támogatás nem követte le kellőképp a szektorban időközben bekövetkező költségcsökkenést, ami annyira kedvező helyzetet teremtett, hogy egyszerre szinte kezelhetetlen mennyiségű projekt megvalósulásához vezetett.

Az EU ezért bizonyos beépített kapacitás méret felett betiltotta ezt a fajta támogatást, és előírta, hogy a támogatási szint meghatározása verseny keretében történjék. Az új rendszerben a szereplők aukciókon nyerhetik el a támogatást, a korábbi automatikus jogosultsággal szemben, még hozzá oly módon, hogy a támogatás tényleges szintje is aukción alakul ki, és csak egy előre meghatározott keret erejéig részesülhetnek belőle a jelentkezők.

Egy másik fontos változás – szintén a nagyobb méretkategória esetén – a FiT típusú támogatás helyett áttérés a FiP, vagyis prémium típusú támogatásokra. Ahogy

fent bemutatam, ez a támogatási forma sokkal jobban ösztönzi a termelőket arra, hogy a piaci folyamatokat lekövetve igyekezzenek előállítani az áramot.

Külön szabályok vonatkoznak a negatív árral rendelkező órákra: amennyiben az árak 6 egymást követő órában is negatívak, erre az időszakra a termelőknek nem adható támogatás.

A támogatás típusán túl az EU előírta a termelők számára a fokozottabb rendszerintegrációt is. Míg a korábbiakban a menetrendtől való eltérést a megújulók számára sokkal kevésbé szigorúan büntették, az újonnan elnyert támogatások esetén már maguknak kell fedezni a kiegyenlítési költségeiket, egy nagyobb pontossággal elvárt menetrendtartás esetén.

A megújuló termelők komoly kihívás elé állították, és állítják folyamatosan a villamosenergia-rendszer üzemeltetőit. Bár az előrejelzések egyre pontosabbak, és a termelők a fenti szabályoknak megfelelően egyre nagyobb arányban vannak rákényszerítve a rendszer igényeihez igazított termelésre, a következő évek során a rendszer fejlesztésére minden tagállamban nagy összegeket kell majd költeni. A megújulók előretörése ugyanis nem áll meg. A következő két fejezetben a német és a magyar árampiac példáján keresztül szemléltetem ezt.

2.3. Támogatások a német árampiacon

Ebben a fejezetben egy rövid áttekintést adok a német árampiacról, illetve arról, hogy az utóbbi években hogyan alakult a német állam megújuló energiára vonatkozó politikája, a közismert néven „Energiewende”, vagyis energiafordulat. Ennek jelentősége világszerte elismert, nagyban hozzájárult ahhoz, hogy a megújuló energiához kapcsolódó technológiák fejlődése megindulhasson.

Ezt követően részletesen bemutatom a jelenleg érvényben lévő támogatási rendszert, elsősorban a naperőművek támogatására fókuszálva. Ez lesz az aukciós modellem kiinduló pontja, ezért fontos megérteni a működését.

Rövid kitérő erejéig megemlítem a nemrég megtartott dán-német határon átvéelő aukciót, és ennek eredményeit, mely érdekes tanulságokkal szolgálhat a megújuló aukciók tekintetében. Különösen fontos lehet Magyarország számára, ahol előírás, hogy a jövőben legalább az aukciók egy részét nyissa meg a más országokban történő beruházások számára is.

A német árampiac és az „Energiewende”

A német energiafordulat, vagy közkeletű néven az „Energiewende” több különböző cél együttes megnevezése. Röviden összefoglalva olyan limitált szén-dioxid kibocsátású energiaszektor elérése a cél, melyben a nukleáris energia nem kap szerepet. A megújuló energia támogatása mellett tehát hosszú távon a nukleáris erőművek és a szén-alapú termelés teljes visszaszorítása a cél. Mindezt a versenyképesség szem

előtt tartásával, és sok esetben a lakosság aktív részvételével próbálja meg Németország véghezvinni.

Az Energiafordulat bizonyos tekintetben már jóval a 2000-es évek előtt elkezdődött. A fontosabb mérőföldkövekről kiváló összefoglalást nyújt Wettengel (2017), ebből az írásból kiindulva mutatom be én is a fontosabb állomásokat és döntéseket, amik alapján Németország energiapiaca elnyerte mai formáját.

Az Energiewende kifejezést az 1980-as évek elejétől kezdve kezdték el használni, ekkor alakult meg a Zöld Párt, mely követelte a nukleáris erőművek bezárását. Az első két erőművet a két Németország egyesítésekor zárták be, ezután még sokáig várni kellett a következő komolyabb atomerőműveket érintő lépésig. Mindeközben azonban elindult a megújulókat támogató program: 1991-től kezdődően FiT típusú támogatással igyekeztek beindítani a megújulók elterjedését.

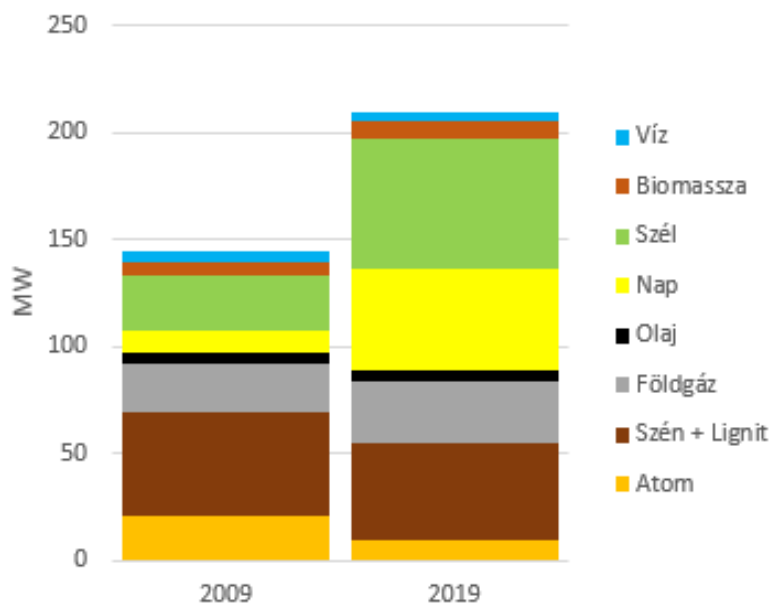
A 2000-es évben fogadták el – a később sok módosítással, de mai napig érvényben lévő – megújuló energia törvényt (Erneuerbare Energien Gesetz – EEG). A törvényben egy FiT típusú támogatás részletei szerepeltek, 20 éves garantált támogatási időtartammal, és kötelező átvétellel. Ugyanebben az évben megegyezést jelentettek be az áramszolgáltatók és a kormány között a nukleáris erőművek 2022-ig történő bezárásáról. Tíz évvel később ismét arról szóltak a hírek, hogy meghosszabbítják több erőmű élettartamát is, de csupán, hogy egy évvel később (2011-ben) ismét bejelentse a 2022-es bezárásról szóló terveket.

Az EEG keretein belül pedig mindeközben folyamatosan helyezték ki a támogatásokat, ami a 2002-es 18,5 GW-os összes megújuló kapacitást tíz éven belül megnégyszerezte (Fraunhofer, 2019). 2014-ben komolyabb felülvizsgálat történt a rendszerben – eddigre lecsengett több országban is a fent bemutatott „PV-boom”, tehát Németország tanulhatott a többiek hibáiból -, jelentősen lecsökkentették a támogatási szintet, és a korábbi adminisztratív kiosztás felől az aukció irányába mozdultak el.

Az elemzések a 2010-es évek közepétől kezdődően azonban aggasztóak, úgy tűnik Németország mindezek ellenére nem éri el a 2020-ra kitűzött klímacélokot. Mi az, amit ennek ellenére elért a német energiafordulat? A fenti történet mintegy számszerűsítéseként a 2.3. ábrán a német árampiac termelőinek tíz évvel korábbi, és a jelenlegi kapacitásait mutatom be a 2019-re elérhető adatok alapján. Jól látható a megújulók felfutása, és a fosszilis és nukleáris erőművek fokozatos kivezetése.

A rendkívül nagy mennyiségű megújuló kapacitás telepítése mellett nagyon sok tapasztalat halmozódott fel, mind a megújuló energiát hasznosító erőművek gyártása, mind telepítése és üzemeltetése terén. A komoly támogatás nélkül a szektor világszerte jóval lassabban érhetne volna el a mai költségszinteket, hiszen éppen a támogatások miatt volt érdemes a kutatásba, fejlesztésbe fektetni.

Ez meg is hozta a gyümölcsét, hiszen mind a szélenergia, mind a napenergia esetén drasztikus beruházási költségcsökkenésnek lehettünk tanúi az elmúlt 10-15 év során. 2006-ról 2019-re egy friss tanulmány szerint Németországban összesen



2.3. ábra. Német kapacitásmix 2009-ben és 2019-ben, forrás: Fraunhofer, 2019

75%-kal csökkentek a naperőművi és szélőművi beruházási költségek, ami évről évre több, mint 10%-os csökkenést jelent (Wirth, 2019).

A nagy arányú megújulóval a rendszerben azonban problémák is jelentkeztek. A rendszer üzemeltetése komoly kihívást jelent az időjárásfüggő erőművek esetén, a rendszerbiztonság fenntartásához a rendszerüzemeltetők újabb és újabb befektetéseket kell, hogy eszközöljenek.

Vannak azonban a határokon is átnyúló nehézségek: Pató (2016) remekül összefoglalja milyen káros következményekkel kell a szomszédos országoknak szembenéznie, ha Németországban hirtelen elkezd fújni a szél. A déli országrészben elhelyezkedő atomerőművek bezárásával az ország korábban kiegyensúlyozottabb területi ellátása felborult. Míg a fogyasztás komoly része helyezkedik el itt, az újonnan telepített szélőmű kapacitások nagyrészt az ország északi részén találhatók.

Mivel korábban nem volt szükség az országon keresztül ilyen nagy mennyiségek szállítására, a belső hálózat nem minden esetben bírja el a hirtelen jött terhelést, ezért úgynevezett nem szándékolt áramlások formájában előfordul, hogy az áram nem az országon belül jut el északról délre.

A részletekbe való elmélyülés nélkül röviden (további információért lásd (Pató, 2019)): a lengyel-német határmetszéken a 2010-es évek közepén rendkívül sok ilyen nem szándékolt áramlás történt, az áram ugyanis fizikailag Lengyelországon keresztül jutott el Németország egyik pontjából a másikba. Ez azt jelentette, hogy a rendelkezésre álló kapacitásokat kereskedelmi célokra nem lehetett használni, ami komoly veszteséget okozott a lengyel rendszerirányítónak (panaszát 2015 az ACER

³ is jogosnak ítélte meg). Összességében tehát jól látható, hogy a megújulók elterjedése számos nehézséget vet fel, de az évek során, ahogy a tapasztalat is nő, ezek kezelése is egyre könnyebbé válik.

A német átalakulás eddig az áramszektorra fókuszált, de az utóbbi években egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek más szektorok bevonására: mind a közlekedés, mind a hőszektor esetén komoly átalakításokat terveznek. Ez az autóiparnak is igazi kihívást jelent, ami a német gazdaság egészét érzékenyen érintheti. A versenyképesség megőrzése érdekében az ipari fogyasztók a kezdetektől fogva mentesültek az egyébként az áramárakba épített megújuló támogatási elem megfizetése alól.

Az elsősorban a lakosság által megfizetett támogatások hosszútávon, kellően magas megújuló penetráció esetén elősegíthetik az áramárak csökkenését (bár a növekvő szén-dioxid-kvótaárak mellett inkább a növekedés lassításáról érdemes beszélni), mely maguk és az ipar számára is előnyös lehet, a közlekedési szektor dekarbonizációjából fakadó nehézségek azonban már nem oldhatóak meg a pénzügyi terhek egyszerű áthárításával.

A mai német támogatási rendszer

A támogatási rendszer történetének és a megújulók elterjedésének bemutatása után rátérek a ma működő rendszer szabályainak ismertetésére. Ahogy korábban említettem, az EEG szabályozza (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2019)) a megújuló energia támogatását, a következő fejezetben részben erre a jogszabályra, részben pedig Sternkopf (2019) összefoglalójára támaszkodom.

Ahogy fent bemutattam, Németországban az aukciók bevezetéséről még 2014-ben döntöttek, de egy abban az évben megrendezett pilot tender után az aukciók 2015-től indultak el, és azóta is folyamatosan tartanak. A részletek ismertetése a továbbiakban a napenergia aukciók szabályaira korlátozódik.

Ennek fontosabb ismérvei a következők:

- A napelemek esetén (a többi erőműtípushoz hasonlóan) technológiaspecifikus tendereket rendeznek, vagyis egy-egy aukción csak azonos tüzelőanyagot hasznosító erőművek indulhatnak.⁴
- A támogatás lebegő prémium típusú, a szereplőknek arra az árra kell tehát ajánlatot adniuk, amire támogatásként az állam kiegészíti az értékesítési árukat (a továbbiakban erre az értékre „támogatási szint”-ként hivatkozom)
- A támogatás 20 évre szól.

³Agency for the Cooperation of Energy Regulators, magyarul az Energiaszabályozók Együttműködési Ügynöksége – az Európai Unió által létrehozott szervezet, mely az energiaszabályozó hatóságok munkáját felügyeli és segíti

⁴Speciális kombinált nap- és szélenergiára vonatkozó tendereket is szerveznek, de ezek elemzése nem képezi jelen dolgozat tárgyát.

- A megvalósítható projektek nagysága 0,75 MW és (földön álló egységek esetén) 10 MW között mozoghat.
- Ajánlati biztosítékként 50 €/kW összeget kell rendelkezésre bocsátaniuk az indulóknak
- Egykörös, zárt borítékolású aukciókat szerveznek, jellemzően ajánlati áras szabállyal, de kísérleti jelleggel tartottak egyenáras aukciót is.
- Az árplafont havonta módosítják egy előre meghatározott módszertan segítségével.
- Évente 3, egyenként 200 MW-os tendert rendeznek, februárban, júniusban és októberben. A pontos aukcionált mennyiségek azonban egy előre meghatározott módszertan szerint módosításra kerülhetnek, a már beépült kapacitások mennyiségét figyelembe véve.
- A projekt megvalósítására 2 év áll rendelkezésre.
- az EU-s szabályoknak megfelelően amennyiben az árak 6 egymást követő órában is negatívak, erre az időszakra a termelőknek nem adható támogatás.

A támogatási rendszer fenti elemeit igyekszem a lehetőségekhez mérten részletesen figyelembe venni a modelleim felépítésekor: mind a pontos költségbecslés, mind az aukcióelméleti modell esetén.

Néhány elemtől azonban eltekintek. Ezek közül az egyik az ajánlati biztosíték: ez egy olyan elem, amit a szereplőknek ahhoz kell befizetniük, hogy ajánlatot tessenek. Lényege, hogy az aukción már csak a „komoly” versenyzők induljanak, legyen költsége az aukción való részvételnek, hogy a támogatást elnyerők olyanok legyenek, akik valóban megvalósítják majd a projektjüket. Bár ennek a valóságban komoly jelentősége lehet, a modell egyszerűsítése érdekében eltekintek az ajánlati biztosíték beépítésétől.

A negatív árakra vonatkozó kitétel egyszer sem volt effektív: az általam készített áramelőrejelzésben egyszer sem alakultak ki negatív árak, a legkisebb ár 2,5 €/MWh volt. Ez azzal magyarázható, hogy az előrejelzésre használt modell (lásd részletesen a 3.2 fejezetben) éppen a legextrémebb órákat képes a legkevésbé leképzeni, mert – ahogy látni fogjuk –, nem 8760, csupán 90 különböző órát modellezek egy évben.

Ez természetesen némi torzítást visz az aukcióelméleti modellembe is, de a 6 egymást követő negatív árral rendelkező óra előfordulása továbbra sem tekinthető gyakori jelenségnek (bár ez kellő gyorsasággal felfutó megújuló penetráció esetén változhat).

Mielőtt rátérek a költségbecslés és az aukcióelméleti modell bemutatására a 3. és 4. fejezetben, egy rövid kitekintés erejéig bemutatom két korábbi aukció eredményeit és tanulságait, melyeket mintegy próbaképp tartott meg Németország, Dániával közösen.

A német-dán határkeresztező aukciók tanulságai

Érdekes fejleményekkel szolgált az első Európai Unióban szervezett határonátnyúló (cross-border) aukció, amit Németország és Dánia közösen hozott tető alá. A fontosabb tanulságokat Blüchner et al. (2019) tanulmánya alapján foglalom össze.

A tender kiírására 2016 végén került sor. A felek két aukció megtartásában állapodtak meg: az egyiket a német fél, a másikat a dán fél szervezte, és mindkét esetben lehetőség volt a másik országban telepíteni kívánt erőművekkel is pályázni. A dupla aukció előnye az volt, hogy mindkét fél a maga képére formálhatta a szabályokat, így egészen különböző módon történt a kiírás. A német aukció például egyenárasként, míg a dán aukció ajánlati árasként került meghirdetésre, mások voltak a projekt méretre és a maximális elfogadható ajánlatra vonatkozó előírások is.

A két kiírás mellett olyan szabályok is fontos szerephez jutottak, amik nem az aukcióhoz, hanem az országhoz kötődnek: többek között a területhasználat (Németországban például szántóföldön nem telepíthető napelem, míg Dániában nincsen ehhez hasonló korlátozás), vagy az adózási rendszer. Ezek a paraméterek függetlenül attól, hogy a szereplők éppen melyik ország által kiírt aukción vesznek részt az alapján vonatkoztak rájuk, hogy a projektjüket fizikailag hová szeretnék telepíteni.

Az eredmények a Németország által szervezett aukción a következőképpen alakultak: a beadott csaknem 300 MW-nyi ajánlat nagyjából fele-fele arányban érkezett Dániából és Németországból. A nyertesek azonban mind dán területen megépített projektek voltak. Az előzetes megegyezés alapján ugyan mind az öt nyertes projekt termelése a német megújuló célhoz járul majd hozzá, összességében mégis csalódással vették tudomásul a szervezők, hogy egy „saját” projektet sem tudtak díjazni.

Érdekes módon a Dánia által meghirdetett aukción – bár szintén nyitott aukción volt szó – egyetlen német területen megépíteni kívánt projekt sem indult el. Ennek többek között az lehetett az oka, hogy a szokásos német (saját, zárt) aukció néhány nappal később került megtartásra, így a német pályázók valószínűleg inkább az ismert, jobban rájuk szabott hazai aukción indultak el. Így összességében mindkét aukción csak dán projektek nyertek támogatást.

Ennek a sokak szerint meglepő eredménynek a hátterében több indok együttesen húzódik meg. Egyrészt Dániában korábban nem szerveztek nagy számú aukciót, másrészt a dán napelem-támogatási programot éppen 2016 májusában zárták le – a dán beruházók tehát valószínűleg részben éppen azért indultak versenyképes

ajánlatokkal, mert ezen a két aukción kívül bizonytalannak gondolhatták a további, jövőbeli lehetőségeket, szemben a német beruházókkal, akiknek folyamatosan támogatási lehetőséget biztosított a hazai rendszer.

A második fontos tényező a napenergia elérhetősége: a dán és a német adatokat összevetve azt láthatjuk, hogy átlagosan a dán adottságok kedvezőbbek, ugyanazzal az erőművel az időjárási adottságok miatt várhatóan több áram termelhető Dániában. A harmadik különbségeket megmagyarázó elem pedig a már fent is említett területhasználat lehetett: a német projektek esetén jóval szigorúbb megkötésekkel szembesültek a beruházók, mint a Dániában telepítendő napelemek esetén.

Az aukciókat mindkét ország pilotként aposztrofálta, azonban a megegyezéskor úgy tűnt, a német fél szeretné a tapasztalatokat kamatoztatni a jövőben esetlegesen megszervezett további kinyitott aukciókra vonatkozóan is (a dán fél nem jelezte további nyitott aukciók szervezésére vonatkozó szándékát, már az egyeztetések során sem). Az eredmények azonban úgy tűnt visszavetették a németek lelkesedését, így a közeljövőben várhatóan inkább a hazai projektek támogatására kiírt aukciókra koncentrálnak majd.

A német-dán tenderek tanulsága, hogy fontos látni, milyen sok különböző tényezőt érdemes figyelembe venni egy aukció tervezésénél, hiszen mindezek hatásával lesznek a szereplők viselkedésére, és az eredményekre. Ebből a sok tényezőbből az egyik kiemelten fontos a pontos szabályrendszer, ami szerint a szereplők ajánlatait elbírálják, és az elnyert támogatási szintet meghatározzák.

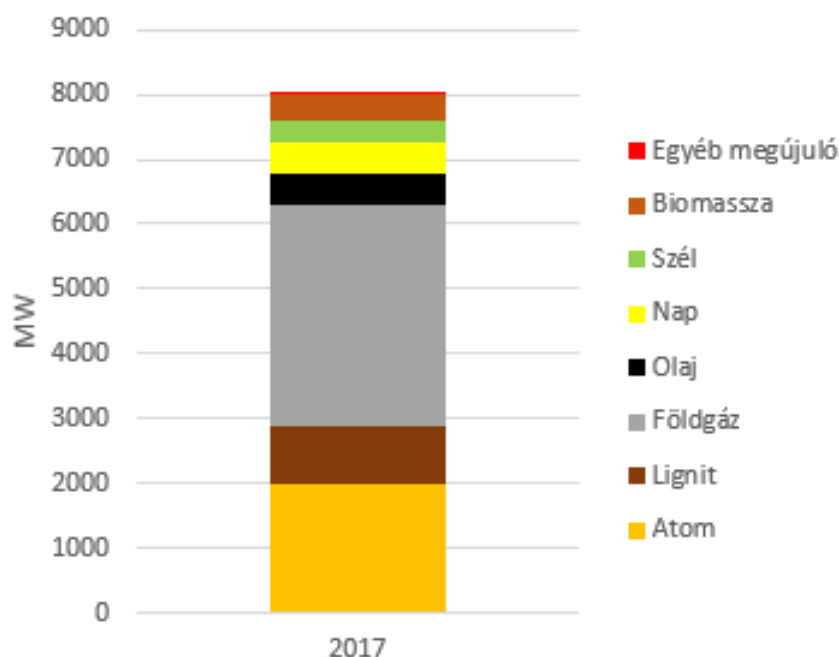
Hasonlóan lényeges lehet az is, hogy az aukció kiírója tisztában legyen a szereplők várható költségszerkezetével, (ideértve a projektek megvalósításához kapcsolódó adminisztratív terheket is) és termelési potenciáljával, hiszen így tud egy legalább közelítő képet kialakítani a várható eredményekről. Dolgozatomban ezért szentelek egy külön fejezetet a szereplők költségei részletes kiszámításának, ahelyett, hogy a szakirodalomban fellelhető kész számításokat használnám fel.

2.4. Támogatások Magyarországon

A magyar árampiac rövid ismertetése

A megújuló energia támogatása – ahogy a következő alfejezetben részletesen is bemutatatom – már nagyjából a piacnyitás óta, tehát, több mint tizenöt éve elkezdődött Magyarországon. Ennek ellenére igazi áttörés, a megújuló kapacitások komolyabb elterjedése egészen néhány évvel ezelőttig nem történt meg. Az elmúlt egy-két év fejleménye csupán, hogy egyre több napelem került be a rendszerbe, és ez a trend várhatóan a következő években is folytatódni fog.

A magyar rendszer azonban még így is meglehetősen kis részét termeli meg az áramnak megújuló energiából. A magyar rendszer sajátossága az európai szinten is magasnak mondható importarány (a 2015-2018-as időszakban átlagosan 30-35%),



2.4. ábra. Magyar kapacitásmix 2017-ben, forrás: Mezősi et al., 2019

valamint a teljes beépített kapacitás 25%-át adó Paksi Atomerőmű (Kácsor et al., 2019).

Ahogy a 2.4. ábrán is látható, a fosszilis erőműveknek is fontos szerep jut, összesen csaknem 4800 MW kapacitás használ lignitet, földgázt vagy olajat az áramtermelésre. Több európai országgal egyetemben azonban Magyarország is bejelentette (a 2019. szeptemberi, new yorki ENSZ klímacsúcstalálkozón), hogy „2030-ig befejezi a szén energetikai hasznosítását”, vagyis, szinte biztosan kikerül majd a Mátrai Erőmű csaknem 900 MW-nyi lignites kapacitása a magyar mixből (Köztársasági Elnöki Hivatal, 2019).

A magyar megújuló energia részarány 2017-ben meghaladta a 13,5%-ot, (Eurostat, 2019), mely a kitűzött, kötelezően teljesítendő 2020-as cél (bár az önkéntes vállalás ennél valamivel magasabb, 14,65%, ezt azonban nem kötelező teljesíteni 2020-ra, (Bartek-Lesi et al., 2019)).

Ez elsősorban a hőszektorban elért magas megújuló penetrációnak köszönhető, ahol 19,6%-os megújuló arányt tudott Magyarország felmutatni, hiszen az áramszektorban csupán 7,5%, a közlekedésben pedig 6,8% volt a megújuló arány 2017-ben (Eurostat, 2019). A magyar helyzet speciális, ugyanis az EU átlagosan jóval nagyobb arányban teljesít jól az áramszektorban: a fenti arányok a hő-, áram- és közlekedési szektorban az EU28 átlagában ugyanerre az évre 19,5%, 30,7% és 7,4%, ami összességében 17,5%-os teljes megújuló arányt jelent.

Sajnos a 2018-as és 2019-es évre azonban az arány lecsökkent (Eurostat, 2021), semmiképpen sem érdemes tehát hátradólni. Ennek oka, hogy a hőszektor előretörése a háztartási biomassza felhasználás növekedésén keresztül valósult meg, ami

részen a korábban magas gázáraknak volt köszönhető.

A hirtelen megugró tüzfafelhasználás részben viszont statisztikai jellegű: több európai országhoz hasonlóan Magyarország is változtatott a háztartási tüzifa felhasználás számítási módszertanán, a korábbi, főként erdészeti statisztikákon alapuló adatok helyett az új számítás egy a többek között a háztartási energiafelhasználást is felmérő adatfelvételen alapszik (további részletekért lásd: Mezösi et al., 2017).

A rezsicsökkentés hatására, illetve a dráguló tüzifa miatt azonban sokan visszává váltottak a földgáztüzelésre, így a magasabb megújuló arány nem feltétlenül lesz tartható a következő néhány évben. A pontos arányt ráadásul a hőmérséklet is nagyban befolyásolja, ami további bizonytalanságot visz a megújuló célok teljesítésébe. Éppen ezért kiemelt fontossággal bírnak a hazai árampiaci tenderek, hiszen a megújuló áramtermelő kapacitások kiépítése hosszabb távon is biztos megújuló forrásnak tekinthető, és nemcsak a 2020-as, de a 2030-as célok teljesítéséhez is biztosan szükségünk lesz rájuk.

Történeti áttekintés

Hazánkban évek óta napirenden van a megújulóenergia-termelés támogatásának megreformálása, melyet a fent bemutatott EU-s előírások még inkább sürgetővé tettek az elmúlt időszakban. A korábbi áramtermelésre vonatkozó támogatási rendszer, az úgynevezett KÁT rendszer (kötelező átvételi rendszer) még 2003-ban indult, (GKM, 2002; Bartek-Lesi et al., 2019), majd később többször módosult (pl. Kormány, 2007), de az alvető szabályok szintjén egészen 2016-ig nem történt jelentős változás.

A rendeletekben foglaltaknak megfelelően egy FiT típusú támogatást kaphattak a megújuló energiaforrásból áramot termelők, vagyis minden egység megtermelt áramért egy előre meghatározott árat kaptak. A 2000-es évek közepén még mindannyian az úgynevezett kötelező átvételi mérlegkörhöz csatlakoztak, nem volt feladatuk a menetrendtartás, amikor termeltek, a teljes mennyiséget átvette tőlük a mérlegkörfelelős, egy előre meghatározott áron.

A fontosabb változások egyike volt, hogy a támogatottak köre bővült: a kapcsolatan áramot és hőt termelőkre egyaránt vonatkoztak a fenti szabályok, először csak bizonyos méret alatt, később pedig egyre szélesebb körben. Ez a támogatási forma azonban a támogatási igény jelentős növekedéséből kifolyólag 2010-ben megszűnt (részletekért lásd: Kácsor et al., 2019).

A FiT típusú támogatások, ahogy fent bemutatam, ebben az időszakban Európa-szerte népszerűek voltak, ekkor még a megújuló energiát hasznosító technológiák költségei nagyon magasak voltak, így indokolt volt egy ilyen típusú, rendkívül kedvező, kiszámítható támogatási forma alkalmazása. Később azonban egyre több ország példájából vált világossá, hogy a támogatási szint meghatározása egyre nehezebb feladat. Az adminisztratív módon, előre meghatározott támogatás, illetve a fix

áron történő kötelező átvétel helyett egyéb alternatívákat kezdtek keresni a döntéshozók.

Az úgynevezett METÁR rendszer előkészítése itthon 2011-ben kezdődött meg. Az akkor még „A megújuló és alternatív energiaforrásokból előállított hő- és villamosenergia-átvételi támogatási rendszer” néven futó törvénytervezet első változata 2012-ben készült el, ebben 2013-as bevezetést terveztek, erre azonban később mégsem került sor.

A törvényt hosszabb időre félretették, hogy végül 2016-ban egy olyan változattal álljanak elő, melyben már az aukción történő kiosztás és egy prémium rendszer szerepelt, szemben a 2011-2012 során elkészült tervezettel, amiben még fix áron történő kötelező átvételről írtak.

Már az új METÁR-ról szóló rendeletek címéből is látható volt a változás: „a megújuló energiaforrásból származó villamos energia termelési támogatás korláta-iról és a prémium típusú támogatásra irányuló pályázati eljárásról” szóló 62/2016 NFM rendelet (NFM, 2016) már konkrét aukciós szabályokat tartalmazott.

A teljes támogatási rendszert azonban, annak minden elemével, részletével együtt szükséges volt egyeztetni, illetve elfogadtatni az Európai Unióval, így az aukció tényleges kiírására még csaknem három évet kellett várni.

Az EU jóváhagyása után a hazai piaci szereplőkkel is hosszas egyeztetés történt, végül az első, „pilot” aukció kiírása 2019 szeptemberében történt meg. Az ajánlatok beadására októbertől decemberig volt lehetőség, a végleges eredményeket pedig a következő negyedévben hirdették ki. A második magyar aukciót 2020 nyarán rendezték meg, az előzetes eredményeket pedig ősszel tették közzé. A végleges eredményhirdetés 2021 elejére várható.

A fejezet megírásakor tehát ezek az eredmények még nem álltak rendelkezésre, így a fejezet a történelmi áttekintésen túl a szabályrendszer részletes bemutatására korlátozódik. A fejezet legvégén röviden kitérek a két aukció (előzetes) eredményeire is.

A szabályok ismertetése előtt azonban egy rövid kitérő erejéig szeretném bemutatni a szélerőművi beruházásokhoz kapcsolódó nehézségeket az elmúlt tíz év során. Bár szorosan nem kapcsolódik dolgozatom témájához, úgy gondolom a megújuló energia támogatásának hazai történetében fontos szerepet játszik, így érdemel néhány szót.

A szélenergia támogatása – véleményem szerint sajnálatos módon – Magyarországon jelenleg nem lehetséges, ugyanis 2016-ban egy miniszteri rendeletben gyakorlatilag betiltották Magyarország területén a szélerőművek telepítését (Nemzetgazdasági Miniszter, 2016).

A szélerőművi projektek megvalósítása azonban korábban sem volt egyszerű feladat hazánkban. Már az első szélerőművek telepítésekor – a rendszerbiztonságra való tekintettel – korlátot vezettek be a kapacitásokra vonatkozóan. A 2006-ban

rendezett tenderen összesen 330 MW kapacitást engedtek be a rendszerbe, ezek nagyjából öt éven belül meg is épültek, és azóta is zavartalanul üzemelnek.

Több befektető azonban nem fért bele a megszabott korlátba, így azt várták, hogy néhány éven belül újabb tenderre számíthatnak, ahová beadhatják a már előkészített projektjeiket. 2010-ben úgy tűnt meg is érkezik a lehetőség, a tendert azonban érvénytelenítették.

Többen jelezték, hogy az évek óta húzódó projekteket (a bennük álló pénz miatt) már támogatás nélkül is hajlandóak lennének megépíteni, a szabályozó hatóságnak azonban nem állt módjában tender nélkül engedélyeket adni, így a beruházók kénytelenek voltak tovább várakozni.

2016-ban újabb fordulatot vett a szabályozás: egy miniszteri rendelet (Nemzetgazdasági Miniszter, 2016) de facto megtiltotta a Magyarország területén történő szélerőmű létesítést, amikor a szabályokat a következőképpen módosította:

„Beépítésre szánt területen és beépítésre szánt terület határától számított 12 000 méteren belül – a háztartási méretű kiserőműnek számító szélerőmű kivételével – szélerőmű, szélerőmű park nem helyezhető el.” (Nemzetgazdasági Miniszter, 2016)

Ezzel az egyetlen módosítással teljes Magyarország területén került megtiltásra a szélerőművek létesítése, ugyanis a 12 km-es védőtávolság olyan szigorú, hogy az ország egyetlen pontja sem felel meg az újonnan előírt kritériumnak (Kotek, 2016). Ahogy látni fogjuk, a magyar aukció várható eredményeire ez a körülmény nagy hatással lehet, hiszen egy – nemzetközi példák alapján kifejezetten versenyképesnek mondható – technológiával kevesebb indul majd a tenderen.

Az aukció résztvevőivel és a finanszírozással kapcsolatban érdemes még egy körülményt kiemelni. Ahogy fent említettem, az aukció bevezetéséről egy 2016-os jogszabály döntött. Ugyanekkor került rögzítésre az is, hogy az akkor életben lévő támogatási rendszer megszűnik (pontosabban átalakul), de az év végéig beadott engedélykérelmek esetén még az aktuális szabályok érvényesek, csak a 2017. január 1. után engedélyért folyamodó erőművek lesznek kötelesek az esetleges támogatás elnyeréséhez aukción elindulni.

Ez a változás valóságos dömpinget indított el: 2016 december végéig csaknem 2000 MW naperőművi kapacításra érkezett be engedélykérelem. Ez, a mihez tartás-véggett – bár termelésben közel sem jelenti ugyanazt -, kapacitásban a Paksi Atomerőműnek felel meg. A szereplők ugyanis attól féltek, hogy az aukciókon jóval alacsonyabb támogatási szintek alakulhatnak ki (ahogy látni fogjuk, nem alaptalanul), illetve a prémium típusú támogatásra való átállás a kötelező átvétellel szemben kockázatosabb, és így nehezebben is finanszírozható.

Sokáig kérdés volt, hogy valóban megépül-e mind a 2 GW kapacitás, de az elmúlt egy-két év során rendkívül nagy mennyiségű napelem került be a rendszerbe, így várhatóan szinte a teljes kapacitás megjelenik majd (bár a két év már eltelt, még nem áll rendelkezésre minden adat a kérdés megválaszolásához). Sok potenciális

befektető tehát már ebben a körben megvalósította a projektjét, ez biztosan csökkentette a résztvevők számát az aukción. Fontos azonban megjegyezni, hogy az elmúlt három év során világszerte még tovább csökkentek a napelemek beruházási költségei, így előfordulhat, hogy sokkal több projektet éri meg most megvalósítani, mint néhány évvel ezelőtt.

A finanszírozást azonban több piaci szereplő (köztük a Bankszövetség és a MEKH) szerint is nehezítheti, hogy a szektorban való kitettség a kötelező átvételre jogosult erőművek gyors felfutásával, és ennek finanszírozásával közel kerülhetett a kritikus szinthez: a bankok nem feltétlenül lesznek ugyanolyan nyitottak a projektek hitelezésére, mint voltak a nagy arányú energiapiacra történő hitelkihelyezések előtt.

További nehézség lehet, hogy a bankok számára a támogatási forma és a szigorúbb menetrendtartási kötelezettség is újdonság, ráadásul kockázatosabb is, mint a korábbi kötelező átvételi rendszer volt. Kérdéses volt tehát, hogy rendelkezésre fog-e állni kellő forrás a bankszektorból, hogy megfelelő számú résztvevővel indulhasson el az első magyar aukció. Ahogy látni fogjuk, úgy tűnik ez végül nem jelentett problémát, sikerült megugrani az akadályokat.

A magyar aukció szabályrendszere és az eddigi aukciók eredményeinek rövid elemzése

A hazai aukció szabályai a legtöbb európai tendertől viszonylag sok ponton különböznek. Az egyik legelső és legfontosabb különbség, hogy a legtöbb jelenleg is futó rendszerrel ellentétben a magyar aukció technológiássemleges.

Ez azt jelenti, hogy a különböző technológiát alkalmazó befektetők egymással versenyeznek: vagyis a naperőművet, biomassza tüzelésű erőművet, geotermikus erőművet megvalósítani kívánó befektetők egyszerre adnak ajánlatot, és a legalacsonyabb támogatást kérő befektetők nyernek, függetlenül attól, hogy mely technológiával szeretnének megújuló energiát termelni.

Ahogy fent láthattuk, a szélenergia nem vesz részt a versenyben. Amennyiben a későbbiekben a 2016-os szabályok eltörlésre, vagy enyhítésre kerülnének, a jelenlegi kiírás alapján már részt vehetnének a szélenergia erőművei is az aukción, jelenleg ennek egyetlen akadálya a 2016-os miniszteri módosítás.

Itt rögtön szeretnék kitérni arra, hogy dolgozatomban miért nem a magyar aukció elemzését választottam központi témámnak. Az aukcióelméleti keretrendszerben történő modellezés során komplex optimalizációs feladatokat kell megoldani. A szimmetrikus aukciók esetén ezek a feladatok jóval kevésbé bonyolultak, mint az aszimmetrikus esetben, a modelleket könnyebb mind felírni, mind megoldani.

A fent említett technológiák igen különbözőek, mind költség szerkezetüket, mind üzemeltetési lehetőségeiket tekintve. Bár mindezt egyetlen számba sűrítjük

az LCOE számítás során (lásd 3. fejezet), de a szereplők közötti különbségek jelentősek maradnak, így az aukciót aszimmetrikus, legalább három különböző típusú szereplőt feltételező módon kellene modellezni, ami rendkívül komplex feladat.

A magyar aukció másik érdekessége, hogy kettős korlát szabja meg a nyertesek számát. Egyrészt a 2016-os rendeletben szereplő módon adott egy maximális költségvetés. A kért támogatások összesítve éves szinten nem haladhatják meg az 1 milliárd Forintot, mely korlát tovább van bontva két méretkategória között: 0,3 MW-nál nagyobb, de 1 MW-nál kisebb névleges teljesítőképességű erőműegységek esetén a kiosztható éves támogatásra vonatkozó korlát 333 millióFt, legalább 1 MW, de legfeljebb 20 MW-os névleges teljesítőképességű erőműegységek esetén pedig 667 millióFt (MEKH, 2019).

Ezen túl a végleges, 2019-es kiírásban már egy támogatott villamosenergiamennyiségre vonatkozó korlát is szerepel: a kisebb méretkategória esetén ez 66 GWh/év, a nagyobb esetén 134 GWh/év (tehát mind a költségvetés, mind a támogatandó energiamennyiség 1/3:2/3 arányban oszlik meg a két méretkategória között, (MEKH, 2019)).

A dupla korlát miatt tehát előfordulhat, hogy kellően kedvező ajánlatok esetén nem a költségvetési korlát lesz effektív, mert a támogatott energiamennyiség már meghaladja a mennyiségi korlátot, így az erre szántnál kevesebb pénzből támogatható a megszabott mennyiségű áram megtermelése. Erre az utólag bevezetett mennyiségi korlátra (a 2016-os jogszabályban még nem szerepelt ez a kitétel, csupán a végleges aukciós kiírásban) a rendszerbiztonság fenntarthatósága miatt volt szükség.

A második, és talán fontosabb oka, hogy nem a magyar aukciókat elemzem ez a fajta dupla korlát, illetve elsősorban az összköltségre vonatkozó korlát megléte. Az aukcióelméleti irodalomban sztenderd módon használt modellek konkrét számú aukciónált termékkel számolnak.

Ahogy később a 4. fejezetben látni fogjuk, a modell logikája, hogy adott egy bizonyos számú termék, melyeket eladni, vagy éppen megvenni szeretne az aukció kiírója. Ehhez ajánlatokat kér be a szereplőktől, majd ezeket sorbarendezi, és a legjobb ajánlatot adóknak adja oda a (teljesen megegyező) termékeket.

A nyereség valószínűsége az alapján számítható egy adott ajánlat esetén, hogy ez az ajánlat várhatóan hanyadik lesz a sorban: ha ez a sorszám kisebb, mint az aukciónált termékek száma, akkor a szereplő az adott ajánlattal nyerni fog, ha nagyobb, akkor nem nyer.

Ha azonban a nyertesek pontos száma nem ismert előre, mert előfordulhat, hogy a költségvetési korlát szabja majd azt meg, a fenti logika nem alkalmazható, a számolást egész másképp kellene felírni és végrehajtani. Ez az aukcióelméleti irodalomban bevett modellek jelentős módosítását igényelné, a szakirodalomban egyelőre nem találok hasonló modell kidolgozásával, így magam sem vállalkoztam erre a nehéz feladatra.

A szabályok bemutatása után pedig röviden összefoglalom az időközben megrendezett két aukció eredményeit. Ehhez Bartek-Lesi et al. (2019b), Kácsor (2020) és Varga (2020a) és Varga (2020b) rövid elemzéseit hívom segítségül.

Ahogy fent említettem, az aukción két méretkategóriában lehetett indulni. Az első aukción a két méretsáv 0,3-1 MW és 1-20 MW volt, míg a második aukción ez valamelyest módosult, a nagyobb kategória felső határa 49,99 MW-ra növekedett. Ezzel párhuzamosan a teljes támogatott mennyiség is csaknem kétszeresére nőtt, 66+134 GWh/év-ről 40+350 GWh/év-re (az első aukciót még pilotként aposztrofálták, a másodikat már nem).

Mindkét aukción alaptalannak bizonyult a félelem a finanszírozás nehézségeivel kapcsolatban – legalábbis ezt látszik alátámasztani a túljelentkezés nagyságrendje. A támogatható éves termeléshez képest 1,5-, illetve 2,5-szeres volt a beadott ajánlatokhoz tartozó termelés mennyiség, vagyis igazi verseny bontakozott ki. A második aukción – bár itt az eredmények egyelőre csak előzetesek – ugyanezen arányszámok nagyjából 4,5 és 5,5-szeresnek adódtak (MEKH, 2020). A jelentkezők túlnyomó többsége naperőművi projekttel indult. Az első aukción összesen egy induló volt, aki egyéb (hulladékhasznosítóból származó gázt hasznosító) erőművel pályázott, a második aukción már két ilyen és egy geotermikus erőmű is elindult. Az összes 153, illetve 272 résztvevő közül azonban elhanyagolható a számuk.

A verseny megmutatkozott a kialakuló árakban is. Míg a korábbi, kötelező átvételi ár közel 100 €/MWh volt, addig az aukción kialakuló súlyozott átlagárak (Ft/kWh-ról 2019 decemberi árfolyamon átváltva) 74,3 és 65,6 €/MWh-nak adódtak a kisebb és nagyobb méretkategóriában az első aukción. A második aukción még nincs végleges eredmény, de a beadott ajánlatokat már közzétették, ezek alapján további jelentős árcsökkenés várható, az ajánlatok ugyanis 25-30%-os csökkenést vetítenek előre.

A magyar aukciók tehát egyelőre sikertörténetnek mondhatóak, bár az erőművek megvalósítási rátáit még nem ismerjük, erről a következő néhány évben tudunk majd biztosat mondani. Az eddigi eredmények azonban biztatóak, és alátámasztják a támogatások aukción történő kiosztásának költséghatékonyságát.

3. fejezet

LCOE számítás

A SZEREPLŐK ÉRTÉKELÉSE az aukciós modellek egyik legfontosabb pontja, ami a támogatásokra vonatkozó aukciók esetén a költségeiknek vagy a támogatási igényüknek feleltethető meg. Egy szimmetrikus aukció esetén minden szereplőnek ugyanabból az eloszlásból származik az értékelése/költsége, ez az eloszlás köztudott tudás, az ajánlatadás pillanatában pedig mindenki csak a saját realizációját ismeri. A következő fejezetben ennek a költségeloszlásnak a meghatározását mutatom be.

Először ismertetem az eredeti LCOE számítás logikáját, illetve a szakirodalomban fellelhető adatok alapján a német PV technológia esetén becslést is készítek. Ezt követően bemutatom az aukciós modellemhez használt módosított LCOE számítást, és annak eredményeit.

Ehhez szükségem lesz a jövőbeli áramárak becslésére, melyet magam végzek el. A fejezet következő részében ezt az előrejelzést ismertetem részletesen. Végül mindezeket felhasználva meghatározom a szereplők költségire vonatkozó eloszlást.

3.1. Fajlagos áramtermelési költség (LCOE) számítás

Az LCOE (Levelised Cost of Electricity) egy villamos energia termelő egység esetén a fajlagos áramtermelés költségét ragadja meg. A teljes élettartamot, és az ez alatt felmerülő minden kiadást figyelembe véve mondja meg az egységnyi megtermelt áramra eső költséget.

Úgy is tekinthetünk rá, mint az az 1 energiaegységre jutó állandó bevétel, ami mellett a projekt bevételeinek és kiadásainak jelenértéke éppen megegyezik: vagyis ekkora energiaegységenkénti (pl. megawattóránkénti) bevételt kell realizálni ahhoz, hogy a beruházás az elvárt hozamot is figyelembe véve éppen megtérüljön.

Egy egyszerű FiT rendszer esetén a termelők tehát legalább akkor (a projekt teljes élettartama alatt) fixen megkapott ár mellett valószínűsítenék meg a beruházást, amekkora a projektjükre vonatkozó LCOE érték. Ha tehát egy FiT rendszerben vizsgálnánk a szereplők ajánlatadási viselkedését, akkor az eredeti keretrendszerben szereplő értékelés éppen az LCOE értéknek felelne meg.

A szakirodalomban rendkívül bevett módszer, hogy az egyes technológiákat ezen mutató mentén hasonlítják össze egymással. Ennek megfelelően viszonylag sok adat áll rendelkezésre mind a tényleges LCOE értékek becslését, mind a számításuk során használt inputok becslését tekintve. A német piacra vonatkozóan ez különösen igaz, hiszen az elmúlt évek során a szabályozás elkötelezett módon igyekezett minél nagyobb mennyiségű megújuló erőmű létesítését elősegíteni, és – ahogy ezt a bevezetőben is láthattuk – ezt sikerrel is tette.

A német példa világszerte ismert és elismert, ezért a megújuló energiaköltségekkel foglalkozó tanulmányok a legtöbb esetben külön foglalkoznak vele, illetve a nagyszámú projekt megvalósítása miatt tényadatok is rendelkezésre állnak. A magyar piac esetén már sokkal kevésbé érhetőek el országspecifikus adatok, így ott az LCOE becslés is bizonytalanabb és nehezebb, ez egy újabb indok volt a német piac vizsgálata mellett.

Az LCOE számítás levezetését nem az induló definíció segítségével végzem el, vagyis nem egyszerűen az egy energiaegységre jutó költséget írom fel, hanem azt az energiaegységenkénti állandó bevételt keresem meg, ami mellett a költségek és bevételek nettó jelenértéke a projekt egész élettartamát tekintve éppen egyenlő lesz. A számítások során minden költséget és bevételt reálértéken veszek figyelembe, 2019-es euróban számolok.

Ehhez tehát első lépésként fel kell írni ezt a két jelenértéket, majd ebből kifejezhető az LCOE érték. A számítás során a következő tételeket szokás figyelembe venni:

- I : Beruházási költség (a nemzetközi szakirodalomban capital cost, vagyis CAPEX)
- M_t : Üzemeltetési és karbantartási költségek (éves szinten) – a nemzetközi szakirodalomban operation and maintenance cost (O&M) vagy operational expenditures (OPEX)
- E_t : Megtermelt (és hálózatba táplált) villamos energia mennyisége (éves szinten)
- r : Elvárt megtérülés – a számításaimban a súlyozott átlagos tőkekölség (a nemzetközi szakirodalomban Weighted Average Cost of Capital – WACC) felel meg az elvárt hozamnak, amennyiben mindent reálértéken veszünk figyelembe
- n : Projekt élettartam

Szokás még figyelembe venni az éves tüzelőanyag költséget, ami sok erőműnél igen jelentős (pl. fosszilis vagy biomassza tüzelés esetén). A naperőművek esetén azonban ez a költség 0, így nem kerül bele a számításba.

A számítás tehát a következőképpen történik:

$$\sum income = \sum_{t=1}^n \frac{E_t LCOE}{(1+r)^t}$$

A megtermelt energia mennyiségének és az energiaegységenkénti bevételnek a szorzatát minden időszakban kiszámítjuk, és ezen összegek nettó jelenértékeként kapjuk meg a bevételi oldalt.

$$\sum cost = I(1+r)^0 + \sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1+r)^t}$$

A kiadások az időszak első pillanatában felmerülő ¹ beruházási költségből, és a későbbi időszakok folyamán fellépő üzemeltetési és karbantartási költségekből állnak össze.

$$\sum income = \sum cost$$

$$LCOE \sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t} = I(1+r)^0 + \sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1+r)^t}$$

$$LCOE = \frac{I + \sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

A jelölések a fentieket követik: n az élettartamot, E_t a t . évben megtermelt áram mennyiségét, r a feltételezett (reál) WACC-ot (vagyis az elvárt hozamot) I a beruházási költséget, M_t a t . évben fellépő működési költségeket jelöli.

A számítás ezen változata a költségelemekkel kapcsolatban a következő implicit feltételezéseket tartalmazza:

- A beruházást a 0. időpillanatban fizeti ki a szereplő, egy összegben
- Minden további költség (és bevétel) az adott időszak elején merül fel (szintén egy összegben)

A következőkben röviden összefoglalom a legfontosabb forrásokat, melyekre a saját LCOE számításom elkészítésekor támaszkodom. A szakirodalomban jellemző, hogy a szerzők nagy kutatóintézetek és nemzetközi szervezetek által rendszeresen közzétett riportok, és más cikkekben szereplő adatok alapján készítene saját számolást (pl. Shrimali et al, 2016; Welisch, 2019), de előfordul az is, hogy a saját modelljükben már csak felhasználják ezeket az adatokat (pl. Viana & Ramos, 2018; Mezősi et al., 2018).

¹szokásos feltételezés, hogy a beruházási költségeket nem a valósághoz közelebb áll módon időben elosztva, hanem a projekt legelején, egyösszegben vesszük figyelembe, ez az úgynevezett "overnight investment cost".

A német Fraunhofer Institute 2010 óta folyamatosan készít elemzéseket a megújuló energia költségeihez kapcsolódóan. Egyik legfrissebb, 2018-as anyaguk (Fraunhofer, 2018) a német piacra vonatkozóan mutat be becsléseket. Három PV méret esetén is számít LCOE értékeket (kisebb és nagyobb tetőre szerelhető, illetve még nagyobb földön álló termelő egységek), ezentúl szárazföldi és partmenti szélerőművek, biogáz, illetve fosszilis erőművek esetén is elvégzik a költségbecslést.

A számításhoz részletesen közléteszik az összes bemeneti paramétert és egyéb feltételezést is. A következő tételekre találhatunk információt az anyagban, technológiánként: beruházási költség (CAPEX), üzemeltetési költség (OPEX), élettartam, hatékonyságromlás, és minden részlet a WACC (weighted average cost of capital, vagyis súlyozott tőkeköltség) kiszámításához (saját tőke és idegen tőke aránya, előbbin elvárt hozam és utóbbi esetén a hitel kamatszintje).

Szintén a német piacra fókuszál egy 2015-ös Fraunhofer anyag (Fraunhofer, 2015). A fentivel ellentétben itt kizárólag a PV rendszerek költségeit elemzik, és a fókusz a 2014-es tény értékek bemutatása mellett egy hosszútávú, 2050-re vonatkozó előrejelzés elkészítésén van a költségek alakulását illetően. A beruházási és üzemeltetési költségek, valamint a kamatláb mellett itt az inverterek élettartam közepe táján esedékes cseréjéről, és az ehhez kapcsolódó költségekről is szó esik.

Lazard (2017) az amerikai piacot vizsgálja, 5 különböző PV technológia mellett többek között geotermális erőműveket és üzemanyagcellás megoldásokat is vizsgál, illetve összeveti ezek múltbeli költségeit a konvencionális áramtermelőkével. A költségekre vonatkozóan megvizsgálják a különböző támogatások, a kamatlábak és a tüzelőanyagár- változások hatását is, és külön kitérnek az egyes egységek széndioxid-kibocsátására is.

Szintén fontos forrás a Nemzetközi Energia Ügynökség (International Energy Agency – IEA) két friss anyaga (IEA, 2018 és IEA, 2017). Előbbiben országokra lebontva kaphatunk képet az elmúlt évek legfontosabb fejleményeiről a napenergia kapcsán. A szerzők több Európán kívüli ország esetén is (pl. Argentína, India, Chile, Szenegál, Brazília) elvégzik a költségbecslést.

Utóbbiban pedig részletesen elemzik a korábbi aukciókon kialakuló árakat több különböző technológia esetén, és előrejelzést is készítenek 2022-ig bezárólag. A napenergia esetén két méretkategóriát különböztetnek meg (háztartási és nem háztartási).

Az IEA korábbi anyagaiban (pl.: IEA, 2015) szintén fontos adatok vannak összegyűjtve a különböző megújuló technológiák jelen és jövőben várható költségeit tekintve. Az országos szintre lebontott adatok között három különböző méretkategóriát találunk a német napenergia termelőknél, és az LCOE értékek különböző kamatszintek (WACC feltételezések) mellett kerülnek kiszámításra.

Végül megkerülhetetlen forrás az IRENA több kiadványa is (IRENA, 2016 és IRENA, 2018). Előbbi annak fontosságát hangsúlyozza, hogy a növekvő verseny-

	Fraunhofer, 2018	Fraunhofer, 2015	Lazard, 2017	IEA, 2017	Irena, 2018	Saját becs- lés, 2020
Melyik évre vonat- kozik?	2018	2014	2017	2022	2017	2020
CAPEX (10 ³ €/MW)	700 (600–800)	823 (818–830)	2232 (1730– 2790)	804	955 (892– 2679)	800
OPEX (€/év)	17500 (15000– 20000)	15000	12500 (10714– 14286)		20000	15000
WACC	4.10%	7%	7.70% (5.40%– 9.20%)		7.50% (reál)	4.10% (reál)
Élettartam	25	25	30		25	25

3.1. táblázat. LCOE számításhoz kapcsolódó inputok a szakirodalomban és a saját számítás esetén, zárójelben a becsült sáv minimum és maximum értékei, forrás: Fraunhofer, 2018; Fraunhofer, 2015; Lazard, 2017; IEA, 2017; Irena, 2018

helyzet és a megfelelő ösztönzők tovább növelhetik az innovációt a megújuló energia szektorban, ami folyamatos költségcsökkentést eredményezhet a jövőben.

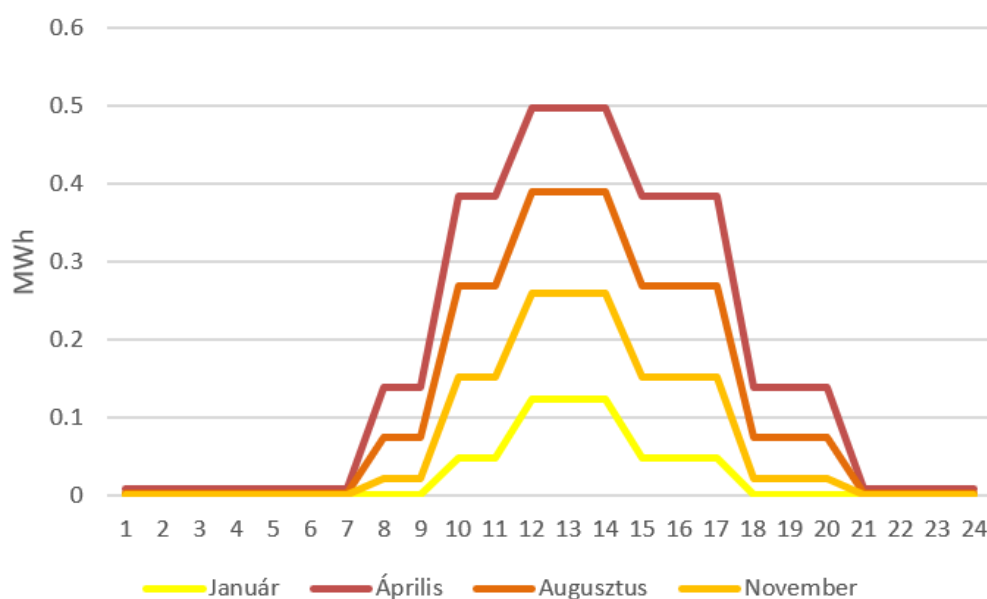
Utóbbiban az országokra és technológiákra lebontott költségadatokat nemcsak riport formájában, de táblázatos adatként (Excel formátumban) is közre adták. Az adatok segítségével 2009-től 2017-ig negyedéves bontásban láthatjuk több ország esetén is a beruházási költségek és az LCOE értékek alakulását a különböző országokban, és rengeteg világszintű összesítő adatot is találunk.

A 3.1. táblázat a fent bemutatott forrásokban szereplő adatokat, és az utolsó oszlopban a saját számításomban figyelembe vett értékeket foglalja össze.

A riportok nagy részében külön méretkategóriákra bontva szerepeltek értékek. Jellemzően lakossági és e fölötti bontást találunk (angolul tipikusan: „residential” vagy „rooftop”, illetve „utility scale” megnevezéssel). Mivel az aukció potenciális résztvevőinek költségeit igyekszem számszerűsíteni, ezért a „utility scale” méretkategória számait gyűjtöttem össze.

Ahogy látható az egyes források között elég jelentős eltéréseket találunk. Lazard elemzése a beruházási költségek tekintetében erősen kilóg, ennek oka lehet, hogy az ő számaik nem speciálisan a német piacra vonatkoznak, míg a többi anyagban kifejezetten külön a német piacra meghatározott értékeket találtam.

Fontos megjegyezni, hogy a termelő egység élettartama nem feltétlenül egyezik meg az elvárt megtérülési idővel. Utóbbi jellemzően valamivel rövidebb időszak



3.1. ábra. Feltételezett termelési profilok az év különböző időszakaiban, forrás: EEMM adatok

szokott lenni (pl. Welisch, 2019 szerint 20 év). Ez különösen akkor igaz, ha a számítást a szükséges támogatási szint meghatározásának céljával végezzük el, hiszen a támogatási időszak is általában rövidebb az élettartamnál, és a befektetők sok esetben úgy kalkulálnak, hogy a támogatás lejártakor legyenek a pénzüknél (hiszen a 20-25. évre vonatkozóan már különösen nagy a bizonytalanság).

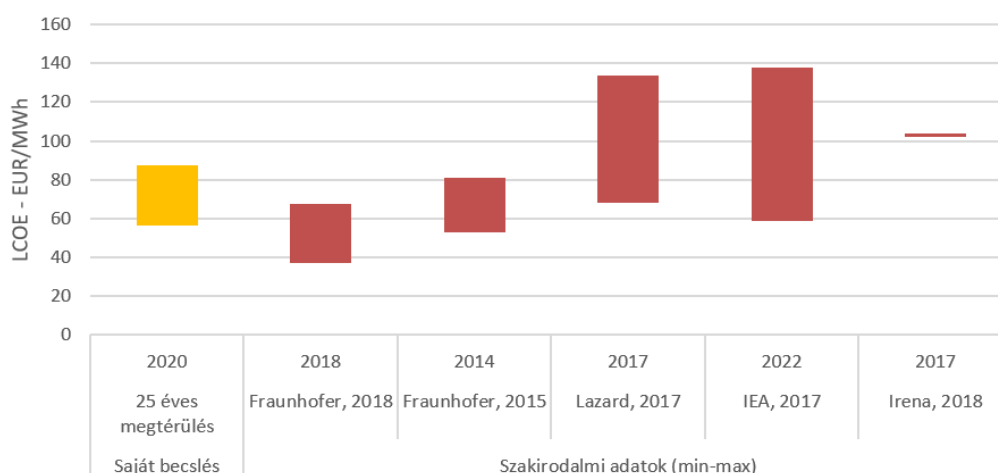
A számítások szempontjából egy további lényeges tényező a napelemek által termelt áram mennyiségének meghatározása. Ehhez a REKK² (későbbiekben részletesen is bemutatott) árampiaci modelljét (European Electricity Market Model – EEMM) hívom segítségül (Mezősi & Szabó, 2016).

A modellben minden ország esetén a korábbi évek historikus termelési adatai alapján (melyek az ENTSO-E transparency platform felületéről lettek összegyűjtve) került meghatározásra egy termelési profil. A modell a PV termelés szempontjából 24 órátípust különböztet meg, a napon belüli és az éven belüli különbségeket is figyelembe véve. A feltételezett termelési profilokat a 3.1. ábrán mutatom be.

A számításhoz természetesen elvégezhető lenne a profil becslése általam is, a legújabb rendelkezésre álló adatok alapján. Ebben az esetben azonban más termelési értékek kerülnének az egyes órák esetén az LCOE számításba, mint az árampiaci modellbe, ami a módosított LCOE számításhoz az áradatokat szolgáltatja majd (lásd lent).

Ennek oka, hogy az EEMM modellben napon belül csak 4 órátípus különböztethető meg (ettől válnak a profilok lépcsőssé), így a lentieknél pontosabb görbék nem

²Regionális Energiagazdasági Kutatóközpont



3.2. ábra. Saját LCOE becslés a szakirodalom tükrében, forrás: Fraunhofer, 2018; Fraunhofer, 2015; Lazard, 2017; IEA, 2017; Irena, 2018; EEMM adatok

illeszthetőek be. Ezért döntöttem úgy, hogy az EEMM modellben szereplő görbéket használom a költségbecslésem esetén is, ugyanis így az áramárakra vonatkozó becslések és az LCOE számítás konzisztens marad.

Mindezeket figyelembe véve a saját számításom szerint a 3.2. ábrán szemléltetett értékek adódtak.

Látható, hogy a különböző források is igen nagy eltéréseket mutatnak, illetve sok esetben igen széles sávban szóródnak a becsült értékek. Az általam a felső táblázatban bemutatott inputokkal kalkulált érték 70 €/MWh-nak adódott, ceteris paribus magasabb WACC (7%) esetén ez a szám 88 €/MWh, alacsonyabb beruházási költség mellett (600 000 €/MW) pedig 56 €/MWh.

25 év helyett 20 éves megtérülési időt feltételezve (szintén ceteris paribus) 78 €/MWh-os LCOE értéket kaptam. A számok a szakirodalom által becsült sávokba esnek, a nemzetközi fókuszú tanulmányok alsóbb, míg a német Fraunhofer által készített becslések felsőbb értékeihez állnak közel.

3.2. Módosított LCOE számítás

Az általam vizsgált aukciós modellben a fenti logika szerint számolt LCOE érték nem értelmezhető egy az egyben úgy, mint a szereplők költsége (vagy maradvá az eredeti terminológiánál: értékelése). Ennek oka egyrészt, hogy a támogatás itt nem egy minden egyes megtermelt egység áram után járó fix összeg, csak az értékesített áram piaci árát kiegészítő prémium. Másrészt a támogatási időszak és a projekt élettartama sem egyezik meg.

A modellemben (a német rendszernek megfelelően) 20 éves támogatási időszakot feltételezek, ahogy azt fent láttuk az élettartam azonban ennél valamivel

hosszabb, inkább 25 év. Így a módosítás első lépéseként figyelembe kell venni a számítás során, hogy az aukción elnyerhető támogatás csak az első 20 évre érvényes, utána azonban további (bár már csak piaci alapú) bevételei lesznek a szereplőknek.

A német rendszerben lebegő prémium típusú támogatási jogosultságot kaphatnak a beruházók (sliding premium). Ez – ahogy fent bemutattam – azt jelenti, hogy az állam arra vállal kötelezettséget, hogy a támogatásra jogosult termelők által értékesített villamos energia minden eladott egységének árát a tenderen megállapított támogatási szintre egészíti ki.

Ez a kiegészítés maga a lebegő prémium – vagyis az állam által kifizetett támogatási összeg az, ami „lebeg”. Ez a korábbi, FiT rendszerre hasonlít leginkább, hiszen a beruházók biztosak lehetnek benne, hogy a támogatási szintnek megfelelő bevételek minden egység áram után meglesz. Az értékesítést maguknak kell ugyan megoldaniuk, de a bevételekhez kapcsolódó kockázat nagyrészt az állam átvállalja tőlük.³

A második fontos tényező, ami mentén módosítani kell az LCOE számítást a támogatási időszak alatt esetlegesen felmerülő támogatási szintet meghaladó bevétel. Azokban az órákban, amikor a piaci árak meghaladják a támogatási szintet, az állam természetesen nem fizet támogatást, a szereplőknek azonban (néhány egyéb ország, például az Egyesült Királyság rendszereivel ellentétben) visszafizetniük sem kell az államnak a bevételeik egy részét. Itt tehát egyszerűen megawattóránként magasabb bevételt realizálnak, mint a megállapított támogatási szint.

Az elszámolás minden hónap végén történik. Kiszámításra kerül a havi átlagár: a valós, országos PV termeléssel súlyozott másnapi piacon kialakuló árak átlagaként. Ez az a referenciaár, amit kiegészítenek az aukción kialakuló támogatott árszintre. A teljes támogatás ennek az árkülönbözetnek az adott termelő által megtermelt mennyiséggel vett szorzata minden hónap végén.

Vagyis a termelőkkel nem minden egyes óra esetén számolnak el, csak a hónap végén. Az átlag alatti árral rendelkező órákra vonatkozóan így némileg kevesebb támogatást kapnak, az átlagár feletti órákra viszont valamivel többet, mintha minden egyes óra esetén történne az elszámolás.

Ez a valóságban ösztönözheti a termelőket arra, hogy a profiljukat az országos átlaghoz képest eltérően alakítsák (Klobasa, M. & Ragwitz, M., 2018). Modellemben azonban eltekintek ettől, minden termelőre egy egységes profilt feltételezek. A két számítási mód alapján (havi átlagár vagy minden óra esetén külön) kalkulált bevételek között így csupán néhány százalékos eltérés van: a havi elszámolási időszak nem befolyásolja érdemben a megkapott támogatási összeget az órás elszámoláshoz képest.

³A saját modellemben a kockázat egészét. Ennek oka, hogy a fennmaradó kockázat, ahogy a 21. oldalon szó volt róla abból fakad, hogy a szereplők egyéni termelési profilja eltérhet az országos átlagtól, és utóbbi alapján számolódik a prémium. Nálam azonban minden szereplő termelési profilja pontosan megegyezik az országos átlaggal.

A fentiek alapján tehát felírható, hogy mi az a lebegő prémiumhoz kapcsolódó támogatási szint, aminek elnyerésekor a beruházás az elvart hozam mellett éppen megtérül. Ezt az értéket fogom módosított *LCOE* értéknek nevezni, jelölje *LCOE'*.

A havi bevételeket éves szintre aggregálom a számítás során, és ezt az éves összesent „diszkontálom”, az elvart hozamat (vagyis a WACC értéket) figyelembe véve. A módosított számítás a következőképpen írható le:

$$\sum_{t=1}^N \frac{\sum_{m=1}^{12} \left(LCOE' + (p_{t,m} - LCOE')^+ \right) E_{tm}}{(1+r)^t} + \sum_{t=N+1}^n \frac{\sum_{m=1}^{12} p_{tm} E_{tm}}{(1+r)^t} = I + \sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1+r)^t},$$

ahol $n=25$ év az élettartam, $N=20$ év a támogatási időszak, p_{tm} a t . év m . hónapjának referenciaára, E_{tm} a t . év m . hónapjában termelt összes áram mennyisége, *LCOE'* pedig az a támogatott árszint, ami mellett a projekt éppen megtérül (r WACC értéket feltételezve).⁴

Az egyenlet bal oldalán látható kifejezés tehát a következőket jelenti: egy olyan hónapban, mikor az *LCOE'* érték magasabb, mint a PV termeléssel súlyozott havi átlagár ($p_{t,m}$), akkor az egy egységnyi megtermelt energia utáni bevétel éppen *LCOE'*. Ha viszont az ár a magasabb az *LCOE'*-hez képest, akkor a megtermelt energiaegységenkénti bevétel éppen $p_{t,m}$. Ezt egyszerűen az

$$\left(LCOE' + (p_{t,m} - LCOE')^+ \right)$$

kifejezés írja le.

A fenti képlet alapján az *LCOE'* érték többféleképpen is meghatározható. Az egyik lehetőség az, hogy az eredeti LCOE számításhoz hasonlóan egyszerűen kifejezem az *LCOE'* értéket, vagyis úgy rendezem az egyenletet, hogy az egyik oldalon csak az *LCOE'* érték maradjon. Ez megtehető, viszont, ha tekintjük a baloldalt mint az *LCOE'* szám függvényét, akkor az inverz függvény explicit alakja függ a $p_{t,m}$ – modellemben előre magadott számok – nagyságszerinti sorrendjétől.⁵ Mivel fontosnak tartom, hogy a dolgozat számításai és használt módszerei ne függjenek a konkrét paraméterek konkrét specialitásaitól, ezért nem ezt az utat választom.

A másik lehetőség, hogy optimalizáció segítségével találom rá a fenti egyenletet kielégítő *LCOE'* értékre. A két megközelítés természetesen teljesen azonos eredményre vezet. Az optimalizáció alkalmazása esetén azonban kellő körültekintés nélkül előfordulhatna, hogy ha több megoldás is van, csak egyet találom meg, hiszen a program csak azt jelzi, hogy egy adott *LCOE'* érték kielégíti az egyenletet, azt nem, hogy ez az egyetlen ilyen érték-e.

⁴A felső indexben szereplő + jel a zárójelek közti szám pozitív részét jelenti.

⁵Lásd az 50. oldalon a (†) formulát.

Ezért ebben az esetben meg kell vizsgálnom, hogy az optimalizációval kapott értékről kijelenthető-e, hogy adott feltételezések mellett az egyetlen érték, mely kielégíti az egyenletet. Vagyis be kell látnom, hogy a megoldás – ha létezik – egyértelmű. Az $LCOE'$ értéket nem tartalmazó tagokat egy oldalra rendezve a következőképpen alakítható a fenti kifejezés:

$$\sum_{t=1}^N \frac{\sum_{m=1}^{12} \left(LCOE' + (p_{t,m} - LCOE')^+ \right) E_{tm}}{(1+r)^t} = I + \sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=N+1}^n \frac{\sum_{m=1}^{12} p_{tm} E_{tm}}{(1+r)^t}.$$

Az egyértelműséghez elég látni, hogy a bal oldali kifejezés, mint $LCOE'$ függvénye szigorúan monoton változik. Ehhez tekintsük minden egyes t, m mellett az

$$x \mapsto x + (p_{t,m} - x)^+$$

függvényt. Mivel

$$x + (p_{t,m} - x)^+ = \begin{cases} p_{t,m} & , \text{ha } x \leq p_{t,m} \\ x & , \text{ha } x > p_{t,m}, \end{cases}$$

ezért minden ilyen függvény monoton nő. Az egyenletünk baloldala ilyen függvények pozitív együtthatókkal képzett lineáris kombinációja, emiatt nyilvánvalóan monoton növekvő.

Jelölje c a szóban forgó időszak havi átlagárainak minimumát, azaz $c = \min \{p_{t,m} : t = 1, \dots, N, m = 1, \dots, 12\}$. Vegyük észre, hogy egy konkrét t -re és m -re a $(p_{t,m}, +\infty)$ intervallumon az $x + (p_{t,m} - x)^+$ függvény szigorúan monoton nő. Monoton növekvő függvények összege szigorúan monoton növekvő, ha tudjuk, hogy az egyik összeadandó függvény szigorúan monoton nő. Így tehát a baloldalt képező

$$x \mapsto \sum_{t=1}^N \frac{\sum_{m=1}^{12} (x + (p_{t,m} - x)^+) E_{tm}}{(1+r)^t} \quad (\dagger)$$

függvény is szigorúan monoton növekszik a (c, ∞) intervallum felett.

A $(0, c)$ intervallumokon persze konstans a bal oldali kifejezés, és értéke

$$\sum_{t=1}^N \frac{\sum_{m=1}^{12} p_{t,m} E_{tm}}{(1+r)^t},$$

ami éppen a támogatott periódusra eső bevételek jelenértéke abban az esetben, ha a havi átlagos PV termeléssel súlyozott árak minden hónapban magasabbak az $LCOE'$ értéknél. Ez tehát az a bevétel, amit támogatás nélkül lehet a projekt megvalósításával realizálni ez alatt az időszak alatt. Ha a jobb oldal ennél kisebb, a feladatnak

nincs megoldása. Ez azt jelenti ugyanis, hogy pusztán a piaci bevételekre alapozva is érdemes megépíteni a projektet, mert annak megtérülése meg fogja haladni a kívánt WACC értéket. Tehát nem tudok olyan $LCOE'$ értéket megadni, aminek esetén a bevételek nettó jelenértéke megegyezne a kiadások nettó jelenértékével, előbbi minden $LCOE'$ esetén nagyobb lesz.

Ha a jobb oldal éppen egyenlő a fent felírt értékkel, akkor bármilyen -0 és c közötti, hiszen továbbra is a $(0, c)$ intervallumon vizsgálódunk – $LCOE'$ megoldás lesz. Ebben az esetben ugyanis (vagyis, ha az árak minden hónapban magasabbak mint az $LCOE'$ érték), minden egyes hónapban a bevétel a referenciaár és a termelés szorzata lesz, azaz a bevétel független az $LCOE'$ értékétől. Ugyanez igaz az előző esetben is, itt azonban az egyenlőség miatt teljesül, hogy a költségek és bevételek nettó jelenértéke az elvart hozam alapján számolva megegyezik, tehát tetszőlegesen megválasztott $LCOE'$ érték megoldás lesz.

Minden olyan esetben, amikor a jobb oldal nagyobb, mint a fenti kifejezés egyetlen egy $LCOE'$ szám elégíti ki az egyenletünket, hiszen ekkor a bal oldalon egy szigorúan monoton növekvő függvényünk van. Ez az az eset, amikor legalább egy olyan hónap lesz, ahol a bevételek nemcsak a piaci áraktól, de a támogatási szinttől (vagyis az $LCOE'$ értéktől) is függenek, ezért megtalálható az az érték, ami mellett a költségek és bevételek nettó jelenértéke éppen megegyezik. Ebben az esetben tehát az $LCOE'$ érték egyértelmű.

A fentiek alapján már kijelenthető, hogy megnyugtató módon használható az optimalizáció: ha szükség van támogatásra, akkor csak egyetlen olyan $LCOE'$ érték létezik, ami mellett a bevételek és kiadások nettó jelenértéke megegyezik.

Az optimalizációhoz a később az aukcióelméleti modellezéshez is használt R szoftvert hívtam segítségül. Az „optimize” beépített parancsot használok, mely egyváltozós optimalizációt végez.⁶ A feladat felírásakor a fenti egyenlet bal oldala és jobb oldala különbségének abszolútértékét minimalizálom. Amennyiben ez a minimum nem tud egy előre meghatározott küszöbszám alá menni (esetemben ez 10 €/MWh), akkor azon az ágon vagyunk, ahol nincs szükség támogatásra ahhoz, hogy a projekt megtérüljön, így ezekben az esetekben az $LCOE'$ érték 0.

Ahogy említettem, az ily módon számított $LCOE'$ ezen a ponton még nem illeszkedik az aukciós modellezési keretrendszerbe, hiszen itt a módosítások figyelembevételével együtt is fix inputok mellett kapunk egy fix $LCOE'$ értéket. Ahhoz, hogy a modellezési keretrendszerbe beilleszthető legyen ez az érték egy eloszlást kell meghatározni rá. Ezt a modellemben a beruházási költségek eloszlásából számítom ki.

További lehetőség lenne, hogy a bizonytalanságot a termeléshez és az árakhoz, esetleg a kamatlábhöz kapcsolódóan is figyelembe veszem. Ez azonban egyrészt

⁶Részletesebb információért lásd: <https://www.rdocumentation.org/packages/stats/versions/3.6.1/topics/optimize>

rendkívül bonyolulttá tenné a számításokat és a modellt, másrészt (ahogy a 47. oldalon már utaltam rá) az EEMM modellel való konzisztencia is fontos szempont, ott pedig nincs sztochasztikusság ezen elemek esetén sem. Ezért ettől a továbbiakban eltekintek.

A modellemben tehát minden beruházó egy adott termelési profil feltételezésével él, magára és másokra vonatkozóan is, ami nemcsak a szereplők, de az évek között is változatlan. Ez ugyan jelentős egyszerűsítés, de összességében, átlagosan nem visz komoly torzítást a rendszerbe. A valószínűségi megközelítés így csak a beruházási költségre korlátozódik. A következőkben ezt mutatom be.

Beruházási költségek

A játékelméleti modellben a szereplők többi játékosra vonatkozó ismereteiben meglévő bizonytalanságot az jelenti majd, hogy a többiek beruházási költségeire vonatkozóan mindenki csak egy eloszlást ismer. Ennek az eloszlásnak a segítségével már meghatározható az $LCOE'$ érték eloszlása is, tehát a szereplők tulajdonképpen a többiek értékelésére (ami jelen aukciós helyzetben a költségeiknek felel meg) vonatkozóan ismerik az eloszlást.

A beruházási költségekre vonatkozóan a szakirodalmi adatok alapján határozom meg az eloszlást. A centrális határeloszlás tétel alapján elmondható, hogy ha egy valószínűségi változó kellően sok, egymástól független valószínűségi változó összegeként áll elő, akkor normális eloszlású. A beruházási költségre gondolhatunk úgy, mint sok kis elemből összeálló összeg. Ilyen elemek lehetnek magának a napelemnek a költsége, a beruházáshoz szükséges telephely vásárlásának költsége, a telepítési költségek vagy a szállításhoz kapcsolódó költségek. Ezekre mind tekinthetünk úgy, mint független valószínűségi változók. Ez alapján a gondolatmenet alapján a beruházási költségekre vonatkozóan normális eloszlás feltételezéssel élek.

A szereplők értékelései függetlenségének feltevése a szakirodalomban is bevett, természetes megközelítés. Bár a valóságban ez nem teljesen kikezhdetetlen, hiszen például a panelek költsége jelentős részét teszi ki a beruházásnak, és ezen költségelem alakulása valószínűleg nem független a különböző projektek esetén, azonban az általam is használt aukcióelméleti modellezési keretrendszerben akkor tudunk a szereplők viselkedésére vonatkozóan bármit is mondani, illetve számolni, ha feltesszük a függetlenséget. Így az esetleges összefüggéstől az egyes projektek költségei között a továbbiakban eltekintek.

A két paraméter (várhatóérték és szórás) meghatározását két különböző módon végzem el. A várható értékre a szakirodalmi adatok alapján készített szakértői becslést használom, a számításoknál már bemutatott (lásd: a 45. oldal) 800 000 €/MW-os értéket. Ennek alapján fogom a szórást meghatározni, a normális eloszlás egy speciális tulajdonságából, az úgynevezett 3σ szabályból kiindulva. A normális

eloszlású valószínűségi változók esetén annak valószínűsége, hogy egy konkrét realizáció a várható értékhez képest egyszeres szórás távolságon belül található 68,3%.

$$P(\mu - \sigma < x < \mu + \sigma) = 0,683$$

Ugyanez a szám kétszeres szóráson belül már 95% felé kerül. Háromszoros szórás távolság esetén pedig már meghaladja a 99,7%-ot.

$$P(\mu - 2\sigma < x < \mu + 2\sigma) = 0,9645$$

$$P(\mu - 3\sigma < x < \mu + 3\sigma) = 0,9973$$

Ezt az összefüggést felhasználva megvizsgálom a szakirodalomban szereplő beruházási költség értékeket, és kiszámolom az általam meghatározott várható értékhez képesti távolságukat. A fent bemutatott munkák közül (Lazard, 2017) számai erősen kilógnak a többiek által meghatározott sávból, ezért ezeket az értékeket nem veszem figyelembe.

A legtöbb irodalomban, ahogy fent is bemutattam, sávokat találunk a beruházási költség értékekre vonatkozóan. Ezek közül (IRENA, 2018) felső értékei szintén nagyon kilógnak a többiekhez képest, ezért ott csak az alsó értéket vizsgálom. A várható értékhez képesti távolságok így a következőképpen adódnak:

(Fraunhofer, 2018) esetén -200 és 0 (átlagra: -100);

(Fraunhofer, 2015) esetén +18 és +30 (átlagra: +23);

(IEA, 2017) esetén +4, valamint

(IRENA, 2018) esetén +92 a legkisebb értékre, és +155 az átlagra.

Mindezek alapján tehát elmondható, hogy a vizsgált szakirodalomban szereplő értékek (a felfelé nagyon kilógó értékektől eltekintve) az átlaghoz képest (-200; +155) távolságba esnek. A felfelé kilógó értékekre, mint kis valószínűségű eseményekre tekintve ezt az intervallumot 2 szórásnak tekintem, így kb 3,5% esélyt adok a sávból való kilógásnak.

Ezek alapján tehát a beruházási költségekre vonatkozó eloszlásom:

$$I \approx N(800, 100).$$

Áramárak előrejelzése

A fenti kalkuláció elvégzéséhez szükség van a beruházást követő 25 év során várható áramárak becslésére. Az áramárak előrejelzésére rengeteg különböző módszer létezik. Az egyik nagy csoportba tartoznak az ökonometriai, idősoros előrejelzések, melyek kizárólag az áramárak korábbi „viselkedése” alapján következtetnek a jövőbeli áralakulásra.

Tipikusan használt eszközök az ARIMA (Conejo et al., 2005 a spanyol piac esetén, Jakaša et al., 2011 és Cuaresma et al., 2004 a német árakra vonatkozóan készít

ilyen előrejelzést), illetve a GARCH modellek (pl.: Garcia et al., 2005), bár manapság egyre ritkábbak a kizárólag ezeken a modelleken alapuló előrejelzések. Egy újabb irány a neurális hálók használata (pl.: Keles et al., 2016; Itaba & Mori, 2017; Mori & Nakano, 2016 vagy Singh et al., 2017), illetve a különböző előrejelző technikák ötvözése (pl.: Kumar et al., 2018 vagy Zhao et al., 2017).

A fentiektől merőben eltérő módszer az áramárak fundamentális alapokon történő előrejelzése: ebben az esetben az előrejelzés a különböző tényezőárak (pl. a földgáz ára, a szén ára vagy épp a széndioxid-kvóta ára) illetve a keresleti és kínálati viszonyok jövőbeli alakulása alapján készül el (pl.: Angelus, 2001). Egyes modellek a makrogazdasággal is összekapcsolt módon elemzik az energiapiacokat (pl.: Európai Bizottság, 2016). Az ilyen előrejelzéseket sok esetben olyan modellekkel készítik el, melyek a nemzetközi kereskedelmet is figyelembe veszik, hiszen az európai árampiac rendkívül összekapcsolt, így a környező országok piacainak történései nem elhanyagolható tényezők.

A modell bemutatását a modellezés logikáján, az egyes bemeneti és kimeneti adatok ismertetésén túl kiegészíttem a német piacra vonatkozó feltételezések és eredmények bemutatásával is, hogy az olvasó teljes képet kaphasson az elemzés ezen részéről is. Ahogy fent már említettem a modell nem az én munkám, bár a folyamatos fejlesztésében és karbantartásában (pl. adatok és feltételezések naprakészen tartása, esetenként új technológiák beépítése) magam is rendszeresen részt veszek. A dolgozat elkészítéséhez azonban önálló modellfuttatásokat végeztem, ahol az eredményekből tovább számolva az áradatokat olyan formára hoztam, ami már használható volt a módosított LCOE számításhoz is. A részleteket a kapcsolódó részeknél, illetve a bemutatás végén ismertetem.

Az EEMM modell a teljes európai árampiacot lefedi, 38 ország szerepel benne endogén módon, és bizonyos országok esetén (pl. Ukrajna, Dánia, illetve Bosznia és Hercegovina) két különálló piac került beépítésre a modellbe (a valóságnak megfelelően). A modellezett országokon túl a környező, „külső” országok (Oroszország, Fehéroroszország, Marokkó és Tunézia) árai exogén adottak, így a velük való kereskedelem szintén lehetséges a modellben.

A modell logikája röviden a következő: minden ország esetén adott egy kereslet (pontosabban egy keresleti függvény nagyon kis rugalmassággal), illetve a hazai erőművekből álló kínálat, mely a szokásos, merit-order típusú kínálati függvényként épül fel a modellben. A modell egyszerre egy órát szimulál, és hosszabb időszak modellezésekor sincs a különböző vizsgált órák között kapcsolat. Az árak a kereslet és a kínálat egyensúlyából alakulnak ki, a kereslet kielégítésére azonban nemcsak az ország saját erőművei használhatóak, de határkeresztező kereskedelem is lehetséges, az ország és szomszédai között rendelkezésre álló határkeresztező vezetékek kapacitásainak erejéig.

Fontos megjegyezni, hogy a modellben egy ország egy csomópontnak számít (kivéve a három fenti ország esetén), vagyis az országon belüli szűkületeket a mo-

de nem vesszük figyelembe. A határkeresztező kapacitásokat NTC értékekkel reprezentáljuk, melyek az ENTSO-E Transparency Platformján elérhető historikus adatok alapján becsülve szezonálisan különböző értékek minden vezeték esetén. Két piac között csak akkor lehetséges árkülönbözet, ha szűkösség alakul ki (vagyis a megadott NTC értékeknek pontosan megfelelő nagyságú kereskedelem történik). Ebben az esetben a két piac árai között kialakuló különbség lesz a határkeresztező aukción kialakuló felár.

A modell tökéletes versenyt feltételez minden vizsgált területen. Az erőművek az EEMM-ben ennek megfelelően határköltségen áraznak. A piaci szereplők árelfogadók, nincs sem az erőművek, sem a határkeresztező kapacitások esetén kapacitásvisszatartás.

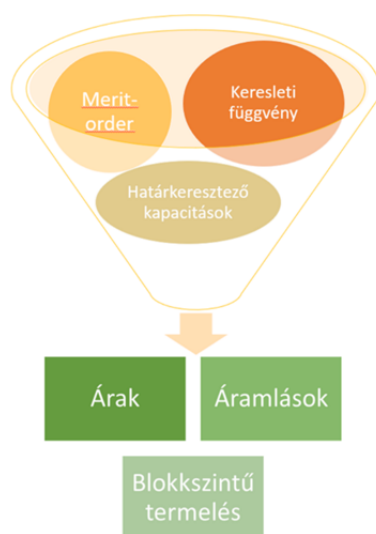
Több árampiaci modell (pl.: Pineau, P. O., & Zaccour, G. (2007) vagy Chen, Y., & Hobbs, B. F. (2005) modelljei) feltételez oligopóliumokat, és ennek megfelelő árazást a villanypiac szimulációjakor. Ez a korábbi, elsősorban a liberalizáció előtti időszakban sokkal közelebb állt a valósághoz. Mára azonban (köszönhetően részben a privatizációnak, részben az EU-s jogszabályoknak – pl. a szétválasztás, „unbundling” terén) az európai árampiacok sokkal közelebb állnak a tökéletesen versenyző piacokhoz, mint korábban.⁷ Ez talán az EU-n kívüli európai országokra korlátozottabban igaz, de az Energia Közösség (Energy Community) áldozatos munkájának köszönhetően ezen országok is egyre jobban közelednek az EU-hoz.

A kínálati és keresleti függvények felállítását követően a modell a termelők és a fogyasztók jólétét maximalizálja összeurópai szinten. A maximalizáció pontos specifikációját lásd a 7. függelékben. Az így kialakuló egyensúlyban minden modellezett óra esetén meghatározásra kerül az összes modellezett ország egyensúlyi nagykereskedelmi áramára, a piacok közötti kereskedelmi áramlások, valamint minden termelő egység blokk szintű termelése is. A 3.3. ábra a modellezés logikáját szemlélteti.

A modellben blokk szinten szerepelnek az egyes országok nagyerőművei, míg a kisebb egységek aggregáltak, egy-egy egységként kerülnek megjelenítésre. Tizenkét különböző technológiát különböztetünk meg a tüzelőanyagok szerint: konvencionális termelő egységekből szén-, lignit-, nehéz és könnyű fűtőolaj-tüzelésű, valamint földgáz-tüzelésű erőművek szerepelnek a modellben, ezen kívül nukleáris egységek, valamint megújuló alapú termelők közül biomassza-tüzelésű erőművek, szél-erőművek, naperőművek, geotermális erőművek, vízerőművek és árapály-erőművek. Ezen túl a fosszilis erőművek esetén további alkategóriák is szerepelnek (thermal, OCGT, CCGT), valamint az építés éve határozza meg az egységek hatékonyságát, önfogyasztását és a működési költségek szintjét is.

A modellben blokkonként történik a (rövid távú) határköltség meghatározása. Ehhez figyelembe vesszük a tüzelőanyag-költséget (a hatékonysági értékek-

⁷Magyarország piaci liberalizációs törekvéseit, a versenyző árampiac létrehozásához vezető útját részletesen bemutatjuk szerzőtársaimmal a (Kácsor et al., 2019)-es munkában



3.3. ábra. Az EEMM modell működési logikája

kel is kalkulálva), a változó működési költségeket (OPEX), és amennyiben felmerülnek a jövedéki adókat és a szén-dioxid-költségeket (szintén számolva az adott tüzelőanyaghoz kapcsolódó kibocsátási értékekkel). Az EU területén természetesen minden ország tagja az ETS rendszernek (Emission Trading System – Kibocsátáskereskedelmi-rendszer), az EU-n kívüli modellezett országokban pedig a következő 10-15 év folyamán feltételezzük a csatlakozást.

A tüzelőanyagok árára és a szén-dioxid-kvóta árára vonatkozó előrejelzéseket alapvetően a nemzetközi szakirodalom alapján építjük be a modellbe. Az ARA (Amsterdam-Rotterdam-Antwerp) szén, a Brent olaj vagy az (európai) földgáz árára vonatkozóan számos nemzetközi szervezet tesz közzé előrejelzést, többek között a Nemzetközi Energiaügynökség (IEA), az EIA (U.S. Energy Information Administration), a Nemzetközi Valutaalap (International Monetary Fund – IMF) és a Világbank is.

Modellünkben a földgáz árára vonatkozóan azonban általában saját előrejelzést készítünk a REKK egy másik, európai gázpiacokat szimuláló modelljével (Európai Gázpiaci Modell – European Gas Market Model, EGMM). A modellel lehetőség nyílik a gázárak évenkénti és országokénti előrejelzésére, figyelembe véve a gázpiac jövőbeli fejleményeit is (a modell részletes leírásához, lásd: Selei (2017)).

A modellben kizárólag a rövidtávú határköltségeket számszerűsítjük, a fix költségek megtérülésének vizsgálatára így nincs is lehetőség. Ezért előfordulhat, hogy a modellben szereplő erőművek egy része a valóságban (esetleg több évnnyi termelési szünet után) már bezárna, a modellben azonban ez csak akkor történik meg, ha az élettartama lejár (a blokkok esetén az üzembe helyezés éve, és egy ettől és a technológiától függő élettartam is szerepel).

A megújuló erőművek esetén nulla határköltséget feltételezünk, mert minden modellezett ország esetén támogatásban részesülnek, így amikor tehetik, termel-

ni fognak, vagyis a merit order legelején foglalnak helyet. Ezért ezen erőművek rendelkezésre állására pontos becslést kell adnunk. A modell, ahogy fent már említettem nem tartalmaz semmilyen sztochasztikus elemet, a megújuló termelés/rendekezésre állása is determinisztikusan kerül meghatározásra.

A (nem tározós) vízerőművek (a szakirodalomban jellemzően „run-of-river”-ként aposztrofálják őket), a szél-erőművek és a naperőművek esetén korábbi évek órák szintű termelési adatait és az adott időszak kapacitásadatait vizsgáltuk (az ENTSO-E Transparency Platformján), és ennek segítségével építettük fel a termelési profilokat. 24 különböző órátípust különböztetünk meg, összhangban a keresleti oldal esetén ismerttetett 90 referenciaórával (lásd az 59. oldal).

Az itt használt német naperőművi termelési profil az, ami a 3.1. ábrán is látható, és amit az LCOE számítás során is használok. Ezt a profilt feltételezem minden szereplő esetén a teljes élettartam alatt, és mindenki a többiek esetén is ugyanezzel a feltételezéssel él. A tározós és a szivattyús tározós (pumped storage) erőművek esetén a modellbe optimalizáció került beépítésre (a várhatóan legdrágább órákra ütemezett termeléssel), utóbbi esetén a fogyasztás is tologatható, és a veszteséget is figyelembe veszi a modell. Mivel a szivattyús tározós erőművek a valóságban sokszor tartalékként funkcionálnak, ezért éves szinten egy alacsony átlagos kihasználtság, mint korlát is szerepel a modellben.

Minden további megújuló technológiára szakirodalmi és múltbeli adatok alapján határoztunk meg egy éves átlagos rendelkezésre állási értéket, országonként. A rendelkezésre állás mellett a kapacitás adatok is nagyon fontosak. A jelenleg üzemelő vagy a közeljövőben esedékes üzembe helyezésű erőművekre vonatkozó információk összegyűjthetők (például Nemzeti Energiastratégiákból vagy olyan kiadványokból, mint a Platts „Power In Europe”-ja, ami negyedévenként listázza és értékeli a különböző országokban folyamatban lévő erőművi beruházásokat). A hosszabb távú modellezés esetén azonban nehéz az erőműpark pótlására vonatkozóan megfelelő előrejelzést adni exogén módon. Ezért a modellbe a fosszilis erőművek esetén egy külön beruházási modul került beépítésre.

Minden modellezett év elején egy plusz jövőbeli szimuláció történik: egy 10 évvel későbbi várható világállapotot futtat a modell, ahol megvizsgálja, hogy minden ország esetén 6 előre adott technológia közül (széntüzelés, illetve OCGT és CCGT gáztüzelés; mindhárom CCS – carbon capture and storage, vagyis szén-dioxid-leválasztás és tárolás – technológiával és anélkül), melyik működne a leginkább nyereségesen. Ha egyik sem termel profitot, akkor a modell nem épít be új erőművet, ha azonban van, amelyik nyereséget hozna, akkor a legjövedelmezőbbet (de minden évben maximum csak egyet) egy előre meghatározott kapacitásmérettel az építési idő elteltével beépíti a modellezésbe. A várható jövőbeli megtérülések számításakor a modell figyelembe veszi a különböző országok eltérő tőke költség szintjeit is (itt is a súlyozott átlagos tőke költség, vagyis a WACC értékeket használjuk),

így a szimultán döntés végén regionális szempontból is optimális beruházási döntések születnek.

A megújuló erőművek penetrációjára vonatkozóan szintén nehéz egy pontos pályát meghatározni exogén módon egy hosszabb távú modellezéshez. Sok ország esetén adottak a jövőre vonatkozó célok és vállalások, ezért kiindulhatunk azokból is (pl. az EU-s országoknak a Nemzeti Energia- és Klímaterveik tervezetét 2018 végén kellett benyújtaniuk, a végleges terveket pedig 2019 év végéig, és ezek a dokumentumok nyilvánosan elérhetőek az Európai Bizottság honlapján), de ezek sok esetben végül nem fedik a teljes valóságot (lásd korábbi tervek és megvalósulásuk 2.2. alfejezetben).

A probléma megoldására ezért egy másik modellel való interakció kínált lehetőséget: az osztrák TU Wien Energy Economics Group (EEG)-jával együttműködésben a REKK több körös iteráció segítségével határozta meg a megújulók várható elterjedését 2050-ig, országokként és technológiáinként a SEERMAP projekt keretében (lásd részletesen: Szabó et al., 2017b és Szabó et al., 2019b).

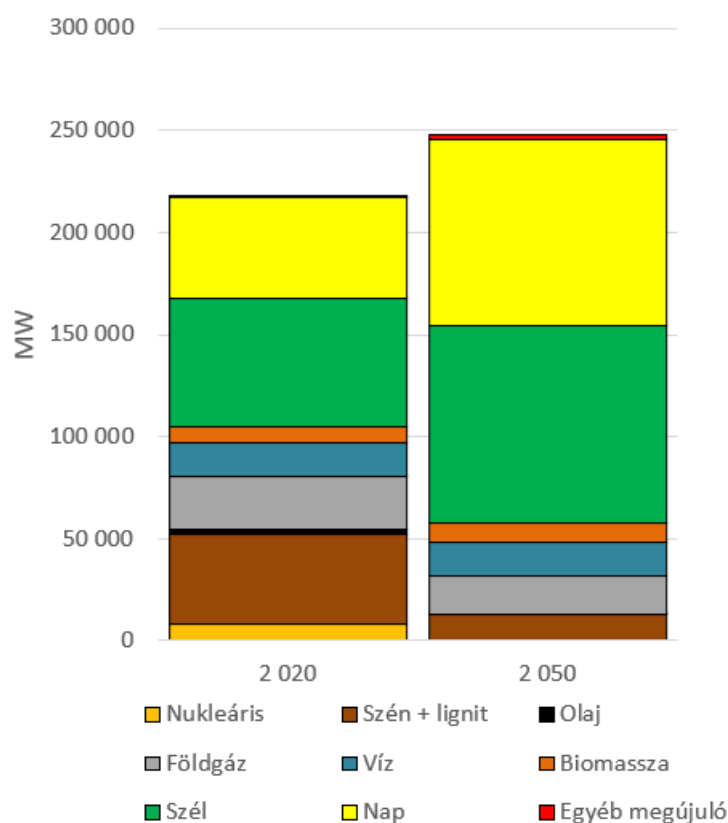
Az osztrák fejlesztésű Green-X modell kifejezetten a megújulók elterjedését vizsgálja, figyelembe véve a szén-dioxid-kibocsátásra vonatkozó csökkentési célokat, az országosan és technológiáinként eltérő WACC értékeken keresztül a beruházási és támogatási környezetet, valamint a technológiai potenciálokat.

Az EEMM a különböző megújuló penetrációk esetén kialakuló áramárak, mint a Green-X számára megadott inputok modellezésével járult hozzá az iterációhoz, melyből kirajzolódtak a becsült országokénti és évenkénti megújuló energia kapacitás adatok. Bár az EEMM-mel végzett modellezések később részben már más feltételezéseket tartalmaztak (pl. változó előrejelzés a kvótaárakra vagy a tüzelőanyagárakra vonatkozóan), ennél a becslésnél pontosabbat nem állt módunkban készíteni, így saját becslésemhez én is ezt alkalmazom.

A német termelési egységekre vonatkozó feltételezések, illetve a beruházási modul (és a Green-X modellel történő iteráció) segítségével nyert modellezési eredmények alapján összeállítható a beépített kapacitások alakulása 2020 és 2050 között. Jól látható, hogy a megújuló termelő egységek térnyerése 2050-re már nagyon komoly szintet ér el, miközben az összes nukleáris egység bezár (ez egyébként már 2022-re megvalósul), a jelenlegi fosszilis egységek nagy részével együtt, melyek pótlására új építésű gázerőművek érkeznek a piacra, azonban jóval kisebb mennyiségben. A változást a 3.4. ábrán szemléltetem.

A modell kínálati oldalához tartoznak még a határkeresztező kapacitások. Ezekre vonatkozóan szintén feltételezésekkel kell élnünk a jövőt illetően. Ehhez az ENTSO-E legfrissebb Tízéves Rendszerfejlesztési Tervei (Ten Year Network Development Plan – TYNDP) mellett az EU-s E-Highway előrejelzéseit használjuk (ENTSO-E, 2015).

Németország rendkívül jól összekötött a szomszédaival (talán egyedül Lengyelország kivétel ez alól), de a jövőben még további bővítések várhatóak, melyek még



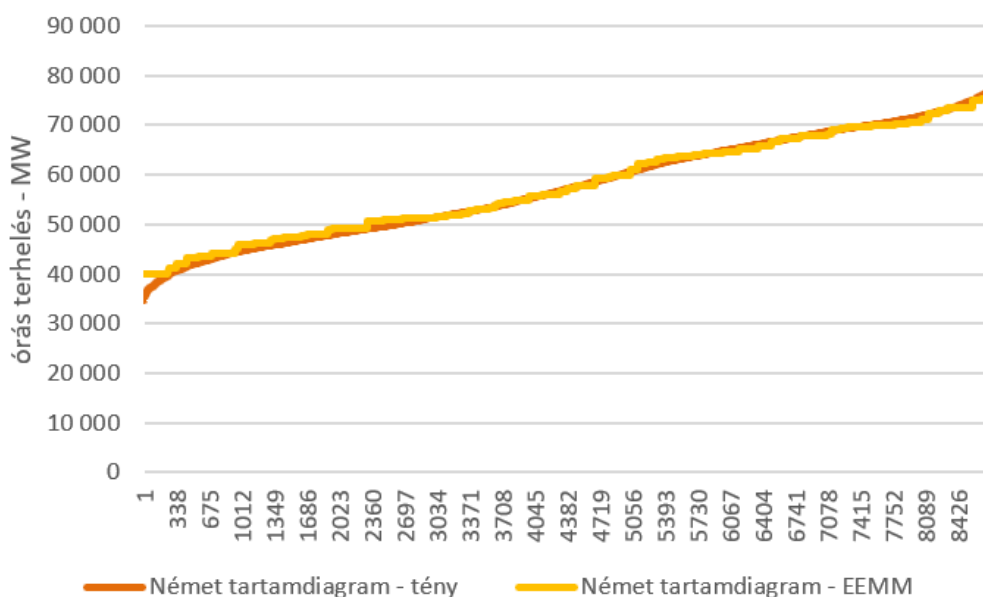
3.4. ábra. Beépített kapacitások alakulása Németországban, 2020, 2050, forrás: saját ábra

élénkebb kereskedelmet tesznek majd lehetővé. A modellben a keresletet piaconként aggregált módon jelenítjük meg. A keresleti görbéhez kapcsolódóan minden ország esetén $-0,01$ -es ár rugalmasságot feltételezünk.

Ahogy fent említettem egyszerre egy órát szimulál a modell, de az éves értékek meghatározása 90 ilyen szimuláción keresztül történik. Az egyes órák függetlenek egymástól, így az indítási és leállási költségek nem kerülnek beépítésre a modellbe. Az év 8760 órájából mindegyiket pontosan egy referencia óra reprezentálja, így a 90 óra eredményei alapján a teljes év minden egyes órájára vonatkozóan megkapjuk az eredményeket.

A 90 referencia óra a keresleti és kínálati oldalon tapasztalható szezonális különbségeket is igyekszik figyelembe venni: a napon belüli szezonális naperőművi termelés és a fogyasztás miatt fontos (itt négy óracsoporthoz állítottunk fel), az egyes hónapok közötti eltérések pedig elsősorban a vízerőművi és a kapcsolt termelés szezonális különbségeit hivatottak megfogni, természetesen ismét a fogyasztás szezonális különbségeit (itt hat csoport van). E két szempont alapján tehát összesen 24 óracsoporthoz különböztetünk meg, majd a csoportokat tovább bontottuk összesen 90 csoportra oly módon, hogy a lehető leghomogénebb csoportokat kapjuk, és a lehető legjobban lekövessük a fogyasztás tartamdiagramját.

Mindezt a 2014-es fogyasztási adatok alapján végeztük el, minden referencia



3.5. ábra. Német valós és modellezett tartamdiagram, 2014, forrás: ENTSO-E és EEMM

óra (2014-es) fogyasztása az általa reprezentált órák adott országra vonatkozó fogyasztásának egyszerű számtani átlaga. A későbbi években az így kialakuló tartamdiagramot egyszerűen feltoljuk a feltételezett fogyasztásnövekedésnek megfelelően minden országban. Ehhez az (Európai Bizottság, 2016) előrejelzésének növekedési ütemeit használjuk.

A 3.5. ábrán a német piac esetén szemléltetem a modellezett és a valós tartamdiagram közötti különbségeket, vagyis azt, hogy a modellben feltételezett kereslet és a valós kereslet mennyiben tér el egymástól. Jól látható, hogy a görbe elején és végén (vagyis az extrém órák esetén) találunk leginkább eltérést (ezért fordulhat elő, hogy a valósággal ellentétben a modellezés során nem adódnak negatív árak), összességében azonban a két görbe nagyon szorosan együtt halad, az órás átlagos eltérés mindössze 563 MW, ami az átlagos fogyasztás kevesebb, mint 1%-a. Ez tehát azt jelenti, hogy a 8760 helyett 90 óra modellezése évenként nem okoz jelentős torzítást.

Végül röviden szeretném összefoglalni, hogy mik a modell korlátai, amiket fontos figyelembe venni, amikor a kapott eredményeket értelmezzük, illetve amikor felhasználom őket a további elemzésemhez. Először is észben kell tartani, hogy a megújulóknak termelése nem sztochasztikus – ez teljes Európát tekintve, illetve kellően nagy terület és elterjedtség esetén egy-egy ország esetén sem okoz igazi torzítást, hiszen a termelés összességében általában kiegyenlítődik. Németország ebből a szempontból már megfelelő méretű, így a német átlagos termelés ilyen módon modellezve órás szinten is közel állhat a valós lefutáshoz. Magyarország esetén például már nagyobb lehet a bizonytalanság, és így a különbség is a valós és a mo-

dellezett órás átlagos naperőművi termelés között (egyelőre – ugyanis rövid időn belül várható egy komoly PV-bumm hazánkban).

Ez akkor jelentene inkább problémát, ha a magyar árakat is szeretnénk felhasználni – a német árak modellezésekor azonban ez kevésbé problémás, hiszen a teljes európai régiót tekintve ezek a bizonytalanságok már kiegyenlítődnek, így a német árakra való hatásban már nem jelentenek igazi torzítást. Amit a determinisztikus modellezés biztosan torzít, az a termelés volatilitása, ez azonban szintén egyes termelő egységekre vonatkozóan igaz inkább, országos és régiós szinten már jóval kevésbé.

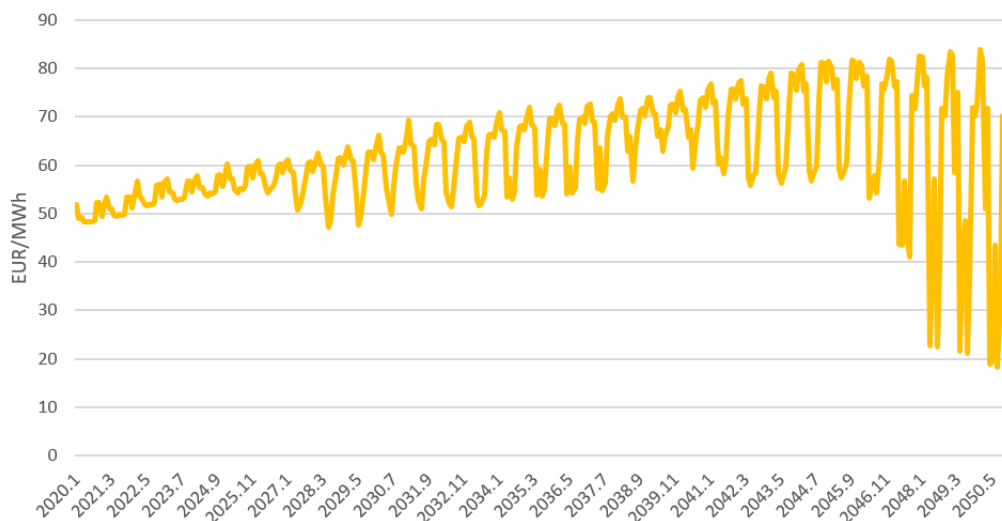
A modell egy további korlátja, hogy az egyes modellezett órák között nincs összefüggés. Ez azt jelenti, hogy a modellben előfordulhat, hogy a valóságban egymást követő órákban egy erőművi egység hol termel, hol nem – ami a valóságban, különösen a régebbi, fosszilis blokkok esetén nem valósítható meg. Bár önmagában korlát a 8760 helyett 90 óra modellezése, az órák viszonylagos hasonlósága miatt (különösen a megújuló termelés determinisztikussága mellett) ez kevésbé jelent nagy torzítást, mint az órás ki-bekapcsolások lehetőségének feltételezése.

A rugalmatlan erőművi egységek azonban sokszor helyezkednek el a merit-order elején, így a modellben is ritkábban kerül sor a termelés változására. Ez a későbbi évek során – különösen a szén-dioxid-kvóta árának változásával – azonban módosulhat, tehát mindenképp fontos észben tartani a modell ezen korlátját. Szintén érdemes megjegyezni, hogy a tartalékpiacon nem képezi részét a modellnek: a valóságban innen jelentős bevételei származnak az erőműveknek, és a termelésüket is befolyásolja a tartalékpiacon való részvétel. Ennek figyelembevétele azonban már egy teljesen új modellezési keretrendszer felállítását igényelné.

Az EEMM modell segítségével tehát a vizsgált időszak minden órájára vonatkozóan becslés adható a német nagykereskedelmi áramárra. A modellezés során minden évben csak 90 különböző árat kapunk eredményül, ezekből azonban meghatározható minden év minden órájára vonatkozóan is egy előrejelzett ár, hiszen mind a 90 referencia óra esetén egyértelműen megadható, hogy az az év mely óráit reprezentálja a modellezésben.

A bevételek számításakor figyelembe veszem, hogy a historikus termelési adatok alapján ezen órák közül melyekben mekkora naperőművi termelés várható (lásd a 3.1. ábrát). Ez – tekintettel arra, hogy a naperőművekre vonatkozóan nulla határköltséget feltételezünk a termelésre – megegyezik a PV-k feltételezett rendelkezésre állásával, vagyis a fent bemutatott termelési profil egyszerre input és output is egyben. A 90 referenciaórából ebben az esetben is mind a 8760 órára vonatkozóan megadhatóak az értékek.

Az időjárásfüggő megújulóknál (így a napenergia esetén is) komoly bizonytalanság van a termelés volumenében és időpontjában is. Ezzel azonban ebben a modellezési keretrendszerben nem foglalkozom. Ennek oka – ahogy ezt fent is említettem – egyrészt a probléma bonyolultsága, másrészt azonban ennél is fontosabb,



3.6. ábra. Német modellezett havi referenciaárak, 2020-2050, forrás: EEMM modell eredményei

hogy az EEMM modell logikájával ez nem lenne összeegyeztethető. Az egész modellezés konzisztenciájához fontos, hogy a különböző részmodellekben használt feltételezések végig azonosak maradjanak, így a sztochasztikusságtól a termelés esetén eltekintek.

A beruházási költségre a megújulók esetén nem teszünk feltételezést az EEMM modellben, így semmi akadálya egy eloszlás feltételezésének, a konzisztencia ezzel nem sérül.

A modellezett német havi referenciaárakat, vagyis a PV termeléssel súlyozott havi átlagárakat a 3.6. ábrán mutatom be. A modellezett időszak első 7-8 évében egy nagyjából 5 €/MWh-s különbséget látunk a téli és a nyári hónapok átlagárai között. Ahogy azonban növekedésnek indul a naperőművi penetráció egyre nagyobb eltérés alakul ki a két időszak között.

A 2040-es évekre extrém különbségeket láthatunk a nyári és a téli időszak között: 2050-ben nyáron 18, télen 83 €/MWh-s referenciaárakat becsül a modell. Fontos kiemelni, hogy az eltérés a naperőművek terjedésével azért is növekszik ilyen nagy arányban, mert itt nem a nagykereskedelmi áramárakról, hanem a referenciaárakról van szó, vagyis a naperőművi termeléssel súlyozott havi átlagárakról. A nyáron sokkal többet termelő 0 határkölségű naperőművek a nagykereskedelmi árakat nyilvánvalóan azokban az órákban tudják csökkenteni, amikben termelnek. Így a nyári hónapokban a havi nagykereskedelmi átlagárak is alacsonyabbak, de a naperőművi termeléssel súlyozott referenciaárakra ez duplán igaz.

Az árakban megfigyelhető trendszerű növekedés mögött alapvetően az emelkedő kereslet és szén-dioxid-kvótaárak állnak – az órák jelentős részében ugyanis továbbra is a fosszilis erőművek az ármeghatározók, így a kvótaárak szintje az áramárakban leképeződik. Erre vonatkozóan az EU PRIMES előrejelzését (Európai

Bizottság, 2016) használtuk, ami 2050-re 88 €/t-s kvótaárakat feltételez.

Módosított LCOE számítás eredményei

A fentiek meghatározása után kiszámítható a módosított LCOE érték (ezt jelölje a következőkben továbbra is $LCOE'$). A bemutatott bemeneti paraméterekkel ez 70,38 €/MWh-nak adódik. Amikor összevetjük a korábban számolt $LCOE$ értékkel, akkor észben kell tartanunk, hogy akár 20 akár 25 éves megtérülési idővel kalkuláltunk a szokásos (egyszerű) LCOE esetén, az a teljes időszak alatti támogatásra is vonatkozott. Így érthető, hogy a 20 éves megtérülési időt kívánó értéknél (78 €/MWh) alacsonyabb, de a 25 éves (támogatott!) időszakra vonatkozó értéknél (70 €/MWh) valamivel magasabb értéket kapunk.

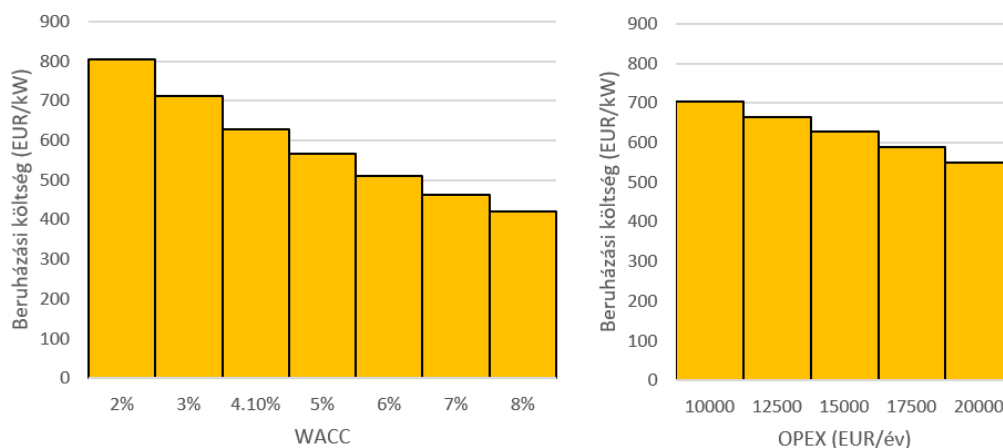
Érdekes azonban, hogy ez utóbbi különbség nagyon kicsi. Ennek oka, hogy a támogatott időszak utáni piaci bevételek viszonylag közel vannak a támogatott időszakban kapottakhoz (ráadásul a hosszú időtáv miatt ezen eltérések hatása még kisebb). Emellett pedig a módosított számításhoz figyelembe vett extra piaci bevételek kifejezetten kicsik. Az első 14 évben egyáltalán nincs a támogatott szintnél magasabb referenciaár, az utolsó 6 támogatott évben már van ebből adódó extra bevétel, de kevés.

Ahhoz, hogy lássuk pontosan mennyi is ez a kevés, köztes összehasonlításként kiszámolható, hogy ha a támogatási időszak 20 évre szól (és ez alatt nincsen egyéb árampiaci bevétel, csak egy FiT rendszerhez hasonló fix árú állami felvásárlás), utána azonban még 5 évig kalkulál a beruházó a piaci bevételekkel, akkor milyen támogatási szintet várna el. Ez 70,42 €/MWh-nak adódik, ami már nagyon közel van az $LCOE'$ értékhez, de egy hajszállal még magasabb. Ez a különbség (mindössze 0,04 €/MWh!) mutatja meg, hogy a támogatási időszak alatt a támogatási szint feletti várható piaci bevételek mennyit érnek a beruházóknak.

A fenti számoláshoz képest, egy másik fontos különbségre is érdemes felhívni a figyelmet. A projekt bevételi oldalán olyan tételek is állnak, amelyek a támogatástól függetlenek, vagyis a bevételeknek csak egy része kapcsolódik az $LCOE'$ szinthez, egy része attól teljesen független. Ezért a fentiekkel ellentétben a beruházóknak 0-s $LCOE'$ érték esetén is vannak bevételeik, tehát meghatározható az a kritikus beruházási költség szint, ami mellett a projekt már támogatás nélkül is megtérül.

Ez természetesen a várható áramárakon és a termelési profilon túl (amiket, ahogy mondtam fixnek veszek a modellben) függ a WACC értéktől és a karbantartási költségektől is. Utóbbi esetén a beruházó szintén viszonylag kis mozgástérrel rendelkezik, bár ahogy a fenti irodalmakból látható az egyes becslések között adódnak különbségek.

A 3.7. ábrákon különböző elvárt megtérülési ráták, illetve különböző karbantartási költség szintek mellett ábrázoltam (*ceteris paribus*) azt a beruházási költség szintet, ami mellett a projektek már támogatás nélkül is megvalósulnának. Ezeknek



3.7. ábra. Beruházási költség szintek 0 támogatásigényhez különböző WACC és OPEX értékek esetén

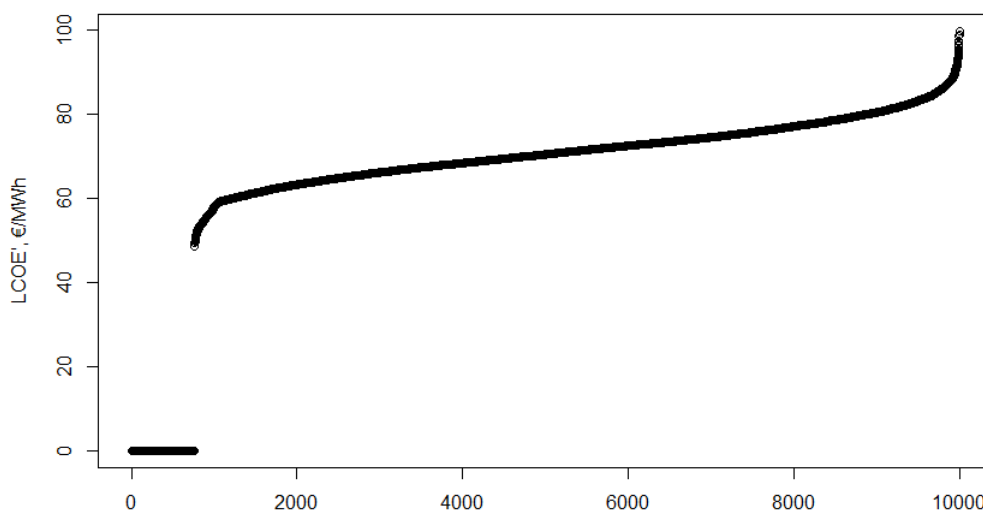
a számításoknak azért van komoly jelentősége, mert a beruházási költségek folyamatosan csökkennek (lásd pl. a 29. oldalt), ezért egyre valószínűbb olyan projektek előfordulása, amikbe támogatás nélkül is érdemes belevágni.

Ahogy látni fogjuk a 4. és 5. fejezetben, ennek komoly jelentősége lehet az aukciókon történő ajánlatadás szempontjából is. Az ábrán pedig jól látható, hogy az általam becsült 800 €/kW beruházási költséghez képest 30-35%-kal alacsonyabb beruházási költségek esetén 6%-os reál WACC vagy a legmagasabb feltételezett OPEX mellett is megtérülnek a projektek támogatás nélkül. Ekkora költségcsökkenés pedig már néhány éven belül megvalósulhat.

3.3. A támogatási szint igény eloszlása

A fent bemutatott LCOE' számítást most kiegészítem a beruházások eloszlásának figyelembevételével. Az aukcióelméleti modellhez arra van szükségem, hogy magukat az $LCOE'$ értékeket tudjam egy adott eloszlásból generálni. Ehhez a beruházások eloszlásából indulok ki.

A fent bemutatott LCOE' számításhoz képest csak annyi a különbség, hogy az ott szereplő I érték itt már valószínűségi változó. Ahogy erről már szó volt, az érték kiszámításához optimalizációt használok, és a következőképpen használom fel az I -re tett eloszlásfeltételezést. A bemutatott módon meghatározott eloszlással rendelkező beruházási költséget szimuláció segítségével 10 000-szer legenerálom, és minden esetben kiszámolom az így adódó $LCOE'$ értéket, vagyis támogatási szint igényt. Ez az érték vagy egy egyértelmű pozitív szám, vagy, ha támogatás nélkül is megérné megvalósítani a projektet, akkor az eredeti egyenletnek nincs vagy végtelen sok megoldása van, ebben az esetben azonban a szükséges támogatás 0. A kapott eredményekből áll elő az $LCOE'$ „tapasztalati” eloszlása. A generált 10 000 érték (sorbarendevezve) a 3.8. ábrán látható.



3.8. ábra. $LCOE'$ tapasztalati eloszlása, 10 000 generált beruházási költség érték alapján, forrás: saját ábra

Szembetűnő, hogy az első jó pár (egészen pontosan 759) elem 0. Ennek oka, hogy ezeknél a szereplőknél mind fennáll, hogy a beruházási költség annyira alacsony, hogy a projekt támogatás nélkül is megtérül. Ezekben az esetekben a szereplők azért vesznek részt az aukción, mert abban bíznak, hogy elnyerhetnek támogatást (ahogy látni fogjuk nem is alaptalanul), de ha ez végül nem sikerülne, számukra még akkor is megérné megvalósítani a projektet.

Itt érdemes megjegyezni, hogy a modellemben eltekintek az aukción való indulás költségétől – bár a valóságban többek között az ajánlati biztosíték, de egyéb, induláshoz szükséges papírok, engedélyek beszerzése miatt sem ingyenes az indulás. Ez jelentős egyszerűsítés – ahogy látni fogjuk több cikkben éppen ezeknek a költségeknek a hatását vizsgálják az aukción való részvételre, és így az aukciók kimenetelére –, azonban minden részletszabály beépítése a modellemben meghaladja jelen dolgozat kereteit, nálam a hangsúly az ajánlatadási viselkedés pontos leképezésén van.

A mögöttes eloszlásfüggvény explicit, képlettel történő meghatározására, ahogy később látni fogjuk, nincs szükségem, mert az egyensúly megkeresésekor olyan módszert használok, amihez a tényleges eloszlás nem szükséges. A használt iteráció első lépéseként olyan feltételezéssel élek a többi szereplő ajánlataira vonatkozóan, ami nem függ a tényleges értékelésük eloszlásától. Az iteráció későbbi lépései pedig az előző lépésekben adódó eredményekből levezethetők oly módon, hogy minden lépésben az itt bemutatott 10 000 $LCOE'$ érték esetén egyenként kiszámítom az optimális ajánlatot a többiek ajánlataira vonatkozó aktuális eloszlás feltételezés mel-

lett. Így tehát később sincs szükségem az eloszlás képlettel felírt változatára, csupán erre a tapasztalati eloszlásra.

Az aukciók lejátzásakor a szereplők számára egy beruházási költséget generálok a fenti eloszlásból, és kiszámítom a kapott számhoz tartozó $LCOE'$ értéket, így minden szereplő számára előáll egy értékelés. A dolgozat végleges változatában 1000 aukció lejátzása történik meg, ami $1000 \cdot 100 = 100\,000$ adatpont legenerálását jelenti. Az értékelések és az iterációval kapott ajánlati függvény segítségével meghatározhatóak az ajánlatok, amelyeket minden aukció esetén sorbarendezelek, és a 40 legalacsonyabbat választom ki nyertesként. A nyertesek meghatározása után pedig már kiszámítható a teljes időszakra vonatkozó támogatási költség is.

4. fejezet

Az aukcióelméleti modell

AZ AUKCIÓELMÉLET RENDKÍVÜL divatosnak mondható tudományterület, az utóbbi évek során több, szorosan kapcsolódó részterületen tevékenykedő közgazdász részesült Nobel-díjban. Míg a játékelmélet, illetve az aszimmetrikus információ melletti döntések vizsgálata már korábban is középpontba került (Selten, Nash és Harsányi 1994-es, és Mirrlees és Vickrey 1996-os díjával, majd Aumann és Schelling 2005-ös jutalmazásával), a mechanizmustervezés valamivel később (Hurwicz, Maskin, Myerson, 2007), a szerződéselmélet pedig pár éve került fel a díjjal jutalmazott tudományterületek térképére (Hart, Holmström, 2016). 2020-ban pedig Milgrom és Wilson „Az árverések elméleteiért” vehette át a díjat, munkájuk során az aukciók gyakorlati életben történő alkalmazásáért tettek rengeteget (pl. amerikai frekvencia kiosztási aukciók a telefontársaságok között).

Az aukcióelmélet alapjainak lefektetése Vickrey nevéhez kötődik, és 1961-es cikke (Vickrey, 1961) óta rendkívül sokat fejlődött. Az 1980-as évektől kezdődően rengeteg tétel egyre általánosabb keretek közötti bizonyítása történt meg. A tudományterület relatív fiatal, az alapvető elméleti keretrendszer azonban az évek során kikristályosodott, és a szokásos feltevések köre – bár egyre bővült és általánosabbá vált – jól behatárolható. Az általános elméleti keretrendszerhez kapcsolódóan alapvető munka (Krishna, 2010) Auction theory című könyve, mely legtöbb fejezetében a független értékelésű aukciókkal foglalkozik. A témával foglalkozó cikkek nagy részében az ott bemutatott modellek tekinthetők kiindulópontnak, én is ez alapján indulok el a modellem felépítésekor.

A könnyebb érthetőség kedvéért a releváns szakirodalom részletesebb ismertetése előtt néhány alapfogalmat definiálok (a definíciókat itt is, és később is Krishna (2010) munkáját alapul véve ismertetem):

- Kikiáltó: Az aukció kiírója, az eredeti aukcióelméleti keretrendszerben az aukcióra bocsátott termékek eladója, az általam vizsgált esetben azonban ő lesz a vásárló, és az aukció résztvevői kínálnak számára termékeket.

- **Értékelés:** az eredeti keretrendszerben az a hasznosság, amit a szereplők számára jelent az aukcióra bocsátott tárgy megszerzése. Az általam vizsgált rendszerben éppen fordítva, az a költség, amit a szereplők számára jelent a kínált termék biztosítása. Vagyis legalább akkora összeget szeretnének kapni a kikiáltótól a kínált termékért cserébe, amekkorával már kompenzálható a fellépő költség miatti hasznosságcsökkenésük.
- **Ajánlati függvény (vagy Licitfüggvény):** a függvény minden egyes értékelés esetén megadja, hogy az adott szereplő milyen ajánlatot fog adni az aukción az adott értékelés esetén. A szereplőkre vonatkozóan jellemzően nem egy értékelést, hanem egy értékeléseloszlást feltételezünk, ezért van értelme a különböző értékelésekre egy függvényt definiálni, hiszen az adott eloszlásból származó különböző értékelésrealizációkhoz különböző ajánlatok tartozhatnak. Az ajánlati függvény jeleníti meg a szereplők stratégiáját.

Az aukciókat többféleképpen szokás csoportosítani: az ajánlatadás módja szerint (statikus, illetve dinamikus aukciók); a licit tárgyának tekintetében (egy- vagy többtermékes aukciók); nyeresi kritériumok szerint (legalacsonyabb vagy legmagasabb licit); illetve az árazási és kifizetési szabályok szerint (pl. elsőáras és másodáras aukciók; nyertes fizet vagy vesztes fizet típusú aukciók) (Krishna, 2010).

Mind a szakirodalomban, mind a gyakorlati életben számos különböző aukciótípussal találkozhatunk. A statikus aukciók esetén a szereplők egyetlen ajánlatot adnak, jellemzően oly módon, hogy a többi szereplő ezt az ajánlatot nem ismeri meg azelőtt, hogy a saját ajánlatát beadná (zárt borítékolású rendszer), így a szereplők egymás tényleges ajánlataira nem is tudnak reagálni. A megújuló energia támogatására vonatkozó aukciók általában ilyen rendszerben kerülnek megrendezésre.

Ezzel szemben a dinamikus esetben a szereplők több körön keresztül adnak ajánlatot, a körök között pedig információkat kapnak. Ilyen típusú aukciók a gyakorlatban a műtárgy aukciók, ahol a szereplők egymás licitjeit azonnal megismerik, így tudnak reagálni egy következő ajánlattal. Ilyen típusú aukciót szervez például a MAVIR (Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító) is a rendszer-szintű tartalékok beszerzésére vonatkozóan. Itt a szereplők egy-egy ajánlat beadása után megtudják, hogy az adott ajánlattal nyertek-e vagy sem, illetve, hogy mi volt az utolsó még elfogadott ajánlat, és ezen információk birtokában dönthetik el, hogy szeretnének-e a következő körben más ajánlatot adni (itt is beszerzési aukcióról van szó, ezért természetesen az ajánlatok csak lefelé módosíthatóak).

A licit tárgya rendkívül sokféle lehet. Gondoljunk a tőzsdére, a különböző egyéb online piacterekre (pl. vatera.hu, teszvesz.hu, zsibvasar.hu), vagy akár a fent már említett tartalékpiacon aukcióra, műtárgyaukciókra. Néhány esetben természetes, hogy az aukció egyetlen tárgyra vonatkozik, ebben az esetben biztosan csak egyetlen nyertes lehetséges. Ha azonban olyan termékről van szó, ami osztható, vagy több is rendelkezésre áll belőle, akkor többtermékes aukcióról beszélünk. Ebben az

esetben már előfordulhat, hogy több szereplő kerül nyertesként kihirdetésre. Erről van szó a legtöbb megújuló energia támogatására kiírt aukció esetén is, hiszen az egy-egy aukción kiosztott támogatás többnyire nagyobb mennyiségre vonatkozik, mint ami egy projekttel megtermelhető, így általában több nyertest is hirdetnek.

A nyerési kritérium – ami rendszerint arra korlátozódik, hogy a legalacsonyabb vagy legmagasabb valahány licit nyer – elsősorban attól függ, hogy a kikiáltó vásárolni vagy eladni szeretne. Nyilvánvalóan első esetben az alacsonyabb, másodikban a magasabb licitek lesznek számára kedvezőbbek. Léteznek azonban olyan aukciók is, amik ennél szofisztikáltabb nyerési kritériumrendszert határoznak meg. Ezek az aukciók jellemzően nem elemezhetőek a szokásos aukcióelméleti keretrendszerben. Ilyen volt korábban (2010 környékén) a fent említett MAVIR-aukció, ahol a tartalékot nyújtó erőművek technológiai tulajdonságait is figyelembe vették a nyertesek meghatározásakor, nem csak az általuk beadott ajánlatokat. A szabályzatot később megváltoztatták, így az elmúlt évek során a technológiai kritériumok a nyertes meghatározásakor már nem, csak az aukción való részvétel engedélyezésekor játszanak szerepet.

Az aukciók árazási és kifizetési szabályai szintén sokfélék lehetnek. Az egyik alapvető kategorizálás arra vonatkozik, hogy ki az, akinek fizetnie kell (vagy beszerzési aukció esetén ki az, aki a pénzt kapja). A nyertes fizet típusú aukciók esetén az aukció szabályai alapján meghatározott nyertes lesz az, akinek a tárgyért cserébe fizetnie kell (illetve aki az összeget kapja).

A nem (csak) nyertes fizet típusú aukciókon ezzel szemben a tárgy a nyerteshez kerül (ebben áll a „nyertes” mivolta), azonban más szereplőknek is fizetnie kell. Minden olyan aukció, ahol az indulás költsége nem 0 ebbe a kategóriába sorolható (így a valóságban az általam elemzett aukció is ilyen, az egyszerűsített modellemben azonban nyertes fizet típusú aukcióként tekintek rá).

Az árazási szabályok esetén különböző kategóriákat határozhatunk meg az egytermékes és a többtermékes aukciók esetén, ugyanis, ahogy látni fogjuk, nem minden esetben értelmezhető egy-egy árazási szabály. Az elsőáras és másodáras szabályt csak az egytermékes aukció esetén értelmezhetjük. Az elsőáras aukción a nyertes a legmagasabb (beszerzési aukció esetén a legalacsonyabb) ajánlatot adó szereplő, és az általa fizetendő (vagy kapott) ár a saját ajánlata, míg másodáras esetben a nyertes meghatározása ugyanúgy történik, a fizetendő (vagy kapott) ár azonban a második legmagasabb (illetve legalacsonyabb).

Az egyenáras és ajánlati áras szabály ezzel szemben csak többtermékes aukció esetén értelmezhető. Az ajánlati áras aukción minden nyertes az általa beadott ajánlat áron kapja meg (vagy adja el) az aukcióra bocsátott terméket. Az egyenáras aukción pedig egy úgynevezett piactisztító ár kerül meghatározásra, mely lehet a legalacsonyabb még nyertes, vagy a legmagasabb már nem nyertes ajánlat (vételei aukció esetén értelemszerűen a legmagasabb még nyertes, és a legalacsonyabb már nem nyertes). A szakirodalomban jellemzően utóbbit alkalmazzák (Krishna,

2010), így teszek majd én is a saját modellemben. Ez lesz az, ami garantálja, hogy a szereplők igazmondásra sarkalltak.

Az aukcióelméleti irodalom az így felállított keretekben arra is kitér, hogy az egytermékes, illetve többtermékes aukciók esetén mely árazási szabályok feleltethetők meg egymásnak. A statikus, többtermékes esetben – amivel én is foglalkozom dolgozatomban – az elsőáras aukciók az ajánlati áras (pay-as-bid), míg a másodáras aukciók az egyenáras (uniform price) aukcióknak feleltethetők meg (Krishna, 2010).

4.1. Aukciók modellezése a szakirodalomban

Az irodalom kiterjedt része foglalkozik már a tudományterület hajnala óta (pl. (Klemperer, 1999), (Milgrom & Weber, 1982)) a két árazási szabály összevetésével mind a többtermékes mind az egytermékes aukciók esetén. A két aukciótípust később is sokan hasonlították össze akár elméleti keretek között (Morgan, 2000; Hailu & Thoyer, 2006; de Keijzer et al., 2013), akár konkrét piacok esetén. A megújuló energiához kapcsolódó aukciók mellett az árampiac vizsgálata is igen népszerű (pl.: Hudson, 2000; Federico & Rahman, 2003; Tierney et al., 2008; Sugianto & Liao, 2014).

(Fabra et al., 2002) az árampiaci aukciókat vizsgálva a különböző árazási szabályok esetén arra jutott, hogy az eredmények nagyban függenek a piac szerkezetétől és a szereplők költségstruktúrájától. Az aukciók pontos részletszabályai szintén fontosak: hogy csak egy példát említsek egészen más eredmények vonhatóak le az árplafont/árküszöböt alkalmazó esetekben, mint akkor, ha nincs ilyen előre kihirdetett érték: az elméleti eredmények mellett (Krishna, 2010) empirikus megerősítésre is találunk példát az irodalomban (Ostrovsky & Schwarz, 2011), (Reiley, 2006). A vizsgálat során tehát fontos, hogy mit gondolunk/mit teszünk fel a szereplőkről és az is, hogy pontosan milyen szabályokat vizsgálunk.

Tipikus kérdés az aukciós irodalomban, hogy a szereplők mennyire adnak a valós értékelésükhöz/költségeikhez közeli ajánlatot, vagyis mekkora az ösztönzés az igazmondásra. Az elméleti eredmények alapján (McAfee & McMillan, 1987) az egyenáras esetben – megfelelő keretrendszerben és feltételezések mellett – (gyengén) domináns stratégia az igazmondás, vagyis a szereplők várhatóan a valós költségeiket/értékelésüket adják be ajánlatként. Ezért jó referenciapont sok elemzés esetén az egyenáras aukció. Jellemzően ettől eltérő ajánlatok várhatóak az ajánlati áras esetben. A kérdés többnyire az, hogy mekkora a különbség.

A megújuló energia támogatására vonatkozó aukciókkal foglalkozó irodalom viszonylag friss, hiszen a legtöbb országban maguk az aukciók is csak a 2000-es években kezdődtek, bár néhány példát láthatunk az 1990-es évekből is. Az első ilyen típusú európai aukciókat az Egyesült Királyságban rendezték meg 1990-ben, majd Írországon 1995-ben, és Franciaországban 1996-ban is láthatunk példákat

(del Río & Linares, 2014). 2004-ben már Dániában, 2006-ban pedig Portugáliában is találkozhatunk ilyen aukciókkal (Wigand et al., 2016). Az elmúlt évek során pedig összességében közel 20 országban rendeztek Európa-szerte ilyen típusú aukciókat, az EU tagállamok mellett többek között Albániában, Montenegróban és Észak-Macedóniában is (Szabó et al., 2019a és Cretu, 2019).

Magát az aukciós szabályzatot, illetve a mechanizmus összetevőit tekintve rendkívül sok apró részlet van, a legtöbb munka ezen részletszabályok relevanciáját vizsgálja elméleti vagy empirikus módszertani keretben. A következőkben ezekből a cikkekből válogatok, kiemelve, hogy mely pontok lesznek relevánsak a saját modellem felépítésekor, és melyek azok, amelyekről a terjedelmi korlátok miatt eltekintek.

(Kylili és Fokaides, 2015) különböző piacok megújuló energiához kapcsolódó aukcióit vizsgálták (Franciaország, Kalifornia állam, Taiwan, India, Kína és Ciprus). Elemzésük alapján a nem megfelelően megállapított rezervációs ár (vagy támogatási plafon) hatékonyvesztéshez vezethet. Hasonlóan az indulási feltételek nem kellően körültekintő megválasztása esetén előfordulhat erőfölényes szituációk kialakulása, ami a verseny torzítása miatt szintén kevésbé hatékony kimenetelhez vezethet. Emellett megemlítik, hogy a ciprusi esetben nyílt aukciós ajánlattételt alkalmaztak, ami fokozhatta a stratégiai viselkedés kockázatát, így javasolják a későbbiekben – a német piacon is alkalmazott – zárt borítékolású rendszer használatát. Modellemben én is ez utóbbit alkalmazom, míg maximum támogatás esetében nem kerül beépítésre a modellbe.

(Shrimali, Konda és Farooquee, 2016) munkájukban az indiai megújulóenergia-támogatási rendszert vizsgálják. 20 aukció adatai alapján igyekeznek megválaszolni, hogy az aukciók valóban hatékony támogatás kiosztási formának tekinthetőek-e, illetve, hogy hogyan lehetne őket továbbfejleszteni, hogy az ország megújuló célkitűzései elérhetőek legyenek. Eredményeik alapján az adminisztratív, automatikusan megkapható támogatáshoz képest az aukciók minden esetben költséghatékonyabbnak bizonyultak.

Nem minden esetben valósult meg azonban minden támogatást elnyert projekt, aminek oka részben az aukcióhoz, illetve az országhoz kapcsolódó kockázat, részben az egyedi projekt kockázat volt. Magának az aukciós dizájnnek is fontos szerepe van a projektek megvalósulásában. A legfontosabb elemek, amik elősegíthetik a hatékonyságot a szerzők szerint a következők: verseny biztosítása az aukción, szükséges infrastruktúra kiépítése, garanciák biztosítása a szereplők számára, ajánlati áras aukció alkalmazása, illetve büntetések beiktatása a projektek megvalósításában való késlekedés esetén.

A fentiek közül a saját modellemben csak az árazási szabályokkal foglalkozom, megvizsgálom az ajánlati áras és az egyenáras aukciók különbségeit. A garanciák és büntetések hatásainak vizsgálatától eltekintek, a verseny meglétét pedig a német piacon adotttnak tekintem. Vizsgálom azonban a megvalósulási rátákat is német

piac esetén, hiszen ezek fontos mérőszámai az aukciók sikerességének. A modellemhez háttérként szolgáló 2017 és 2019 között megrendezett aukciók esetén csak korlátozottan elérhetőek az információk, mert a projektek megvalósítására 2 év áll rendelkezésre, így érdemben az első év aukció lesznek elemezhetőek ebből a szempontból.

(Atalay, Kalfagianni és Pattberg, 2017) meta-tanulmányukban a GCC országok (Gulf Cooperation Council, magyarul Perzsa-Öböl Menti Együtműködési Tanács) esetén vizsgálják a hatékonyságot megújuló energiához kapcsolódó adminisztratív és aukciós támogatáskiosztás esetén. Az előzőekhez hasonlóan azt találják, hogy az aukciók hatékonyabb eszköznek bizonyulnak az adminisztratív támogatásoknál. A különböző büntetések alkalmazása elmondásuk szerint szintén hatékony lehet, csakúgy, mint az állam bevonása a projektek tulajdonosi körébe. Megjegyzik, hogy a nagyobb projektek a méretgazdaságosság miatt szintén hatékonyabb és gyorsabb megújulótermelés-felfutást eredményezhetnek. Nálam a hangsúly a szereplők versenyző ajánlatadására kerül, így a büntetéseket nem építem be a modellezésbe, ugyanis a kutatás jelenlegi állapotában zavaró bonyolítás lenne. Egy későbbi lehetséges kutatási irány azonban a modellem ezzel való kibővítése.

A következő néhány cikk segítséget nyújt az általam használt módszertan gyakorlati alkalmazásának megismerésében. Ezek a cikkek ugyanis szintén aukcióelméleti alapokat és/vagy ágens alapú modellezési keretrendszert használnak, hasonló problémákat vizsgálva, mint én. Mivel az aukció minden elemében a valóságot tökéletesen lemásoló modellezése túlságosan bonyolult feladat, így a következő cikkekből igyekeztem arra vonatkozóan is információkhoz jutni, hogy mik azok az egyszerűsítő feltevések, amik konszenzusos módon általánosan elfogadottak az ilyen típusú modellek esetén.

(Güth, Ivanova-Stenzel és Wolfstetter, 2005) cikkükben a modellezésemhez hasonlóan indulnak el: egy elméleti modell esetén kiszámítják a szereplők egyensúlyi licitfüggvényeit, és néhány további mutatót (pl. kikiáltó várható bevétele). Ezt követően azonban nem szimulációt alkalmaznak, hanem kísérlettel próbálkoznak, és ennek eredményeit vetik össze az elméleti számokkal. Számomra különösen az elméleti modell érdekes. Modelljükben két szereplő van, akiknek különböző tartójú egyenletes eloszlásból származik az értékelésük, vagyis az általul vizsgált modell a sajátommal ellentétben aszimmetrikus. A két vizsgált aukció elsőáras és másodáras.

(Kreiss, Ehrhart és Haufe, 2017) a büntetések és előminősítés szerepét vizsgálják, elsősorban a meg-nem-valósulás kockázatának tükrében. Hangsúlyozzák, hogy a legnagyobb veszélyt az jelenti, hogy a pontos költségek a szereplők számára is ismeretlenek. Különböző paraméterek mellett vizsgálják a résztvevők várható profitját, első- és másodáras aukciókat vizsgálnak. Végül a magas letéthez kötött részvételt és a technológiai szempontú előminősítést emelik ki. A cikkben szintén részletesen leírják az aukciós modellt, és a szereplők indukált egyensúlyi licitfüggvényeit. Ez rendkívül hasznos a saját modellem felépítéséhez is.

Iychettiraa, Hakvoort, Linares (és Jeu) két cikket is jegyeznek 2017-ből. Mindkét esetben egy ágens alapú modellezést írnak le, amivel megújulóenergia-támogatást aukcionálnak. Az első esetben kifejezetten azt vizsgálják, hogy az egyes szabályzatok esetén milyen kapacitás mix alakul ki, a másik cikkben pedig a társadalmi összjólét szempontjából vizsgálják az egyes aukciókat. A hatékonyságot kétféleképpen mérik: egyrészt költséghatékonyságról beszélnek, másrészt a megújuló energiához kapcsolódó célok megvalósulását is nézik.

Vizsgálják többek között a technológiaspecifikus és a technológiasemleges aukciók közötti különbséget, és azt találják, hogy utóbbi jóval hatékonyabbnak bizonyul mindkét hatékonysági mutató szempontjából. A modell leírása mindenképpen hasznos kiindulás számomra, csakúgy, mint az egyszerűsítések köre, és a különböző vizsgált szabályzatok közötti különbségek. Az aukciós szabályzatok kiértékeléséhez hozzám hasonlóan szimulációt használnak, az ehhez kapcsolódó módszertan és esetleges nehézségek és problémák feltérképezésében szintén nagy segítséget nyújt ez a két munka.

Haufe & Ehrhart (2018) cikkükben az elmúlt évek során megrendezett megújuló aukciók eredményei alapján kijelentik, hogy Németország rendkívül sokat profitált a versenyző kiosztásból, hiszen a támogatási szintek komolyan lecsökkentek az aukciókon történő kiosztások hatására. Felhívják azonban a figyelmet arra, hogy az aukciók résztvevői sokszor még nem elég tapasztaltak.

Az elméleti irodalom alapján kellő számú versenyző esetén hasonló eredményeket várhatnánk az egyenáras és az ajánlati áras aukciók esetén, előbbi pedig kevés versenyzős esetekben is költségalapú ajánlatadásra ösztönöz. A szerzők eredményei alapján ennek ellenére egyenáras esetben megnőhet a kockázata a valósnál alacsonyabb támogatás igénylésének, ami a későbbiekben a projektek megvalósulását fenyegeti. A szerzők a legfontosabbnak a valódi versenyhelyzet megteremtését tartják, amihez a hosszútávú, transzparens szabályozás a kulcs (erre láthatunk évek óta jó példát Németországban).

Végül a saját modellem felépítését Anatolitis & Welisch (2017) illetve Anatolitis (2016) munkái alapján véglegesítem. Az általuk használt modell szintén a legfrissebb német szabályokat veszi alapul, de ők a német szélerőművi tenderekre koncentrálnak (míg én a naperőművekre). A szereplők tanulása is részét képezi a cikknek, illetve a dolgozatnak, azok, akik nem nyertek az első aukción, a következőn (plusz információkkal felvértezve) ismét elindulhatnak. Ezt a tanulást helyettesíti esetemben az iteratív módon meghatározott ajánlati függvény.

Az aukcióelméleti modell, amit használnak, a szokásos keretrendszerből indul ki. Fix számú szereplőt feltételeznek, három különböző kategóriában, az egyes kategóriákon belül a szereplőkre tett feltevések szintén rögzítettek. Ahogy látható, itt sem szimmetrikus aukcióval van dolgunk. A modellezés során ők is összevetik az egyenáras esetet (ahol mindenki a valós költségének megfelelő ajánlatot adja be), illetve az ajánlati áras esetet.

Utóbbira vonatkozóan egy optimalizáció segítségével számolják ki a szereplők ajánlatait. Az optimalizáció során fontos egyszerűsítő feltevessel élnek: a többi szereplő esetén senki sem a valós, optimális ajánlati függvény alapján feltételezi az ajánlatadást, hanem egyszerűen normális eloszlást feltételeznek a többiek ajánlatára a szereplők (melynek várható értéke a tanulás folyamán változik), és ez alapján optimalizál és ad ajánlatot mindenki. Ezt a feltevést dolgozatomban az iteráció indulásakor használok majd – a többi szereplő ajánlataira vonatkozó induló feltevésként a normális mellett az egyenletes eloszlást is vizsgálom.

Az általam használt iterációs megközelítésben a rendszer konzisztenciáját vizsgálom: vajon, ha feltesszük, hogy normális eloszlásból származnak a többiek ajánlatai, akkor ezzel a feltevessel élve a kiszámolt optimális ajánlatok (a generált 10 000 $LCOE'$ érték esetén) szintén normális eloszlást mutatnak? A megközelítésem alapgondolata, hogy ha ez nem így van, akkor a racionális szereplők – látva, hogy saját ajánlati függvényük eltér a szimmetrikus helyzetben lévő szereplőkről általuk feltételezettől – felülvizsgálhatják az eredeti feltevésüket, és saját optimális ajánlataikból származó eloszlásaikat feltételezve az ellenfelekről egy újabb optimalizációt hajthatnak végre. Természetesen a valóságban elfogadható feltételezés, hogy a szereplők nem ennyire szofisztikált módon határozzák meg az ajánlataikat. Az aukcióelméleti irodalomban azonban szokásos megközelítés a Nash-egyensúlyi licitfüggvények megkeresése.

Ennek megfelelően a szerzők szerteágazó megoldási lehetőséget ismertetnek erre. Az egyik nagy csoport, amikor a szereplők optimalizációs feladatából kiindulva egy differenciálegyenletet írnak fel, és ennek megoldása az egyensúlyi ajánlati függvény. Attól függően, hogy pontosan milyen aukcióról van szó előfordulhat, hogy az egyenlet analitikus úton megoldható, egyszerűen kiszámolható a keresett függvény, más esetekben azonban numerikus közelítés, valamilyen fajta keresési algoritmus szükséges (Higgins, 2010, Marshall, et al., 1994, Armantier et al., 1998). Ezen felírásokban azonban közös, hogy az ajánlati függvény invertálhatóságát teszik fel, a felírásban szerepel ez az inverz. Dolgozatomban én olyan algoritmust alkalmazok, ami nem szűkíti le az ajánlati függvények körét az invertálható függvényekre, szerettem volna meghagyni a lehetőségét annak, hogy monoton, de nem szigorúan monoton függvényeket is vizsgálni tudjak. Esetemben ezért a differenciálegyenletek felírása nem a kívánt út, más módon jutok el a keresett ajánlati függvényekhez.

Victor Naroditskiy és Amy Greenwald 2007-es munkájukban egy az általam is alkalmazott iterációéhoz nagyon hasonló elvet követnek Bayes-i Nash-egyensúly keresés esetén. Első lépésben feltesznek egy eloszlást az egytermékes aukción kialakuló árról, és megkeresik az optimális ajánlati függvényt erre az esetre. Így előáll egy áreloszlás, amit alapul véve ismét kiszámítják az optimális ajánlatokat. Ezt egészen addig folytatják, míg a feltett és kapott eloszlás meg nem egyezik egymással. Az iteráció használatát azzal indokolják, hogy esetükben nem folytonos, hanem

diszkrét értékeléseloszlásokkal rendelkeznek a szereplők. A Nash-egyensúly keresést különböző eloszlások és játékoszám esetén végzik el, elsőáras és másodáras esetre egyaránt. A másodáras esetben 2 lépésből megérkeznek az igazmondás stratégiájához. Az elsőáras esetben 1 és 8 lépés között érkeznek meg az egyensúlyhoz, ha az első lépésben feltételezett eloszlás az értékeléseloszlásokkal egyezik meg, és átlagosan 5 (maximum 27) lépésben, ha ettől különböző az induló eloszlás feltételezés. A kapott ajánlatok hasonlítanak a Krishna (2010) által a folytonos esetben kiszámított egyensúlyi ajánlatokra, a diszkrét ajánlatadás miatt azonban nem egyeznek meg azokkal teljesen, így feltételezhetően a bevételi ekvivalencia tétel sem teljesül (bár ezt a szerzők a rendkívül szűkszavú publikációjukban explicit nem említik).

Logikáját tekintve hasonló, bár valamelyest távolabbról kapcsolódó az előző munkához ötletet adó 2005-ös publikáció (Osepayshvili et al., 2005), ami több különböző, szimultán aukciót vizsgál, ahol a szereplők a javak kombinációira vonatkozóan rendelkeznek értékelésekkel. A munka definiálja az “önigazoló becslés” fogalmát (self-confirming predictions). A szerzők által használt definíció a következő: egy kialakuló árak eloszlására vonatkozó becslés öngigazoló akkor, ha mikor minden résztvevő ezen áreloszlást feltételezve ad ajánlatot, akkor az így kialakuló áreloszlás megegyezik a feltételezettel. Ez a megközelítés nagyon hasonlít a (Novshek & Sonnenschein, 1982) által használthoz. A szerzők Cournot duopóliumok esetén beszélnek “várakozásokkal megegyező egyensúly”-ról (“fulfilled expectations equilibrium”), ami lényegében a fentieknek feleltethető meg. Az ötlet tehát, amit én is alkalmazok az iterációhoz nem újkeletű, de megújuló aukciókra, illetve az ajánlati függvények szélesebb körének (monoton függvények) figyelembe vételére történő alkalmazására nem találtam példát az irodalomban. A megújuló aukciókra történő alkalmazás azért lehet újdonság, mert ez egy tipikus példája az olyan értékeléseloszlás meglétének, ahol az indulók egy csoportjának pontosan megegyezik az értékelése. Ez egyéb területeken, ahol folytonos értékeléseloszlásokkal találkozunk nem tekinthető bevettnek. A folyamatos költségcsökkenés miatt azonban a megújuló támogatások esetén egyre inkább általánossá válhat majd, hiszen az ajánlatadók egyre nagyobb részének nem lesz már szüksége támogatásra (vagyis a modellem terminológiáját követve: egyre többek értékelése lesz éppen 0).

Bosshard et al. (2017) összefoglalja, hogy a korábbi irodalomban milyen különböző algoritmusok születtek a Nash-egyensúly illetve a Bayes-i Nash egyensúly (BNE) keresés esetén. Munkájukban olyan aukciókra fókuszálnak, ahol a javak egy kombinációjára adható ajánlat. A saját dolgozatomban szempontjából az egyik kulcsmondat a következő: minden Nash-egyensúly keresésre alkalmazott numerikus algoritmus valójában nem BNE-t, hanem “ ϵ -BNE”-t keres, vagyis olyan stratégia együttest, amely esetén minden szereplő legfeljebb ϵ plusz hasznossághoz juthat, ha egyedülként eltér az egyensúlyi stratégiától. Az ilyen típusú algoritmusok esetén tehát indokolt a közelítés pontosságára vonatkozóan valamilyen kis pozitív, nul-

lától különböző értéket megadni, amin belül maradva már úgy tekinthetjük, hogy egyensúlyban vagyunk. A korábban használt algoritmusok (pl. Reeves & Wellman (2004), Vorobeychik & Wellman (2008), Rabinovich et al. (2013)) a stratégiákra vonatkozóan valamilyen korlátozásokkal éltek, például a lehetséges ajánlatok végesisé tételével vagy lineáris stratégiák feltételezésével. Bosshard és szerzőtársai ezen korlátokat igyekeztek feloldani, hogy az algoritmus a teljes, nem korlátozott stratégia halmazon is pontos megoldást adjon. Munkájukban az ε érték nem előre meghatározott, hanem az iteráció eredményeként áll elő, annak robusztusságát egy külön verifikációs lépésben tesztelik. Meghatároznak azonban egy elméleti maximumot - amit a konkrét aukciós helyzetre vonatkozóan ki is számítanak - ami alatti ε esetén már "valódi" ε -BNE-nek tekinthető az egyensúly.

A Nash-egyensúly keresésnél általánosabban tekintve az iterációkat, számos egyéb megállási kritérium is lehetséges. Ezek egyike például a relatív RMSE (vagy NRMSE) érték használata. Ez a mutató megjelenik például Bouallègue et al. (2013) munkájában, ahol képfelismerő algoritmusok orvosi alkalmazása (pl. tumorok felismerése) során használt megállási kritériumként működik – a legalacsonyabb NRMSE értékkel rendelkező becslést választják. A kapott NRMSE értékek esetükben a használt eszköz pontosságától függően kb 0.1 és 2% között alakultak. Egy ettől eltérő megállási kritériumot ismertet Luo et al, (2015) egy minimális átlagköltség problémát megoldó algoritmus esetén. Egyrészt egy iterációs lépésszám maximumot határoznak meg a szerzők, ennyi lépés után mindenképp megállnak. Másrészt az adatsorokban egyik lépésről a másikra történő változás nagyságára vonatkozóan is rögzítenek egy korlátot, ha ez alatt marad a változás, akkor szintén megáll az iteráció. Esetükben ez a korlát 0.01%.

Mindezeket a forrásokat összegezve munkámban a következő megállási kritériumokat használom. Az iteráció egyes lépéseiben adódó optimális ajánlatokat vetem össze, és amennyiben a két ajánlati adatsor közötti NRMSE érték 0.1% alatti, úgy tekintem, hogy Nash-egyensúlyban vagyunk. Amennyiben az NRMSE érték ennél magasabb, de egy adott lépésben történő csökkenés után növekedés következik, úgy az iteráció szintén megáll. Ekkor úgy tekintem, hogy a szereplők az egyensúlyi kimenettől való eltávolodás megelőzése végett állítják meg az iterációt. Ebben az esetben azonban nem valódi, csupán „pseudo-Nash-egyensúly”-i ajánlati függvényt kapunk. Az iterációhoz kapcsolódó további részleteket az 5. fejezetben ismertetem.

4.2. Az elméleti modell felépítése

Az aukcióelmélet kiinduló modellezési keretrendszere

Modelletem a szokásos független értékeléseket feltételező aukcióelméleti keretrendszerben írom fel. Elsőként röviden bemutatom az általános megközelítés leg-

fontosabb elemeit. Ebben a részben az irodalomban szokásos felállást ismertetem: ahol a szereplők az aukción vásárolni szeretnének, az aukció kiírója pedig eladni. Ezt követően térek rá a saját modellem bemutatására, a használt feltételezésekre, illetve arra, miben különbözik az az eset, ahol a szereplők az eladók, és az aukció kiírója szeretne vásárolni.

Az aukcióelméletben használatos modellek esetén egy előre definiált megközelítést szokás alkalmazni. Ebben a keretrendszerben a racionális és kockázatsemleges szereplők az aukcióra bocsátott tárgy(ak)ra vonatkozóan egy-egy értékeléssel rendelkeznek. Ez az értékelés testesíti meg a szereplők aukcionálandó tárgy megszerzésére vonatkozó hasznosságát.

Ez az értékelés minden szereplő esetén egy olyan eloszlásból származik, ami mindenki számára köztudott tudás. Az aukció lejátszása előtt már minden szereplő ismeri a saját konkrét értékelését, vagyis az adott eloszlás rá vonatkozó realizációját. Minden szereplő csak a saját konkrét realizációját ismeri, a többiek értékeléséhez kapcsolódóan pedig csak az eloszlást.

A szereplők saját konkrét értékeléseik ismeretében tesznek tehát ajánlatot az aukción. Az ajánlat úgy kerül meghatározásra, hogy a szereplő a legnagyobb várható hasznosságot realizálja általa. Egy adott ajánlat esetén a várható hasznosság kiszámításához négy elemet kell számszerűsíteni: az adott ajánlattal való nyereség vagy veszteség valószínűségét, illetve az egyik és másik esetben realizálódó hasznosságokat. Ez képlettel a következőképpen írható fel:

$$E(\pi_i(x_i, b_i)) = P_{i,w}(b_i)U_{i,w} + P_{i,l}(b_i)U_{i,l}$$

ahol:

- $\pi_i(x_i, b_i)$ az i -edik szereplő hasznosság- (vagy profit-)függvénye, amely az i -edik szereplő értékelésétől és ajánlatától függ
- x_i az i -edik szereplő értékelése
- b_i az i -edik szereplő ajánlata
- $P_{i,w}(b_i)$ annak a valószínűsége, hogy az i -edik szereplő a b_i ajánlattal nyerni fog
- $U_{i,w}$ a nyereség hasznossága az i -edik szereplő számára
- $P_{i,l}(b_i)$ annak a valószínűsége, hogy az i -edik szereplő a b_i ajánlattal veszteni fog
- $U_{i,l}$ a veszteség hasznossága az i -edik szereplő számára.

Ahogy fent láthattuk az, hogy a nyertesnek pontosan mennyit kell fizetnie bizonyos aukciótípusok esetén csak a nyertes saját ajánlatától függ, míg előfordulnak

olyan aukciók is, ahol a többiek ajánlatai is befolyásolják ezt az összeget. Dolgozatomban mindkét változatra található példa.

A fent bemutatott képletben szereplő hasznosságok az aukció konkrét szabályaitól függenek. Ahogy fent is kitértem rá, a gyakorlatban leggyakrabban alkalmazott szabálycsoport a nyertes fizet. Mivel azt feltételezzük – az irodalomban megszokott módon –, hogy az aukción való részvételnek önmagában nincs költsége, ezért a veszteshez tartozó hasznosság 0. Ennek megfelelően a képlet a nyeres valószínűségének és hasznosságának szorzatára egyszerűsödik.

A valószínűségeknek (vagy a nyertes fizet aukciók esetében csupán a nyeres valószínűségének) meghatározása jelenti a modellezés során a valódi kihívást. Ennek meghatározásakor a többi szereplő értékelésére vonatkozó eloszlásokra lehet támaszkodni. Ez azonban csak egy kiindulópont, hiszen minden szereplő a számára optimális ajánlatot adja be, ami csak speciális esetekben fog megegyezni az értékelésével. Amikor tehát a nyeres és a vesztes valószínűségét igyekeznek a szereplők kiszámítani, valójában nem az értékelések eloszlása, hanem a többiek ajánlati függvényei azok, amikre vonatkozóan feltételezéssel kell élniük.

Az ajánlati függvény változója az értékelés: ez a függvény minden értékelés esetén megmondja, hogy mi az az ajánlat, amit az adott értékelés mellett a szereplő bead majd. Az irodalomban ezt a függvényt $\beta(x)$ -ként szokás jelölni, ahol x az értékelés.

A szereplők tehát azt az ajánlati függvényt fogják választani, ami minden értékelésük esetén a várható hasznosságukat maximalizáló ajánlatot adja meg. Mivel ez minden értékelés esetén kiszámítható (bizonyos feltételezések mellett), így kialakul az az optimális $\beta^*(x)$ függvény, melynek értelmezési tartománya megegyezik az értékelés eloszlásának értelmezési tartományával, értékkészlete pedig megmutatja az optimális ajánlatok halmazát.

Minden aukcióelméleti modell esetén ezen optimális ajánlati függvények (a szakirodalomban szintén bevett kifejezés a licitfüggvény) meghatározása a kulcs. Ahhoz, hogy egy szereplő meghatározhassa a saját optimális ajánlati függvényét – ahogy fent bemutattam – feltételezéssel kell élnie a többi szereplő ajánlati függvényére vonatkozóan. Az, hogy mi ez a feltételezés nagyban befolyásolja magát az ajánlati függvényt, és ezáltal az aukció várható eredményét, a kikiáltó várható bevételét, stb., tehát az aukció minden fontos paraméterét.

A szakirodalomban alapvetően két megközelítéssel találkozunk ezen a téren: az első esetén a modellezők arra törekednek, hogy meghatározzák a Nash-egyensúlyi ajánlati függvényeket, vagyis minden szereplő esetén azt az ajánlati függvényt, ami a többi szereplő ajánlati függvényeire vonatkozóan a legjobb válasz ¹. Akkor vagyunk Nash-egyensúlyban, ha minden szereplő ajánlati függvénye a legjobb válasz

¹Legjobb válasznak nevezzük ebben az esetben azt az ajánlati függvényt, ami minden értékelés esetén a hasznosságmaximalizáló ajánlatot határozza meg, a többi szereplő rögzített ajánlati függvényei esetén.

a többi szereplő ajánlati függvényére. Szimmetrikus esetben ez azt jelenti, hogy mindenki ugyanazt az ajánlati függvényt használja.

Ez azonban a legegyszerűbb aukcióktól eltekintve nagyon komplex feladat, sok esetben vezet explicit alakban nem, csak numerikus közelítéssel megoldható differenciálegyenletekre. A legtöbb esetben az ajánlati függvényt csak „megsejteni” lehet, ekkor a számítás során már csak azt kell ellenőrizni, hogy valóban Nash-egyensúlyban vagyunk-e.

A feladat nehézsége miatt egy másik megközelítés is megszokott a szakirodalomban. Az ajánlati függvények pontos meghatározása helyett feltételezésekkel is lehet élni: feltehető, hogy a szereplők a Nash-egyensúly megkeresése helyett a többiek viselkedésére, ajánlataira vonatkozóan élnek feltételezéssel (például Anatolitis & Welisch (2017)). Amennyiben nem (vagy nem csak) a szereplők értékelésére vonatkozóan, hanem magukra az ajánlatokra vonatkozóan élnek a szereplők feltételezéssel, jelentősen leegyszerűsödik a modell megoldása. Ez a megközelítés nem feltétlenül vezet Nash-egyensúlyi ajánlati függvényekhez, ugyanakkor a valóságban nem elrugaszkodott azt feltételezni, hogy a szereplők a Nash-egyensúlyi ajánlati függvényük megkeresése helyett valamilyen egyszerűsítéssel élve optimalizálnak ajánlatadásukor.

Dolgozatomban ezt a két megközelítést próbálom ötvözni: a második megközelítésből indulva egy iteráció segítségével próbálom megkeresni a Nash-egyensúlyi ajánlati függvényeket. Az adott értékelésekhez tartozó optimális ajánlatot először a többi szereplő ajánlataira vonatkozó induló eloszlásfeltételezés mellett számítom ki. Az így kiszámított ajánlati függvény esetén ellenőrzöm, hogy az adott értékeléseloszlást és ajánlati függvényt figyelembe véve a feltételezett ajánlatieloszlást kapom-e vissza, pontosabban kiszámolom, hogy a feltételezett és a kapott ajánlatok mennyire vannak egymástól távol. Ennek számszerűsítésére az NRMSE értéket használom.

Ha ez az érték elég kicsi, akkor máris Nash-egyensúlyban vagyunk, hiszen a legjobb válasz éppen a többi szereplőre vonatkozóan feltételezett ajánlati magatartással egyezik meg. Így, ha minden szereplő így ad ajánlatot, akkor mindenki a legjobb választ adta. Ha egy másféle ajánlatadási mintázatot kapok, akkor ellenőriznem kell, hogy ez legjobb válasz-e abban az esetben is, ha a többiek éppen ezt az ajánlati függvényt alkalmazzák. Ez tehát egy ismételt optimalizációt jelent.

Ha a kapott ajánlatok megegyeznek a feltételezettekkel, akkor Nash-egyensúlyban vagyunk. Ha nem, akkor ezt az új ajánlati eloszlást feltételezve ismét elvégzem az optimalizációt, majd ellenőrzöm, hogy Nash-egyensúlyban vagyok-e. Ezt az iterációt addig folytatom, amíg a lehetséges legközelebb nem kerülök egy Nash-egyensúlyi kimenethez.

	I. aukció	II. aukció	III. aukció
2017	200	200	200
2018	200	182,5	182,5
2019	175	500	150

4.1. táblázat. A német naperőművi aukciókon eddig támogatott kapacitások mennyiségei MW-ban, 2017-2019, forrás: Bundesnetzagentur (2019)

A megújulóenergia-támogatásra vonatkozó aukció elméleti modellje

A német napelemekre vonatkozó aukciók szabályait már röviden ismertettem a 2. fejezetben. Ebben az alfejezetben még egyszer részletesen kitérek a pontos szabályokra, valamint bemutatom, hogy ezek közül mik azok az elemek, amiket figyelembe veszek a modellezésnél, és mik azok, amiktől kénytelen vagyok eltekinteni. A szabályok ismertetését követően bemutatom a felépített aukcióelméleti modellt, és a felhasznált feltételezéseket.

A német aukció tehát egy ajánlati áras tender, ahol előre meghatározott mennyiségű megtermelt áramra vonatkozik majd a támogatás. A kiosztott támogatás lebegő prémium típusú, eredeti mértékegysége €/ct/kWh. Én ehelyett az áramáraknál szokásos €/MWh mértékegységet fogom használni, hogy a kapott eredmények könnyebben összevethetőek legyenek a nagykereskedelmi áramárakkal. A lényegen azonban ez nem változtat, a támogatás megtermelt energiaegységekre vonatkozik.

Az aukció mennyiségi korlátja azonban nem a teljes támogatott árammennyiségre vonatkozik, hanem arra a maximálisan támogatható kapacitásmennyiségre, aminek minden megtermelt egység áramára majd támogatás fog vonatkozni. Ahogy fent bemutattam, ez a mennyiség minden 2017-ben megrendezett aukción 200 MW volt, 2018 és 2019 során némileg ettől eltérő mennyiségekkel találkozhattunk. A pontos mennyiségeket a 4.1. táblázatban foglaltam össze.²

A fentieket alapul véve a modellemben 200 MW-os mennyiségi korlátot feltételezek. A múltbeli adatokat a résztvevők száma, és az átlagos projektnagyság esetén is megvizsgáltam. Ezt mind a kilenc aukció esetén hasonló módon a 4.2. és a 4.3. táblázatokban foglalom össze.

Mindezeket figyelembe véve 100 résztvevőt feltételezek a modellemben, egyenként 5 MW-os projektnagysággal. Ez azt jelenti, hogy a 100 indulóból pontosan 40 nyertes lesz, 60 induló pedig üres kézzel távozik majd. A szereplők esetén tökéletes szimmetriát feltételezek. Ennek két oka van: egyrészt egy technológiasemleges aukcióról beszélünk, másrészt korlátozottan állnak rendelkezésre olyan típusú információk, amik alapján különböző feltételezésekkel lehetne élni egyes szereplőcsoportok esetén.

²A korábbi, 2015 és 2016 folyamán rendezett aukciók adatait nem használtam a modell felépítésekor, mert a rendszer az évek folyamán finomodott, ezért úgy gondolom az elmúlt 3 év aukcióinak adatai relevánsabbak.

	I. aukció	II. aukció	III. aukció
2017	97	133	110
2018	79	59	76
2019	80	163	105

4.2. táblázat. A német naperőművi aukciókon részt vevő szereplők száma, 2017-2019, forrás: Bundesnetzagentur (2019)

	I. aukció	II. aukció	III. aukció
2017	5,0	4,9	6,9
2018	7,2	6,1	6,9
2019	5,8	5,3	5,3

4.3. táblázat. A német naperőművi aukciókon beadott átlagos projektenkénti kapacitás MW-ban, 2017-2019, forrás: Bundesnetzagentur (2019)

A szakirodalomban találkozhatunk olyan modellekkel (pl. Anatolitis, 2016), ahol a szereplők megkülönböztetése tulajdonosi csoportok szerint történik (pl. magánbefektetők, önkormányzatok vagy energiaközösségek), de a szereplők típusonkénti megoszlásáról a korábbi napelem aukciókon nem volt elérhető információ. Másrészt ez a fajta megkülönböztetés jelentősen bonyolítaná a számítások elvégzését a modellben, így a szimmetrikus felírás mellett döntöttem.

A modellezés során a következő tényezőket szintén nem veszem figyelembe: a szereplőknek az aukción való részvételhez ajánlati biztosítékot kell rendelkezésre bocsátaniuk, illetve csak bizonyos fokig már előkészített projektekkel lehetséges a részvétel. Ez praktikusán azt jelenti, hogy az aukción való elindulás költsége nem 0, ugyanakkor feltehető, hogy a befektetők az aukciótól függetlenül mindenképpen szeretnék megvalósítani a beruházást, ezért a projekt előkészítés költsége tekinthető elsüllyedt költségnek.

Szintén nem veszem figyelembe a modellezés során, hogy az aukció kihirdetésekor közzétételre kerül egy maximum ár is, ami feletti ajánlatok érvénytelennek minősülnek. Ezek az elemek számos korábbi kutatás alapján elmondható, hogy befolyással vannak a szereplők ajánlatadási stratégiájára, azonban dolgozatomban ettől eltekintek. Ahogy látni fogjuk, a legnagyobb értékeléssel rendelkező szereplő értékelése az iterációs megközelítés során természetes felsőkorlátként szolgál, ezért ez az egyszerűsítés nem bír komoly jelentőséggel. Lehetséges további kutatási irány ezeknek a további elemeknek a fenti modellbe történő beillesztése.

A szereplők értékelése a modellemben megegyezik a projektjük $LCOE'$ értékével. Az erre vonatkozó eloszlás levezetését a 3. fejezetben ismerttettem. Az $LCOE'$ érték azzal a támogatásszinttel egyezik meg, ami ahhoz szükséges, hogy a projekt éppen megtérüljön az elvárt hozamszinten, az áramárakra és a termelési lehetőségekre vonatkozó jövőbeli feltételezések mellett.

Itt szintén érdemes kitérni egy egyszerűsítésre. A szereplők elvárt hozamszintje

(a szimmetriának megfelelően) teljesen egységes, egy előre rögzített érték. Ez az érték magába sűríti a szereplők minden a piacra és a projektre vonatkozó várakozását, az esetlegesen a projektre felvett hitelek kamatvárakozásait, a projekt kockázatot, stb., vagyis minden olyan elemet, ami a projekt finanszírozása során fontos lehet. Ahogy a 3. fejezetben bemutattam, ez a feltételezett WACC érték hatással van az $LCOE'$ értékre, ezt a hatást ott szemléltettem is. A dolgozat későbbi részében azonban már nem foglalkozom ezzel, a szimmetria miatt minden szereplő esetén egységes WACC-feltételezéssel élek. Ennek a feloldása szintén egy lehetséges irány a dolgozat továbbfejlesztése kapcsán.

Az $LCOE'$ pontos eloszlását explicit alakban nem határoztam meg, azonban a beruházási költségek eloszlását adottnak véve generálható egy ennek megfelelő véletlen beruházási költség, amiből már egyértelműen meghatározható az ehhez tartozó $LCOE'$ érték. Így meghatározható a 3. fejezet végén bemutatott szimulált eloszlás az $LCOE'$ értékekre vonatkozóan.

Mindezeket figyelembe véve már konkrét értékekkel felírható a szereplők várható profit függvénye. Ahogy az általános aukcióelméleti modellek esetén bemutatam, a várható profit a nyertes fizet aukciók esetén a nyeres valószínűségének és a nyeres hasznosságának szorzatára egyszerűsödik.

A modell logikájából adódóan a továbbiakban a várható profit alatt az egy egység megtermelt villamos energiára eső várható profitot értem. Ennek oka, hogy az értékelés, az ajánlat, az elnyert támogatás és a profit mértékegysége így megegyezik. Mivel a termelési profilt és az áramárakat is fixnek tekintem a jövőre vonatkozóan, ezért ezzel a modell nem veszít általánosságából, hiszen minden €/MWh-ban meghatározott várható profitból egyértelműen meghatározható a teljes projekt élettartam alatt összesen várható profit.

Mindezt rögzítve a várható hasznosság meghatározása már egyszerű:

$$U_{j,w} = b_j - LCOE'_j$$

ahol:

- $U_{j,w}$ a nyeres hasznossága a j. szereplő számára
- (b_j) a j. szereplő ajánlata
- $LCOE'_j$ a j. szereplő értékelése, vagyis egy egység áramra vetített költsége

A nyeres valószínűsége némileg komplikáltabb feladat. Ahhoz, hogy erről érdemben mondani tudjon valamit, minden szereplőnek feltételeznie kell valamit arról, hogy mekkora valószínűséggel adnak a többiek egy adott számnál (az ajánlatánál) kisebb vagy nagyobb ajánlatot. Tehát valójában a többiek ajánlatainak eloszlásáról kell feltételezéssel élni.

Ez abban az esetben, ha előre lenne a szereplőknek egy sejtése az optimális ajánlati függvényről megtehető lenne az értékelések eloszlásának és ennek a függvénynek a figyelembe vételével. Jelen modellezés során azonban a szereplők nem rendelkeznek ilyen sejtéssel, ezért az iteráció indításához a szakirodalomban használt korábban bemutatott (Anatolitis, 2016, Anatolitis & Welisch, 2017) módszert veszem alapul: magukra az ajánlatokra vonatkozóan élnek majd a modellben a szereplők egy eloszlás feltételezéssel.

Ebben az első lépésben tehát nincs szükség az értékelés (vagyis az $LCOE'$) eloszlásának ismeretére, egy attól független ajánlati eloszlás is feltételezhető. Anatolitis (2016) alapján a feltételezett ajánlati eloszlás egy normális eloszlás lesz. Az eloszlás várható értékét és szórását a generált 10 000 darab $LCOE'$ érték átlagaként és szórásaként definiálom, ezek az értékek: 65,84 és 20,12. Nevezzük a továbbiakban ezt az eloszlást F_1 -nek.

A felírás logikája a következő. A j -edik szereplő akkor nyerhet, ha nála legfeljebb 39 jobb ajánlat érkezett be. A jobb ajánlat ebben a keretrendszerben azt jelenti, hogy a beadott ajánlat a j -edik szereplőénél kisebb. Tehát a szokásos aukcióelméleti formulákkal ellentétben, melyek általában eladási aukciókra vonatkoznak itt majd az ajánlatokra vonatkozó eloszlásfüggvény és a -1 -szerese fordított szerepet játszik.

Annak a valószínűsége, hogy egy adott szereplő ajánlata kisebb (vagy egyenlő), mint a j -edik szereplőé $F_1(b_j)$ (ahol b_j a j -edik szereplő ajánlata) a fent definiált eloszlás alapján. Annak a valószínűsége pedig, hogy szigorúan nagyobb $1 - F_1(b_j)$. Az eloszlás függvény ilyen módon történő felírása az angolszász irodalomra jellemző, de ahogy látni fogjuk az iteráció során könnyebb lesz így definiált F függvényekkel dolgozni.

A nyeres valószínűségének felírásához azt kell összeszámolnunk, hogy mi annak a valószínűsége, hogy legfeljebb 39 darab b_j -nél szigorúan kisebb ajánlat érkezik be, és ezzel párhuzamosan legalább 61 nála nagyobb egyenlő. A valószínűség felírásakor figyelembe kell venni azt is, hogy éppen 39, 38, 37, stb. szereplőt $\binom{100}{39}$, $\binom{100}{38}$, $\binom{100}{37}$ stb. módon lehet kiválasztani.

A szereplők a modellemben a számítás során azzal az optimista feltételezéssel élnek, hogy amennyiben egyenlőség áll fenn az ő és egy (több) másik szereplő(k) ajánlatai között úgy, hogy ezek éppen a 40. és 41. (42., 43., stb.) ajánlat, akkor ő biztosan díjazott lesz. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy a szereplők eltekintenek a döntetlen lehetőségétől. A számításokat elvégeztem a döntetlen figyelembe vételével is. Mivel a döntetlen valószínűsége nagyon kicsi, ezért ez az egyszerűsítés az eredményeket nem befolyásolta érdemben. Ez abból fakadhat, hogy az indulók 40%-a lesz nyertes az aukción, és átlagosan 7-8%-nak egyezik meg az értékelése (ez a 0-s $LCOE'$ értékelésűek csoportja), így valóban nincs komoly jelentősége a döntetlennek. Ha azonban a jövőben egyre több indulónak érne meg a projektjét támogatás nélkül is felépíteni, a döntetlen szerepe felértékelődhet.

Tekintve, hogy az eloszlás függvény esetén az angolszász felírást használom (vagyis $F(x) = P(X \leq x)$), azonban annak a valószínűsége érdekel, hogy legfeljebb 39 darab b_j -nél szigorúan kisebb ajánlat érkezik be, így az első tagba $F_1(x)$ helyett $(F_1(x) - P(b_j))$ kerül, ahol $P(b_j)$ a b_j ajánlat előfordulásának valószínűsége (ami a legtöbb ajánlat esetén 0). A második tag pedig a komplementer valószínűség, vagyis $1 -$ ez az érték lesz.

Most már minden adott, hogy pontosan felírhatjuk a nyeres valószínűségét egy adott ajánlat esetén, 100 induló és 40 nyertes mellett. Ez az előzőekben használt jelöléseket követve a következőképpen tehető meg a j -edik szereplőre vonatkozóan:

$$P_{j,w}(b_j) = \sum_{i=0}^{39} \binom{99}{i} (F_1(b_j) - P(b_j))^i (1 - (F_1(b_j) - P(b_j)))^{99-i}$$

ahol $P(b_j)$ értéke egyszerűen $F_1(b_j) - F_1(b_j - \varepsilon)$ (a konkrét számítások során ε értéke 10^{-10}).

Mindezek segítségével pedig felírható a várható profit függvény:

$$E(\pi_j(x_j, b_j)) = P_{j,w}(b_j) U_{j,w}(x_j, b_j) = \sum_{i=0}^{39} \binom{99}{i} (F_1(b_j) - P(b_j))^i (1 - (F_1(b_j) - P(b_j)))^{99-i} (b_j - x_j)$$

Egy konkrét értékelés, vagyis $LCOE'$ érték (melyet itt x_j -ként jelöltem) esetén tehát ez lesz az a kifejezés, amit a szereplőknek maximalizálniuk kell b_j -ben. Az ajánlatok eloszlásának meghatározása itt is szimuláció segítségével történik: 10 000 különböző értékelés esetén keresem meg a hozzájuk tartozó, várható profitot maximalizáló b_j ajánlatot.

5. fejezet

Az egyensúly megkeresése

AZ EGYENSÚLY-KERESÉSI MECHANIZMUST, melyet a dolgozatomban alkalmazok röviden már ismertettem a korábbi fejezetekben. Ebben a részben részletesen is bemutatom a módszert, és ismertetem a pontos számításokat, valamint az iteráció egyes lépései során kapott eredményeket. Az egyenáras és az ajánlati áras aukció szignifikánsan eltér egymástól, hiszen ahogy látni fogjuk egészen más ajánlatadási stratégia jellemzi a két aukciótípust. Ezért a két szabályrendszert külön vizsgálom.

5.1. Egyenáras aukció

Ahogy korábban kitértem rá, az egyenáras aukció esetén nincs szükség bonyolult optimalizációs algoritmus alkalmazására. Egy egyszerű logika mentén levezethető a szereplők optimális stratégiája – függetlenül a többiek ajánlataitól. Ez a gondolatsor a következő.

A megújuló aukcióknál maradva (bár a gondolatmenet bármilyen egyéb egyenáras aukcióra is alkalmazható) a szereplők által kapott támogatás nem függ közvetlenül az általuk beadott ajánlattól. Amennyiben nyernek, a legalacsonyabb már nem nyertes ajánlatnak megfelelő támogatást kapják. A nyertesek tehát semmiképpen sem lesznek ármeghatározók, biztosan egy az ő ajánlatuknál nagyobb (így már nem nyertes) ajánlat szabja meg, hogy mekkora támogatást kapnak.

Éppen ezért egészen addig érdemes lemenniük az ajánlatukkal, amíg el nem érik a valós értékelésüket - vagyis azt a támogatási szintet, ami mellett a beruházásuk még éppen megtérül a kívánt hozamszint mellett, tehát a fent kiszámított $LCOE'$ értéket -, hiszen így növelik a nyeres valószínűségét, miközben a nyereskor elért várható hasznosság nem változik: az továbbra is az utolsó már éppen nem nyertes ajánlat várható értéke. Természetesen ennél alacsonyabb támogatási szintet már nem fognak megadni ajánlatként, hiszen ekkor előfordulhatna az $LCOE'$ értéküknél alacsonyabb ármeghatározó ajánlat, ami számukra már negatív profitot jelentene. Így minden szereplő éppen az értékelésének megfelelő ajánlatot fogja adni.

Azzal tehát, hogy a nyereshez tartozó kifizetés nem, csupán a nyeres valószínűsége függ direktben a beadott ajánlattól, elérhető, hogy a szereplők elárulják a valódi értékelésüket. Mivel ez minden esetben optimális ajánlatnak tekinthető, a többiek ajánlataitól függetlenül, ezért bármi is legyen a többiek ajánlata, ez biztosan legjobb válasz. Éppen ezért akkor is legjobb válasz, amikor a többiek is ugyanezen logika mentén a saját értékelésüknek megfelelő ajánlatot adnak be. Ez pedig minden szereplőre igaz. Az identitás függvény, mint ajánlati függvény tehát az egyenáras aukción Nash-egyensúlyi licitfüggvény.

5.2. Ajánlati áras aukció

A Bevezetésben bemutatott egyensúly keresési algoritmus alkalmazásának tehát csak az ajánlati áras esetben van értelme. A következőkben lépésről lépésre bemutatom pontosan hogyan működik az iteráció, majd az egyes lépések során kapott eredményeket is ismertetem. A módszer lényege, hogy egy adott ajánlatokra vonatkozó eloszlásból indulok ki, és megvizsgálom, hogy erre mi az optimális ajánlatadási stratégia, és ez milyen ajánlatokra vonatkozó eloszlást indukál.

Amennyiben az így kapott ajánlati eloszlás eltér az előző lépésben feltételezettől, úgy ezt az új eloszlást teszem be a modellembe, és ismét meghatározom az optimális ajánlatadást erre vonatkozóan. Az ajánlati függvényeket (egész pontosan a kapott ajánlatokat az értékelések függvényében) szintén ábrázolom, és egyezőségüket vizsgálom az iteráció egyes lépései végén.

Az iterációt addig folytatom, amíg két egymást követő esetben az ajánlatok eloszlása meg nem egyezik egymással. Ahogy fent már említettem, ennek az egyezésnek a mérőszáma az NRMSE érték. Erre vonatkozóan egy 0-tól eltérő küszöbérték használata azért is lehet indokolt, mert a megvalósítás során előfordulhat, hogy a számítások során használt közelítések miatt nem tudok olyan ajánlati függvényt találni, ami esetén tökéletes egyezőségről beszélhetünk a feltételezett és a kapott ajánlatok esetén. Az irodalom alapján (Luo et al, 2015) ezt a küszöbértéket 0,1%-ban határozom meg. Ha az NRMSE ez alá csökken, akkor kijelenthető, hogy Nash-egyensúlyban vagyunk.

A szereplők egyensúlykeresése azonban (szintén az irodalomban fellelhető megoldásokra építve, (Bouallègue et al., 2013)) egy másik feltétel alapján is leállhat: az iterációt abban az esetben is lezárom, ha az NRMSE érték egyik lépésről a másikra nő, úgy, hogy az ezt megelőző lépésben csökkent. Ekkor ugyanis egy lokális minimumhoz érkeztünk az NRMSE érték tekintetében, vagyis az adott ajánlatadási stratégia az iterációban előtte és utána szereplőhöz képest „jobban hasonlít” egy Nash-egyensúlyra. Ha ilyen megállási kritérium mellett találunk egy ajánlati függvényt, akkor ezt „pseudo-Nash-egyensúlyi” ajánlati függvénynek nevezem. Ahogy látni fogjuk, az iteráció már ebben az esetben is alacsony NRMSE értékeket produkál, de ezek 0,1%-nál magasabbak.

Mivel a szakirodalom nem nyújt egyértelmű iránymutatást annak tekintetében, hogy pontosan mekkora NRMSE érték esetén érdemes az iterációt leállítani, ezért érdemes megvizsgálni azt is, hogy mi történik, ha a fenti két feltételt valamilyen módon kombináljuk: például egy lokális minimum esetén csak akkor áll meg az iteráció, ha az NRMSE érték legfeljebb a valóban Nash-egyensúlyinak gondolt 0,1%-os érték 2,5-szeres, 5-szöröse, 10-szerese.

A későbbiekben bemutatom, hogy mennyiben kapok eltérő eredményt akkor, ha az első lokális minimum megtalálásakor a szereplők elfogadják a kapott ajánlati függvényt, függetlenül az NRMSE érték nagyságától, illetve, ha továbblépnek egy olyan lokális minimumig, ahol az NRMSE érték még alacsonyabb. Ahogy látni fogjuk, az aukciók várható összköltsége jelentősen eltér egyik, illetve másik esetben.

Az, hogy az iteráció pontosan hol áll le azért fontos, mert feltételezem, hogy a szereplők az így megtalált ajánlati függvényt tekintik a lehető legjobb stratégiának, és így ezt fogják az aukción alkalmazni, mint „Nash-egyensúlyhoz leginkább közeli” stratégiát, akkor is, ha valójában ez a stratégia nem tekinthető Nash-egyensúlyinak. Ez a feltételezés természetesen csak akkor intuitív, ha az NRMSE érték már ekkor is kellően alacsony.

A vizsgált esetek

Mielőtt részletesen rátérnék az eredmények ismertetésére, röviden összefoglalom, hogy az első lépésben normális ajánlati eloszlást feltételező, döntetlentől eltekintő, 10 000 adatpontot tartalmazó iteráció mellett milyen egyéb futtatásokat végeztem.

Ezek azt hivatottak bemutatni, hogy az eredmények robusztusnak tekinthetők, nem függenek jelentősen sem a kiinduló ajánlati feltételezéstől, sem a döntetlen elhanyagolásától vagy figyelembe vételétől.

Az első kiegészítő számítás során megnéztem, hogy mi történik, ha a normális eloszlás helyett egyenletes eloszlást feltételezek az iteráció első lépésében. Az egyenletes eloszlás paramétereit a generált 10 000 értékelés minimumaként és maximumaként határoztam meg, vagyis 0 és 99,6 €/MWh közé eső ajánlatokat feltételeznek a szereplők az első lépésben.

A második számítás során a szereplők a döntetlen lehetőségével is kalkulálnak. Így a várható hasznosságuk felírása a következőképpen módosul.

$$E(\pi_j(x_j, b_j)) = P_{j,w}(b_j)U_{j,w} = \sum_{i=0}^{39} \sum_{l=0}^{99-i} \frac{99!}{i!l!(99-i-l)!} (F(b_j) - P(b_j))^i P(b_j)^l \frac{\min(40-i; l+1)}{l+1} (1 - F(b_j))^{99-l-i}$$

Ebben az esetben a szereplők már figyelembe veszik azokat az eseteket is, amikor ugyan náluk legfeljebb 39 szigorúan kisebb ajánlat érkezett be, azonban ők a többi szereplő közül valahánnyal azonos ajánlatot adtak be. Ezek közül az esetek közül pedig az lesz számukra érdekes, amikor a döntetlen utáni sorsolás során ők

vesztesként kerülnek ki. Ezt a lehetőséget is figyelembe véve tehát valamelyest – bár csekély mértékben – csökken a nyerés valószínűsége. Ahogy látni fogjuk, ez azonban nem módosítja érdemben a kapott eredményeket.

Az optimalizáció automatizálása során egy olyan függvényillesztési technikát alkalmaztam, ami jelentősen megnövelte az optimalizáció idejét. Éppen ezért a kiegészítő futtatásokat csak 1000 adatpontra végeztem el, vagyis az optimalizáció során 1000 értékelés mellett számítottam ki a várható bevételt maximalizáló ajánlatot. Röviden arra is kitérek majd, hogy mekkora hatása volt, ha ugyanazt a számítást 1000 vagy 10 000 adatponttal végeztem el – előzetesen elmondható, hogy nem túl nagy, így az 1000 adatpontra elvégzett számítások eredményei biztonsággal figyelembe vehetők.

1. lépés: Optimális ajánlatok keresése a feltételezett ajánlati eloszlás (F_1) esetén

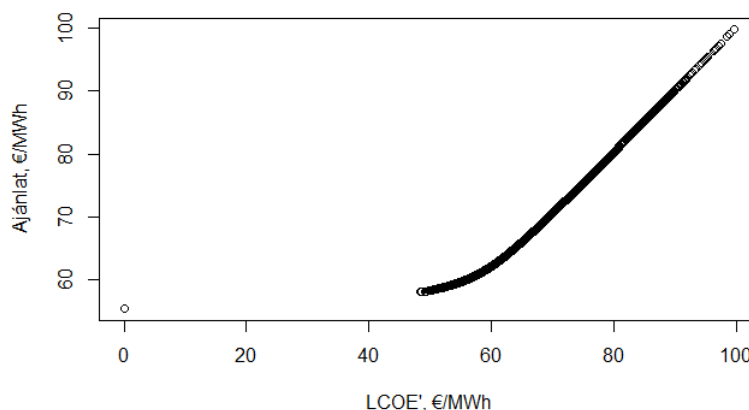
Az első lépésben tehát egy előre rögzített feltételezett ajánlati eloszlásból indulok ki. Ez, ahogy fent bemutatam egy normális eloszlás, melynek a korábban szimulált 10 000 $LCOE'$ érték átlaga a várható értéke, szórása pedig ezen adatsor szórásával egyezik meg, nevezzük F_1 -nek.

A Nash-egyensúly ellenőrzése a következőképpen történik. Első lépésként meghatározom az optimális ajánlatadási viselkedést, vagyis megnézem, hogy különböző $LCOE'$ értékek esetén mi lenne az optimális ajánlat. Ha az így kapott ajánlatok eloszlása megegyezik F_1 -gyel, akkor Nash-egyensúlyban vagyunk, hiszen ekkor – a szimmetria miatt - minden szereplő legjobb válasza a többiek ugyanilyen ajánlatadására éppen a feltételezett.

Az optimális ajánlatadás kiszámításához elsőként meghatározom, hogy mi lesz a nyerés valószínűsége a különböző ajánlatok esetén. Az alfejezetben szereplő ábrák nagy része a könnyebb áttekinthetőség érdekében a 7. függelékben található meg.

Az ajánlatoknak egy viszonylag szűk sávja esetén találunk csak jól láthatóan 0 és 1 közötti értékeket: 50 €/MWh-s ajánlat esetén a nyerés valószínűsége már 0,9999 feletti, míg 70 €/MWh-s ajánlat esetén már kevesebb, mint 0,00013. A meghatározott valószínűségek segítségével kiszámítható az egyes értékelések esetén a várható profitot maximalizáló ajánlat. Ehhez ismét az R szoftver „optimize” parancsát használom.

A kapott optimális ajánlatokat az értékelések függvényében ábrázolva megkapom az ajánlati függvényt. Ezt a 10. ábrán mutatom be. A könnyebb átláthatóság kedvéért ábrázolás segítségével mutatom be, hogy mennyire különböző a kapott ajánlati függvény az előző lépésben szereplőnél (vagyis a többi szereplőre feltételezett ajánlati viselkedésnél). Emellett számszerűsítem is ezt a különbséget, vagyis a feltételezett és kapott ajánlatok közötti NRMSE értéket is kiszámítom. Mivel a



5.1. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_1 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra

legelső lépésben nem 10000 konkrét ajánlatból indulok ki, hanem normális eloszlású ajánlatokat feltételezek, ezért itt a későbbiekben használt NRMSE helyett azt vizsgálom, hogy a kapott 10 000 optimális ajánlat normális eloszlást követ-e. A 7-8%-nyi egyező ajánlat miatt egyértelműen megállapítható, hogy nem, így az iteráció nem áll le.

Ahhoz, hogy továbbléphessek, meg kell határoznom az optimális ajánlatokra vonatkozó eloszlást. Ehhez, ahogy fent bemutattam első lépésben a generált 10000 $LCOE'$ érték mindegyikére meghatározom az optimális ajánlatot. Ha visszakaptam volna a feltételezett eloszlást, (F_1 -et), akkor az ez alapján meghatározható ajánlati függvény is megegyezne az előzőleg kapott-tal, tehát akkor Nash-egyensúlyban lennénk. Ha más eloszlást kapok, akkor további vizsgálat szükséges: ugyanis lehetséges, hogy a szereplők a most kapott ajánlati eloszlás esetén (nevezzük F_2 -nek) is ugyanazt a legjobb választ adnák, mint F_1 feltételezésekor. Amennyiben ez a helyzet, úgy Nash-egyensúlyra vezetne a többi szereplőről való normális ajánlatadási eloszlás feltételezése. Ahogy látni fogjuk, nem ez történik, de először vizsgáljuk meg a kapott F_2 eloszlást.

Ahhoz, hogy a következő optimalizációt fel tudjam írni a 10 000 adatpontra illesztenem kell egy eloszlásfüggvényt. Tekintettel arra, hogy az iterációt minél inkább automatizált módon igyekszem felírni, a függvény illesztésnek is automatikusnak kell lennie. Ehhez a kapott ajánlatokat első lépésként sorbarendezem növekvő módon, és ábrázolom a sorszámuk függvényében. Az eloszlásfüggvény meghatározásának logikája a következő. Az ábrán szereplő pontok koordinátáit értelmezhetjük úgy, hogy az y koordinátához tartozó ajánlatnál kisebb (vagy egyenlő) ajánlat beérkezésének valószínűsége éppen a pont x koordinátája osztva 10 000-rel - hiszen az x koordináta a sorbarendezés miatt az adott ajánlat sorszámát mondja meg a generált 10 000 ajánlatból. Az 500. ajánlatnál kisebb ajánlat beérkezésének va-

lőszínűsége tehát $\frac{500}{10000}$, míg a legnagyobb ajánlatnál kisebb ajánlat beérkezésének valószínűségét ebben a keretrendszerben már 1-nek veszem ($1 = \frac{10000}{10000}$).

Ily módon az ábrázolt függvény némileg módosított inverze fogja megadni az eloszlásfüggvényt. Az első ilyen változtatás, hogy a sorszárok helyett azok 10 000-ed részével számolok (hogy valószínűségeket kapjak). A módosítás ezentúl egyrészt abból áll, hogy az egyes pontok között lineáris interpolációt végzek, másrészt pedig abból, hogy figyelembe veszem, hogy bizonyos ajánlatok egynél többször szerepelnek. Ezekben az esetekben a függvény nyilvánvalóan nem invertálható, így a következő megközelítésre van szükség – ezt egy egyszerű példán keresztül szemléltetem.

Tegyük fel, hogy 6 beérkezett ajánlatból szeretném az ajánlatok eloszlásához tartozó F függvényt felírni. A beérkezett sorba rendezett ajánlatok legyenek a következők: 1,2,3,3,4,5. Ekkor:

$$F(1) = \frac{1}{6}, F(2) = \frac{2}{6}, F(4) = \frac{4}{6}, F(5) = \frac{5}{6}, F(6) = \frac{6}{6}.$$

1-nél kisebb x -ekre a függvény értéke 0, 6-nál nagyobb egyenlő x -ekre 1, a köztes szakaszokon pedig lineárisan interpolálunk, tehát pl.: $1 < x < 2$ -re $F(x) = F(1) + \frac{(x-1)(F(2)-F(1))}{(2-1)}$.

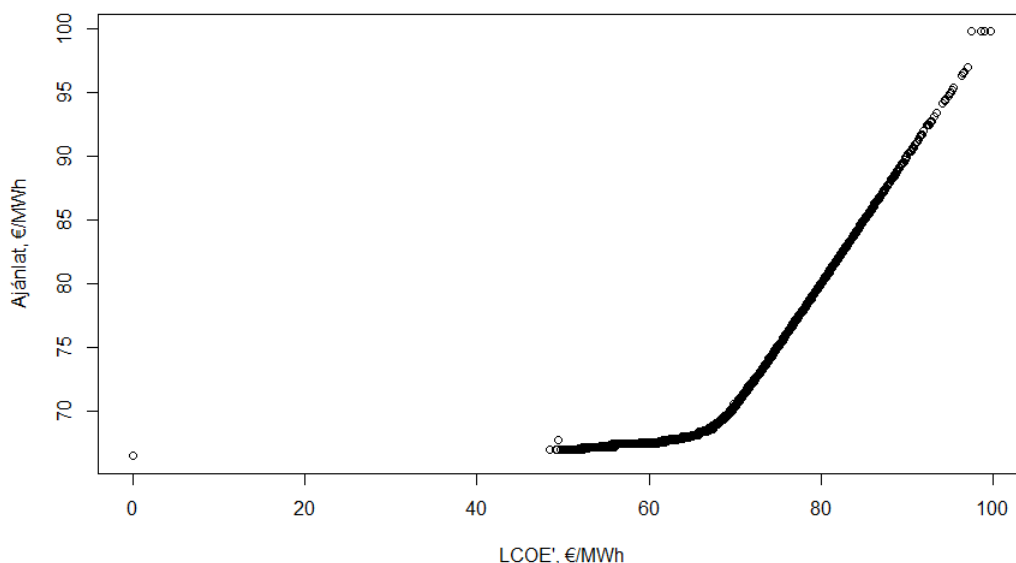
A fenti logika mentén definiált függvény az eloszlásfüggvény minden elvárt tulajdonságával rendelkezik:

- $F(x) = P(X \leq x)$
- csak 0 és 1 közötti értékeket vesz fel
- monoton nő,
- jobbról folytonos
- és $-\infty$ -ben a határértéke 0, $+\infty$ -ben pedig 1.

Az iteráció egyes lépésiben kapott eloszlásfüggvényeket a Függelékben mutatom be.

2. lépés: Optimális ajánlatok keresése az 1. lépés során kapott ajánlati eloszlást (F_2) feltételezve

Második lépésként tehát kiszámolom, hogy az F_2 ajánlati eloszlást feltételezve mi lesz az optimális ajánlatadás, és ebből milyen ajánlati eloszlás adódik. Utóbbit összevetem az első lépésben kapott ajánlati eloszlással. Ha eltérő értékeket kapok, akkor ez nem Nash-egyensúlyi ajánlatadási stratégia. Ekkor továbblépek a kapott eloszlás feltételezéssel (F_3). Elsőként, ahogy előzőleg is, szükség van az új feltételezett ajánlati eloszlás mellett kiszámolni a nyerés valószínűségét a különböző ajánlatok esetén.



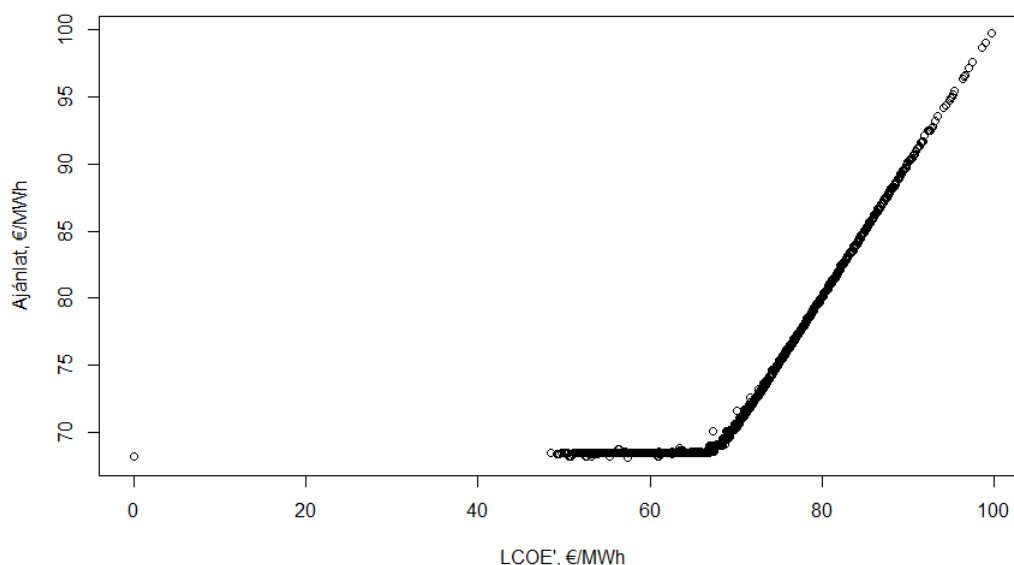
5.2. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_2 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra

Az előző esethez képest „eltolódott” a nyeres valószínűsége a nagyobb ajánlatok irányába. Míg korábban valahol 50 és 70 €/MWh között voltak a bizonytalan kimenetelt ígérő ajánlatok, most még 65 €/MWh-s ajánlat esetén is 0,9999 feletti valószínűséggel lehet nyerni, és csak 71,3 €/MWh környékén csökken a nyeres valószínűsége 1% alá.

Ezt az eredményt felhasználva kiszámolom az optimális ajánlatot mind a 10 000 különböző LCOE' érték esetén. Ezeket az értékelések függvényében ábrázolom (lásd: 11. ábra). A feltételezett és kapott 10 000 ajánlat közötti különbözőség számszerűsítésére már használható az NRMSE érték: ez 5,25 %-nak adódik, vagyis az iteráció nem ért a végére.

A most kapott ajánlati függvény esetén az ajánlatoknak egy jóval lassabb emelkedését figyelhetjük meg, a görbe eleje sokkal laposabb, és egy élesebb, töréspont-hoz hasonló váltással indul a függvény meredekebb szakasza. Továbbra is találkozhatunk az elkülönülő minimum ajánlattevőkkel, azonban a minimális ajánlat jelentősen magasabb. Összességében kijelenthető, hogy a két ajánlati függvény jelentősen eltér egymástól, így továbblépek az iteráció következő pontjára.

Ehhez ismét szükségem van az ajánlatok eloszlásának meghatározására. Ehhez sorbarendezve ábrázolom őket. A korábbi ajánlatokhoz képest egy magasabb általános ajánlati szintet láthatunk és kisebb ugrást a minimum és az első nem 0 értékeléshez tartozó ajánlat között. Az illesztés során most is az előzőekben bemutatott logikát használom. A kapott eloszlásfüggvény (F_3) a Függelékben látható.



5.3. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_3 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra

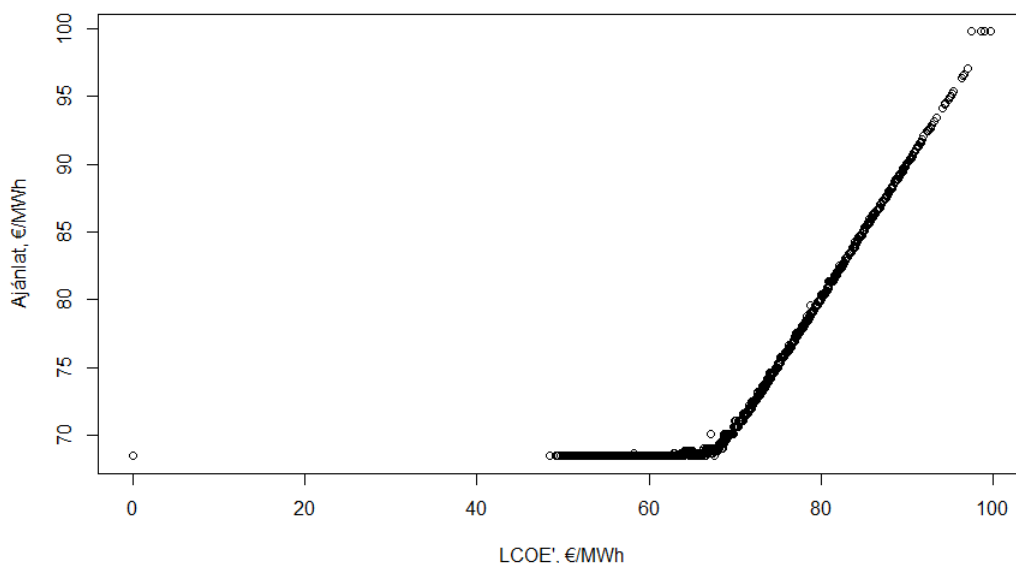
3. lépés: Optimális ajánlatok keresése a 2. lépés során kapott ajánlati eloszlást (F_3) feltételezve

Az F_3 eloszlásfüggvényt feltételezve ismét kiszámolom a nyerés valószínűségét az egyes ajánlatok esetén, majd a 10 000 különböző értékelés esetén az optimális ajánlatot is. Az ajánlati függvény görbéjének első része egészen ellaposodik, 70 €/MWh környékére sűrűsödnek az ajánlatok, majd a korábbiakhoz képest valamivel még élesebb a váltás a függvény utolsó, meredeken emelkedő, lineáris szakasza előtt (lásd: 12. ábra).

Ami külön érdekes, hogy az ugrás a 0 és nem 0 értékeléssel rendelkező szereplők között gyakorlatilag eltűnik, tehát a legkisebb nem 0 értékeléssel rendelkező szereplők optimális esetben nagyon közeli ajánlatot adnak a 0 értékeléssel rendelkezőkhöz. A feltételezett és kapott ajánlatok közötti eltérés értéke 0,78%, vagyis már viszonylag közel vannak egymáshoz, de még nem annyira, hogy az iteráció leálljon. Az előző lépéshez képesti távolságuk pedig csökkent, így továbblépek. A sorbarendezett ajánlatokból ismét kiszámolom az ajánlatok becsült eloszlását, F_4 -et.

4. lépés: Optimális ajánlatok keresése a 3. lépés során kapott ajánlati eloszlást (F_4) feltételezve

Újra kiszámolom a nyerés valószínűségét, az F_4 ajánlati eloszlást feltételezve a többi szereplőről. A 0 és 1 közötti valószínűségek nagyon kis szakaszon helyezkednek el, egyre jobban összesűrűsödik a lehetséges ajánlatok halmaza (lásd a Függelékét).



5.4. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_4 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra

Az ajánlati függvény alakja nagyon hasonló az előző lépésben számított ajánlati függvény alakjához (lásd: 13. ábra), meglehetősen kis eltérés látható.

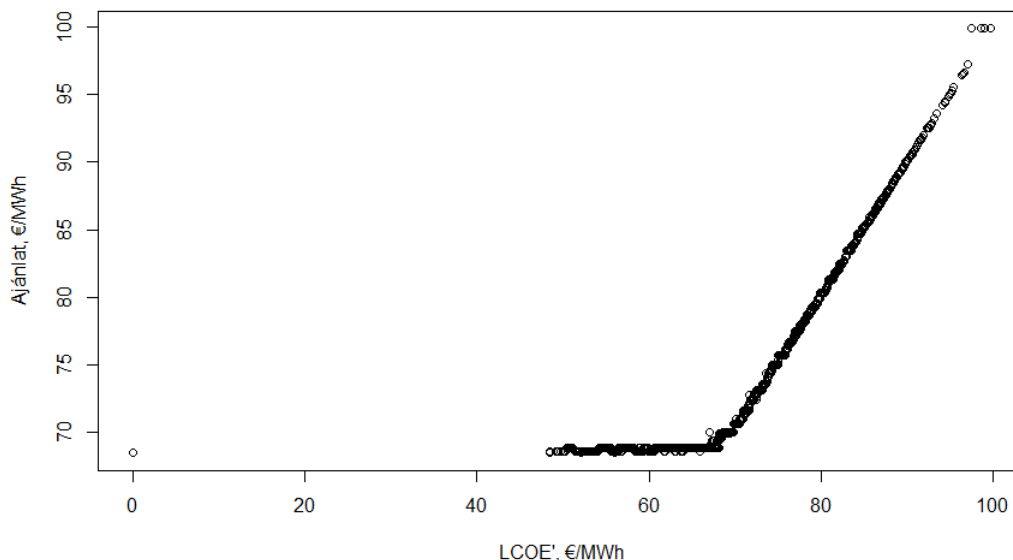
A kapott és feltételezett ajánlatok közötti eltérés tovább csökken: 0,25%-ra. Ez egy kevésbé szigorú megállási kritérium esetén már önmagában elegendő lehetne az iteráció lezárásához, a korábban meghatározott 0,1%-hoz képest azonban még nem elég kicsi, így tovább számolok.

5. lépés: Optimális ajánlatok keresése a 4. lépés során kapott ajánlati eloszlást (F_5) feltételezve

A 14. ábra) alapján látható, hogy jelentősen nem mozdultunk el, érdemes azonban kiszámítani ismét az NRMSE értékét.

Most a feltételezett és kapott ajánlatok közötti távolságra valamelyest magasabb értéket kapunk, 0,34%-ot. Vagyis valamelyest távolodtunk a Nash-egyensúlyhoz való „hasonlóságot” tekintve. A korábban meghatározott megállási kritériumokat tekintve ezért az iteráció itt – pontosabban az egyvel korábbi lépésben – leáll. Mivel az NRMSE érték nem elég kicsi, így nem állíthatjuk, hogy Nash-egyensúlyban vagyunk, a feltételezés szerint azonban a szereplők ezt fogják a legjobb becslésnek tekinteni, vagyis egy „pseudo-Nash-egyensúlyi” ajánlati függvénnyel fognak az aukción elindulni.

A legjobb választ tehát a 4. lépésben láthattuk, akkor voltak egymáshoz a feltételezett és kapott ajánlatok a legközelebb, amikor a szereplők F_4 ajánlati eloszlást



5.5. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_5 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra

tettek fel. Az aukció szimulációja során használt ajánlati függvényt úgy definiálom, hogy az egyes értékelések esetén az ezen feltételezés mellett kapott ajánlatok lesznek a fix pontjai, közöttük pedig az eddigiekhez hasonlóan lineárisan interpolálok.

További lépések vizsgálata

Az iterációt (idő szűkében) 1000 adatpontra korlátozva megvizsgálom, hogy ha nem állítom le az iterációt ezen a ponton, akkor mi történik. Ebben a felállásban összesen 11 lépést számoltam végig. F_4 feltételezése esetén a fentiekhez hasonlóan teljesül a megállási kritérium, de 1000 adatpont esetén az NRMSE érték 0,25% helyett 0,58%, de a csökkenést követő növekedés itt is tettenérhető. A későbbi lépések során ez még kétszer bekövetkezik, először F_7 , majd F_{10} feltételezésekor. Itt az első megálláshoz képest kevesebb, mint felére (0,27%, illetve 0,25%-ra) csökken az NRMSE érték. Az ajánlati függvények alakja nagyon hasonló (lásd részletesen a Függelékben), de az ajánlatok feljebb tolódnak – ahogy látni fogjuk, ez pedig komoly hatással van az aukció kimenetelére.

Szintén 1000 adatpontra vizsgáltam azt az esetet, amikor a szereplők figyelembe veszik a döntetlen lehetőségét. Itt (a rendkívül hosszú futási idő miatt) az első 5 lépést végeztem el. Az iterációs lépések nagyon hasonlóan alakultak, a döntetlentől eltekintő esethez, a százalékos NRMSE értékek F_3 -at, F_4 -et és F_5 -öt feltételezve 1, 2, illetve 3 tizedesjegy pontosságig egyeznek meg. Az ajánlati függvényeket szintén lásd a Függelékben.

Végül az iterációt (a döntetlentől eltekintve) egyenletes eloszlásból is elindítottam, szintén 1000 adatpontra. A normális eloszlással induló esethez hasonlóan F_4 feltételezése, majd F_{10} feltételezése esetén érdemes megállni. Egyik esetben sem kapunk valódi Nash-egyensúlyt, de ahhoz „nagyon közeli” kimenettel találkozunk, az NRMSE értékek 0,54%, majd 0,22%. Az ajánlatok és az értékelések közötti összefüggéseket ez esetben is a Függelékben jelenítem meg.

6. fejezet

Eredmények

AZ EGYENÁRAS ÉS az ajánlati áras aukciók lejátszására, és az eredmények kiértékelésére ebben a fejezetben kerül sor. Az egyensúlyi stratégiákat feltételezve szimulálok le az aukciók lejátszását, 1000–1000 alkalommal. A jobb összevethetőség kedvéért ugyanazt a 1000×100 értékelést használok mindkét lejátszás esetén.

A kisorsolt értékelések mellett a megfelelő ajánlati függvényt feltételezve – ez az egyenáras esetben az identitás függvény, az ajánlati áras esetben pedig az iterációból adódó értékelés-ajánlat párokra illesztett függvény – minden szereplő beadja az ajánlatát, ezekből kiválasztom a nyerteseket (mindkét aukción a 40 legkisebb ajánlatot adó játékos nyer), meghatározom az egyes szereplők által elnyert támogatási szintet, és a teljes kifizetést is – ami jelen esetben a szakirodalomban kikiáltó bevételeként emlegetett összeg, de ez most egy „negatív bevétel”, hiszen beszerzési aukcióról van szó, vagyis a kikiáltó összeköltségéről beszélhetünk.

A kapott eredményeket (legkisebb és legnagyobb nyertes ajánlat, összes kifizetés) összevetem a korábbi német aukciók eredményeivel is, szemelőtt tartva, hogy jelen modellezési keretben nem tudtam minden valós körülményt figyelembe venni. Mivel a költségbecslésem alapjául szolgáló szakirodalom és adatok nagy része nem 2019-re vonatkozott, így fontosnak tartom a korábbi évek aukcióin kialakuló árakkal való összevetést is, hiszen az iparágban rendkívül gyors ütemű költségcsökkenés figyelhető meg.

6.1. Egyenáras aukció

Ahogy fent bemutattuk, az egyenáras aukció esetén a stratégia megtalálása a korábbi irodalmi eredményekre alapozva nem jelent kihívást. Minden szereplő az értékelésének megfelelő ajánlatot ad, tehát az eredmények esetén nem érdemes külön foglalkozni a kapott Nash-egyensúlyi licitfüggvénnyel, tudjuk, hogy az identitásfüggvény a Nash-egyensúlyi ajánlatadási stratégia. Ezért az eredmények bemutatása a kialakuló árakra és a kikiáltó várható összköltségére korlátozódik. Ezek lesznek a viszonyítási pontok az ajánlati áras aukció vizsgálatakor.

Ahogy említettem, ahhoz, hogy a fentieket meghatározzam ismét szimulációt használok. Az aukciót 1000 alkalommal „játszom le”, vagyis ennyiszor szimulálok 100 szereplőnek beruházási költséget, és számítom ki ebből mindegyikük $LCOE'$ értékét (vagyis értékelését). Mivel ezen értékek maguk az ajánlatok is, következő lépésként sorbarendezelem őket, és a legalacsonyabb 40 értékeléssel rendelkező játékost választom nyertesnek. A kialakuló ár a 41. legalacsonyabb ajánlat, vagyis a legalacsonyabb már nem nyertes ajánlat, ezt a támogatási szintet kapja minden nyertes szereplő. A kapott eredmények alapján a legalacsonyabb kialakuló támogatási szint 64,8 €/MWh, a legmagasabb 71,6 €/MWh, átlagosan pedig ez az érték 68,4 €/MWh-nak adódott.

A kikiáltó összeköltsége a teljes támogatási időszakra vonatkozó összes kifizetett támogatás. Ennek meghatározásához ismét gondolni kell valamit a jövőbeli áramárakról. Itt azzal a feltételezéssel élek, hogy a szereplők által az $LCOE'$ számítás során használt áramárelőrejelzés a legjobb becslés, ezért ezzel számolok a teljes költség meghatározásakor is. Ugyanez igaz a várható termelésre: a korábban bemutatott termelési profil a feltételezett ennek a számításnak a során is.

Megvizsgálom tehát, hogy azokban az órákban, amikben a naperőművek termelni fognak mi lesz a termeléssel súlyozott havi átlagár. Amennyiben ez alacsonyabb, mint az elnyert támogatási ár, akkor a szereplők a kettő különbségét kapják meg minden megtermelt egység (MWh) áram után. Amennyiben a támogatási ár alacsonyabb, mint az így számolt átlagár, az adott hónapra vonatkozóan a termelők nem kapnak támogatást. A feltételezett szimmetria miatt, és mivel az aukciós szabályok alapján minden szereplő ugyanazt a támogatási árat nyeri el, elegendő egy szereplőre kiszámolni a teljes támogatási időszakra vonatkozó támogatást, és ezt kell megszorozni 40-nel, hogy megkapjuk a kikiáltó teljes költségét. A fenti számolás tehát a következőképpen írható fel:

$$\sum_{t=1}^{20} \frac{\sum_{m=1}^{12} [TSZ - p_{tm}]^+}{(1+r)^t}$$

, ahol, TSZ a kialakult támogatási szint, és ahogy fent is, p_{tm} a havi átlagos áramár a t . év m . hónapjában, r pedig a számításhoz figyelembe vett diszkontfaktor.¹

A kapott eredmények alapján az összköltség nettó jelentértékének minimuma 4,32 millió eurónak, maximuma pedig 7,53 millió eurónak adódott (2019-es reál értéken számolva). Átlagosan pedig a teljes, 20 év alatt kifizetendő támogatás diszkontált jelenértéke 5,95 millió euró. Mindez azt jelenti, hogy attól függően, hogy az aukción résztvevő szereplők éppen milyen beruházási költséget realizálnak a feltételezett eloszlásból, nagyon különböző összköltségek alakulhatnak ki – az átlaghoz

¹ ezt az értéket a társadalmi diszkontrátaként érdemes felfogni, szintjét 4,1%-nak vettem.

képest $\pm 27\%$ -os sávban mozognak az eredmények. Ez a döntéshozók szempontjából fontos kockázati tényező – ugyanakkor, ahogy látni fogjuk, az átlagos érték alacsonyabb, mint az ajánlati áras esetben.

6.2. Ajánlati áras aukció

Az ajánlati áras aukció esetén az egyik legfontosabb eredmény a kapott licitfüggvény. A szakirodalomban azt találjuk (pl. (Krishna, 2010)), hogy a szereplők ajánlati áras aukció esetén nem vallják be a valós értékelésüket, hajlamosak kevesebbet kínálni az aukcionált tárgyért, vagy esetünkben magasabb támogatást kérni a valósánál – vagyis a projekt megtérüléséhez adott elvárt hozam mellett még éppen szükségesnél. Ez a korábbi eredmény a saját modellem esetén is megerősítést nyert. Az iteráció lépéseit fent már bemutattam, a következőkben az eredményül kapott összefüggést (az értékelések és az ajánlatok között) elemzem ki röviden, az első, és az utolsó megállás esetén, vagyis F_4 és F_{10} ajánlati eloszlás feltételezése esetén (lásd: 13. ábra és a Függelékben 19. ábra).

A szereplők, ahogy fent is említettem nem találhatnak rá egy valódi Nash-egyensúlyi kimenetre, csupán egy annak tűnő, „pseudo-Nash-egyensúly”-i ajánlati függvényt fognak használni. Mind az F_4 , mind az F_{10} ajánlati eloszlás feltételezés esetén adott legjobb válasz mellett jól látható, hogy a szereplők nagy csoportja ad egy adott értékhez nagyon közeli ajánlatot. Ez az első esetben 68,5 €/MWh környékén, a második esetben már 70,5 €/MWh környékén mozog. Ahogy látni fogjuk, ez az átlagos elnyert támogatási szintre is befolyással bír.

Éppen ezért, ez a látszólag kis különbség jelentős hatással van a támogatási összköltségre, ugyanis az előrejelzett áramárak a 2030-as években sokszor éppen ezen értékek környékén mozognak, ami azt jelenti, hogy az egyik esetben már kell, a másokban még pont nem kell fizetni a szereplőknek támogatást.

A függvények alakjára visszatérve jól látható, hogy a minimum ajánlatnál alacsonyabb értékeléssel rendelkezők ajánlatai e körül az érték körül sűrűsödnek (közel vízszintes szakasz), az ennél nagyobb értékeléssel rendelkezők pedig valamivel a saját értékelésüknél magasabb ajánlatokat adnak (emelkedő szakasz). Természetesen a szereplőknek nem éri meg a saját értékelésük alá ajánlani, hiszen ekkor a projektet nem tudnák kellő megtérülés mellett megvalósítani, tehát ha a szükséges támogatást nem kapják meg, akkor bele sem vágnak, vagyis pontosan ott vannak, mintha nem nyertek volna semmit (negatív megtérülésű projekt megvalósítását nem feltételezem). Így ők legalább a valós értékelésüknek megfelelő ajánlatot fognak beadni, még akkor is, ha ezzel a nyereső valószínűsége elenyésző.

További fontos eredmények, ugyanúgy, ahogy az egyenáras aukciónál is, a kialakuló árak és a kikiáltó összköltsége. Ezek mentén van lehetőség összehasonlítani a két különböző aukciós szabályzatot. Az árak itt egy-egy aukció esetén is különbözőek, vagyis nem csak 1000 különböző, de valójában 1000×40 kialakuló árunk lesz.

A kikiáltó összeköltsége hasonló módon számolódik, mint az egyenáras esetben, azzal a különbséggel, hogy itt már egy-egy aukció esetén is 40 különböző összeget kell kiszámolnunk, hiszen az egyes szereplők által elnyert támogatás szintje különbözhet. Ezt a 40 összeget adom össze, hogy megkapjam az aukció eredményei alapján számolt teljes költséget. Nézzük tehát az aukción kialakuló árakat, és az elnyert támogatások összegét, vagyis a kikiáltó összeköltségét.

Ebben az esetben már egy-egy aukción belül is meghatározható a legkisebb és legnagyobb elnyert támogatási szint, hiszen nem egy egységes ár alakul ki. Ennek ellenére rendkívül közel vannak akár az F_4 , akár az F_{10} ajánlati eloszlásból adódó ajánlati függvények esetén a minimum és maximum árak: előbbi esetén 68,45 és 71,42 €/MWh-nak² adódnak, utóbbi esetén 70,53 és 72,25 €/MWh-nak adódnak.

Az ajánlati áras esetben ennek megfelelően az egyenárashoz képest jóval kisebb szórást mutat az 1000 aukción kialakuló összköltség is. Az F_4 feltételezése esetén adódó ajánlati függvénnyel számolva a minimum és maximum összköltség érték 5,98 és 6,38 millió euró, míg az átlag 6,07 millió euró³. Az átlagos érték mindössze 2%-kal magasabb tehát ebben az esetben, mint az egyenáras aukciókon, miközben a kockázat a szórás miatt jelentősen alacsonyabb. Ez tehát az ajánlati áras szabály alkalmazása felé billentheti a mérleg nyelvét. Fontos ugyanakkor megvizsgálni, hogy mi történik, ha a szereplők továbblépnek az iterációban, és egy későbbi lépésben kialakuló ajánlati függvénnyel játszanak. Az F_{10} ajánlati eloszlásra adott legjobb válasz esetén a kialakuló minimum, maximum és átlagos összköltség érték már jóval magasabb: 7,00, 7,09 és 7,00 millió euró⁴. Ez már egy jelentős, több mint 17%-os növekedést jelent az egyenáras eset átlagértékéhez képest.

Ami ebben az esetben különösen érdekes, az a szórás extrém mértékben való lecsökkenése. Az 1000 lejátzásból ugyanis 963 esetben a kialakuló összeköltség mindössze 1 eurónyit változott (ezért esik ennyire közel az átlag a minimum értékhez). Vagyis szinte biztosra vehető, hogy mekkora költséggel kell számolni, ha szereplők (mindannyian) ezt az ajánlati függvényt használják.

A kapott árakat összevetem az elmúlt 3 év 9 aukciójának eredményeivel is. Ezek az aukciók egytől egyig ajánlati áras szabályrendszerben folytak le. A kialakuló minimum, maximum és átlagos árakat a 6.1. táblázatban foglalom össze.

Az eredmények alapján látható, hogy a saját modellemből kapott ajánlatok többnyire jóval magasabbak, mint a valós aukciókon kialakulóak, csak az 2017-es és a 2019 márciusi, nagyobb kapacitásokat kiosztó (500 MW) aukció esetén látható a modellemben szereplőnél nagyobb nyertes ajánlat.

Ez részben köszönhető lehet a költségbecslés pontatlanságának (vagy akár elavultságának, még ha igyekeztem is a kutatásom idején elérhető legfrissebb forrá-

²1000 adatpont esetén 68,54 és 71,72 €/MWh

³Ugyanezek az értékek a 10 000 helyett 1000 adatpontot tartalmazó futtatás esetén némileg magasabbak: a minimum 6,09, a maximum 6,61, az átlag 6,18 millió euró).

⁴Ezt az értéket már csak 1000 adatpontot tartalmazó iteráció esetén számítottam ki, így a növekedést a némileg magasabb 1000 adatpontos F_4 -et feltételező esethez érdemes hasonlítani

	átlag nyertes ajánlat	min nyertes ajánlat	max nyertes ajánlat
2017. I. aukció	65,8	60,0	67,5
2017. II. aukció	56,6	53,4	59,0
2017. III. aukció	49,1	42,9	50,6
2018. I. aukció	43,3	38,6	45,9
2018. II. aukció	45,9	38,9	49,6
2018. III. aukció	46,9	38,6	51,5
2019. I. aukció	48,0	41,1	51,8
2019. II. aukció	65,9	39,0	84,0
2019. III. aukció	54,7	49,7	55,8
Saját modell, F_4 feltételezésével	68,63	68,45	71,42
Saját modell, F_{10} feltételezé- sével	70,53	70,53	72,25

6.1. táblázat. A német naperőművi aukciók eredményei és a modellezett eredmények az ajánlati áras aukció esetén, 2017-2019, forrás: Bundesnetzagentur (2019) és saját számítás

sokra támaszkodni), részben azonban magyarázhatja az is, hogy a szereplők kevésbé szofisztikált módon határozzák meg az ajánlati függvényüket, nem próbálnak meg Nash-egyensúlyi stratégiát (vagy ahhoz közelit) játszani.

Sajnos a valós támogatási igény és a ténylegesen elnyert támogatás kapcsolatáról nem áll rendelkezésre információ, így az nem tesztelhető, hogy a szereplők – a modellnek megfelelően – valóban a költségeik alapján adódó támogatási igény fölé lőnek-e az ajánlataikkal. A támogatási igény és az elnyert támogatások kapcsolatáról egyedül a megvalósítási ráták adhatnak némi tájékoztatást: a 2017 februári és júniusi aukciók esetén (ahol a megvalósításra előirányzott két év már lejárt, és az adatszolgáltatás is megtörtént) 98,85%-os és 96,74 %-os megvalósulást láthatunk (Bundesnetzagentur (2019)). Ez azt jelzi, hogy a beruházók az elnyert támogatással pénzüknél voltak, vagyis nagy valószínűséggel az értékelésüknél nagyobb vagy egyenlő ajánlattal tudtak nyerni. A 2017. októberi aukció esetén ez a szám – egyelőre – csak 35%, azonban elképzelhető, hogy a 2 éves időszak végén (vagyis 2019 végén) megvalósult projektekről még nem érkeztek be az információk.

Szintén magyarázhatja a valós aukciós eredményekhez képesti eltérést, hogy a modellemben nem veszem figyelembe a maximum árat. Ez jelen esetben azt eredményezi, hogy modellemben a német rendszerben megállapított maximumnál magasabb ajánlatok is lehetségesek (a német maximum árak 2017-ben 89,1 €/MWh-ról indultak, és 2019 harmadik aukcióján csökkentek először 87,5 €/MWh alá, ekkor 75 €/MWh volt a maximált ár, Bundesnetzagentur (2019)). Vagyis az ajánlatadók a többi résztvevő esetén pozitív valószínűséget társíthatnak magasabb ajánlatokhoz is, (miközben a valóságban az ennél magasabb értékeléssel rendelkező

szereplők valószínűleg el sem indulnak az aukción), így a várható hasznosságukat maximalizáló ajánlat is valamivel magasabb lehet.

A modellem a korábbi modellekhez képest újdonsággal szolgál a tekintetben is, hogy olyan szereplők indulását is figyelembe veszi az aukción, akik támogatás nélkül is megépítenék a projektjüket. Ez egy merőben eltérő stratégiát jelenthet a korábbiakhoz képest, ahogy láthattuk, ez a fajta értékeléseloszlás hatással van a kialakuló ajánlatadási viselkedésre. A jövőben az ilyen típusú helyzetek vizsgálata egyre fontosabb szerepet kaphat, ugyanis a költségek jelentős csökkenésével egyre több és több olyan projekt indulhat el, mely teljesíti ezt a kritériumot.

A döntéshozók számára a modellem eredményei alapján további fontos tanulság lehet, hogy az aukciós szabályoknak rendkívül komoly hatása van a szereplők ajánlatadási viselkedésére. Ezt a korábbi szakirodalom is alátámasztotta, de ebben a speciális esetben nemcsak arról van szó, hogy az ajánlati áras esetben sérül az igazmondásra való ösztönözöttség, hanem arról is, hogy az ajánlati áras esetben bizonyos stratégia mellett a várható összköltség jóval magasabb, mint az egyenáras esetben.

Ez az irodalom korábbi eredményeivel (bevételi ekvivalencia tétel (Krishna, 2010), Nash-egyensúlyi ajánlatadás esetén a két szabályrendszerre vonatkozóan) nincs ellentmondásban, ugyanis a megtalált ajánlati függvények nem Nash-egyensúlyiak az ajánlati áras esetben, csupán annak tűnőek, vagy ahhoz „közeliek”.

A döntéshozóknak összességében tehát eredményeim alapján azt érdemes mérlegelniük az árazási szabály kiválasztásakor, hogy az átlagosan olcsóbbnak tekinthető egyenáras rendszer mellett teszik le a voksukat, ami garantálja a szereplők valós költségeinek bevallását (megfelelő verseny esetén), ugyanakkor az összköltségek szórása a szereplők értékelésétől függően jelentős. Vagy inkább az ajánlati áras aukciót választják, ahol ugyan a szórás kisebb, ez azonban azt jelenti, hogy az egyenáras várható összköltségéhez képest biztosan magasabb összköltség alakul ki, a szereplők által választott ajánlati függvényektől függően pedig a különbség jelentős, 15%-ot meghaladó is lehet.

7. fejezet

Összefoglalás

DOLGOZATOMBAN A NÉMET naperőművi aukciókat modellezem. A szakirodalomban viszonylag friss területnek számít a megújuló energia támogatásának kiosztására vonatkozó aukciók elemzése, hiszen az ilyen típusú tenderek néhány ország kivételével csak az elmúlt 5-10 év során tűntek fel. Németországban a pár évvel korábbi pilot tenderek után az aukciókat a 2010-es évek második felében kezdték el rendszeresen megszervezni, mára már számos aukció zárult sikeresen. Ezért megfelelő terepet biztosít az elemzésre, hiszen egyrészt az aukciós mechanizmus már kiforrottnak mondható, másrészt kellő adat áll rendelkezésre ahhoz is, hogy a modellezés során kapott eredményeket összevethessem a valósakkal.

A disszertáció kutatási kérdései részben elméleti jellegűek, a megújuló aukciók általános modellezési keretrendszeréhez kapcsolódnak (Hogyan található meg a Nash-egyensúly, vagy egy ahhoz közeli ajánlatadási stratégia?), de ezeket is konkrétan a német naperőművi aukciók esetén vizsgálom. A kérdések egy másik része konkrét számításokkal alátámasztott, gyakorlati eredmény (például a módosított LCOE' számítás, és az ebből kapott eloszlás).

Gyakorlati relevanciájuk azért jelentős, mert a jövőben számos Európai Unió tagállam fog ilyen típusú aukciókat rendezni (köztük hazánk is: 2019 szeptemberében került sor az első, pilot aukció kiírására itthon, azóta a 2020-as év folyamán már a második aukciót is lebonyolították), ezért az aukciós viselkedés minél pontosabb modellezése lehetővé teszi a döntéshozók számára, hogy megfelelő becslést adjanak a költségvetésre vonatkozóan, illetve a számukra legkedvezőbb aukciós szabályrendszert állítsák fel.

Egy rövid bevezető és a kutatási kérdések ismertetése után a dolgozat második fejezetében áttekintést nyújtok a megújuló energia támogatásának történetéről, az Európai Unió támogatási politikáról és célkitűzésekről, valamint az aukciók, mint támogatás allokációs mechanizmusok megjelenéséről és elterjedéséről. Ezt követően röviden ismertetem a német piacot, és az ottani támogatási rendszert. Ugyanezt megteszem a magyar piac esetén is, kiemelve a támogatási rendszer azon elemeit, ami miatt a használt modellezési keretrendszer kevésbé alkalmas a magyar auk-

ció modellezésére. Ezek a fejezetek ágyaznak meg a későbbi, speciálisan a német naperőművi beruházásokhoz és aukciókhoz kapcsolódó számításoknak, kontextusba helyezik őket, és a kutatás relevanciáját hivatottak bemutatni.

A harmadik fejezetben ismertetem a szereplők értékeléseinek pontos kiszámítását. Ez a szakirodalomban széleskörben alkalmazott LCOE keretrendszer logikája mentén történik, egy módosított számítás mentén, mely a szokásos paraméterek mellett figyelembe veszi a támogatási időtől eltérő projektélettartamot, valamint a támogatáson felül várható egyéb piaci bevételeket is. A számításhoz a szakirodalomban fellelhető adatok mellett saját áramárelőrejelzést is készítek, a REKK EEMM modellje segítségével. Ennek a fejezetnek a végén kapunk választ az első kutatási kérdésre.

- Milyen eloszlás alapján alakulnak ki a szereplők költségei (értékelésük), ha a beruházási költségre teszünk eloszlás feltételezést, és figyelembe vesszük a jövőbeli áramárak alakulását is?

Az értékelések pontos eloszlásának meghatározása explicit függvény alakba írva nem történik meg a dolgozatba, empirikusan azonban igen. Ennek oka, hogy a további számítások elvégzéséhez elegendő az értékelések ezen empirikus eloszlásának ismerete. Ez szimuláció segítségével könnyen meghatározható a különböző beruházási költségek esetén. A feltételezett eloszlás alapján 10 000 különböző beruházási költséget generálok, és minden esetben optimalizáció segítségével határozom meg a támogatási szükségletet. Az értékelések tapasztalati eloszlását részletesen lásd a 3.8. ábrán.

A legfontosabb eredmény, hogy a szereplők viszonylag jelentős részének, körülbelül 7-8%-ának nincs szüksége támogatásra (a feltételezett beruházási költség eloszlás mellett), ugyanis már támogatás nélkül is megtérül a beruházása. Ezeknek a szereplőknek tehát az értékelése 0. Ez azt jelenti, hogy ahhoz, hogy megérje megépíteniük az erőművet nem is kellene részt venniük az aukció, azonban annak reményében elindulnak, hogy ennek ellenére nyerhetnek támogatást (hiszen rajtuk kívül senki sincs tisztában az értékelésükkel). Ahogy látni fogjuk, mind az egyenáras, mind az ajánlati áras esetben valóban jelentős támogatásokkal távoznak majd ezek a szereplők. Ez alátámasztja azt a feltevést, hogy a részvétel miatt esetlegesen felmerülő költségek (melyektől modellemben eltekintek) ellenére elindulnak majd az aukción, hiszen projektjük megtérülésén tovább javíthat az elnyert támogatás.

A negyedik fejezetben bemutatom az általános és a kifejezetten a megújuló aukciókhoz, illetve az egyensúlykereséshez kapcsolódó szakirodalom számomra leginkább releváns munkáit és eredményeit. Ezután részletesen ismertetem a saját aukcióelméleti modelletem, melyet a német naperőművi aukciók szabályrendszere alapján építettem fel. A modell maga nagyon hasonló a szakirodalomban a megújuló aukciók esetén már korábban is használtakhoz (bár több modellel ellentétben én szimmetrikus aukciót vizsgálok).

Ezekhez képest azonban újítást jelent az ajánlati stratégiák megkeresése. A szakirodalomban szereplő munkák egy része az ajánlati áras esetben egyszerűsítésekkel él (pl. egy adott ajánlati eloszlás feltételezése mellett optimalizáltak a szereplők, nem foglalkozva azzal, hogy vajon ez a feltételezett ajánlati eloszlás megegyezik-e a többi szereplő optimális viselkedéséből adódóval). Másik részük invertálható ajánlati függvényekkel foglalkozik, és analitikus módon, differenciál egyenletek segítségével keresi meg az egyensúlyt – én szerettem volna meghagyni a lehetőséget a monoton, de nem szigorúan monoton ajánlati függvények figyelembe vételére, így nem is ebbe az irányba indultam. A dolgozatban iteráció segítségével keresem meg az egyensúlyi ajánlati függvényt.

Az ötödik fejezetben ennek az egyensúlyi kimenetnek a megkeresését mutatom be. Ismertetem az iterációs módszert, és az egyes lépések során kapott eredményeket is. A második kutatási kérdésre itt kapunk választ.

- Hogyan lehet meghatározni az aukción a Nash-egyensúlyi ajánlati függvényt, ha nem kizárólag szigorúan monoton növekvő függvényeket vizsgálunk?

Az általam modellezett speciális esetben, a módosított LCOE⁷ számításból adódó értékelésekkel kalkulálva az iteráció során nem jutok el valóban Nash-egyensúlyinak tekinthető ajánlati függvényekhez, azonban a feltételezett és a kapott ajánlatok (és így ajánlati függvények) nagyon közel vannak egymáshoz. A szereplők az iteráció során már akkor megállnak, amikor a Nash-egyensúlyhoz való „közeledés” „távolodásba” vált, így egy „pszeduo-Nash-egyensúly”-i stratégiát választanak ajánlati függvényként.

Eltérő ajánlati függvények adódnak, ha a szereplők az első vagy ha a második ilyen alkalommal állítják le a keresést. Az azonban mindkét esetben elmondható, hogy a kapott ajánlati függvény alakja speciális. Egy adott értékelésnél kisebb-beli rendelkező szereplők egymáshoz nagyon közeli ajánlatokat adnak (ez a megállástól függően 68,5 vagy 70,5 €/MWh környékén mozog), ennél magasabb értékelés esetén pedig a saját értékelésükhöz nagyon közeli ajánlatokat adnak – így az ajánlati függvény egy vízszinteshez közelítő, és egy nagyjából 45 fokos szakaszból áll. Ez mindkét esetben elmondható, a különbség abban áll, hogy a töréspont nagyjából milyen ajánlat magasságában található.

A fent meghatározott szabályok alapján az aukciókat 1000–1000 alkalommal le is játszom. Az erre vonatkozó legfontosabb eredményeket a hatodik fejezetben foglalom össze. Itt válaszolom meg az utolsó kutatási kérdésemet.

- Mennyiben különböznek ezek az ajánlatiáras (pay-as-bid) és az egyenáras (uniform price) esetben, és ebből milyen szakpolitikai következtetéseket vonhatunk le?

Az egyenáras esetben a szereplők igazmondásra ösztönöztek, így minden esetben a 41. legkisebb értékeléssel rendelkező szereplő értékelésének megfelelő támogatási szintet nyernek el a résztvevők. Az így adódó támogatási szint a 1000 aukción átlagosan 68,4 €/MWh, ami az értékelések átlagánál valamivel több, de az ajánlati áras esetnél néhány százalékkal alacsonyabb. Az átlagos összköltség nettó jelenértéke (2019-es euróban számolva) nagyjából 5,95 millió eurónak adódik.

Az ajánlati áras esetben az F_4 , illetve az F_{10} ajánlati eloszlás feltételezésből adódó ajánlati függvények esetén a minimum és maximum árak 68,45 és 71,42 €/MWh-nak, valamint 70,53 és 72,25 €/MWh-nak adódnak. Ennek megfelelően a teljes támogatási összeg is magasabb: az F_4 feltételezése esetén adódó ajánlati függvénnyel számolva a minimum és maximum összköltség érték 5,98 és 6,38 millió euró, míg az átlag 6,07 millió euró, míg az F_{10} ajánlati eloszlásra adott legjobb válasz esetén a kialakuló minimum, maximum és átlagos összköltség érték már jóval magasabb: 7,00, 7,09 és 7,00 millió euró. Ez már egy jelentős, több mint 17%-os növekedést jelent az egyenáras eset átlagértékéhez képest. Ami ebben az esetben különösen érdekes, az a szórás extrém mértékben való lecsökkenése. Az 1000 lejártszámból ugyanis 963 esetben a kialakuló összköltség mindössze 1 eurónyit változott (ezért esik ennyire közel az átlag a minimum értékhez). Vagyis szinte biztosra vehető, hogy mekkora költséggel kell számolni, ha szereplők (mindannyian) ezt az ajánlati függvényt használják.

Mindezekre alapozva a döntéshozók számára a modellem eredményei alapján fontos tanulság lehet, hogy az aukciós szabályoknak rendkívül komoly hatása van a szereplők ajánlatadási viselkedésére. Ezt a korábbi szakirodalom is alátámasztotta, de ebben a speciális esetben nemcsak arról van szó, hogy az ajánlati áras esetben sérül az igazmondásra való ösztönözöttség, hanem arról is, hogy az ajánlati áras esetben bizonyos stratégia mellett a várható összköltség jóval magasabb, mint az egyenáras esetben, ugyanakkor a szórás sokkal kisebb.

A döntéshozóknak összességében tehát eredményeim alapján azt érdemes mérlegelniük az árazási szabály kiválasztásakor, hogy az átlagosan olcsóbbnak tekinthető egyenáras rendszer mellett teszik le a voksukat, ami garantálja a szereplők valós költségeinek bevallását (megfelelő verseny esetén), ugyanakkor az összköltségek szórása a szereplők értékelésétől függően jelentős. Vagy inkább az ajánlati áras aukciót választják, ahol ugyan a szórás kisebb, ez azonban azt jelenti, hogy az egyenáras várható összköltségéhez képest biztosan magasabb összköltség alakul ki, a szereplők által választott ajánlati függvényektől függően pedig a különbség jelentős, 15%-ot meghaladó is lehet.

A munka továbbfejlesztése több irányban is lehetséges. Egy további kutatási irány lehet más országok és más technológiák – így tehát más értékelésk esetén is megvizsgálni az aukciók egyensúlyi kimenetét. Ez különösen azon technológiák esetén lehet érdekes, ahol még nem járunk a költségcsökkenésnek olyan szintjén, mint a napelemek esetén, vagyis ahol minden szereplőnek pozitív támogatásra van

szüksége a projekt megvalósításához. Ez biztosan más típusú viselkedést indukálna.

További lehetőség az iteráció továbbfejlesztése, valamint az egyensúlykeresés általános tulajdonságainak vizsgálata. Jelen esetben kis lépésszámon belül eljutottunk egy Nash-egyensúlyhoz közeli állapotba, és ez igaz volt több különböző induló ajánlati feltételezés mellett is (normális mellett egyenletes eloszlást is vizsgáltam), továbbá nem változtatott érdemben az eredményeken az sem, ha a szereplők figyelembe vették a döntetlen lehetőségét is. Érdekes lehet azonban megvizsgálni, hogy pontosan milyen feltételek mellett lehetséges ilyen kis lépésszám mellett eljutni a megoldásig, konvergál-e az iteráció egy gyakorlatilag 0 NRMSE-vel rendelkező (vagyis egy „tökéletesen Nash-egyensúlyi”) lépéshez, illetve melyek azok a keretek, amik nehezítik a megoldás megtalálását.

A téma kétségkívül aktuális marad a következő évtizedben is, hiszen számos Európai Unió tagállam fog a közeljövőben a megújulókat támogatására vonatkozó aukciókat szervezni, ahol a szereplők viselkedésének minél pontosabb ismerete előnyt jelenthet mind a költségvetés tervezésekor, mind az aukció szabályrendszerének kialakításakor. Remélem dolgozatommal sikerül nekem is hozzájárulnom a megújuló energia támogatásának minél hatékonyabb jövőbeli kiosztásához.

Irodalomjegyzék

- [1] Armantier, O., Florens, J. P., & Richard, J. F. (1998): Empirical game theoretic models: constrained equilibrium and simulation. Institut d'économie industrielle. Műhelytanulmány, frissítve 2003-ban, SUNY at Stony Brook, University of Toulouse and IDEI, University of Pittsburgh. letöltve 2021.01.14 https://www.researchgate.net/profile/Jean-Francois_Richard2/publication/237745938_EMPIRICAL_GAME_THEORETIC_MODELS_CONSTRAINED_EQUILIBRIUM_SIMULATIONS/links/54c654c60cf219bbe4f829bf.pdf
- [2] Anatolitis, V. (2016): Simulation of Onshore Wind Power Auctions in Germany Considering Different Auction Designs – an Agent Based Model, Master Thesis, Karlsruhe Institute of Technology and Technical University of Vienna
- [3] Anatolitis, V., & Welisch, M. (2017): Putting renewable energy auctions into action—An agent-based model of onshore wind power auctions in Germany. Energy Policy, 110, 394-402.
- [4] Angelus, A. (2001): Electricity price forecasting in deregulated markets. The Electricity Journal, 14(3), 32-41.
- [5] Atalay, Y., Kalfagianni, A., & Pattberg, P. (2017): „Renewable energy support mechanisms in the Gulf Cooperation Council states: Analyzing the feasibility of feed-in tariffs and auction mechanisms.” Renewable and Sustainable Energy Reviews 72 (2017): 723-733.
- [6] Bartek-Lesi, M., Mezősi, A., Pató, Z., Szabó, L., & Szajkó, G. (2019). Megújulóenergia-felhasználás Magyarországon—a későn jövők előnye? = Renewable energy use in Hungary—The benefit of latecomers?. Vezetéstudomány-Budapest Management Review, 50(kesz.), 46-60.
- [7] Bartek-Lesi, M., Mezősi, A., Szabó, L. (2019) Sikeres aukció, de van még hova fejlődni? - Az első magyar megújulóenergia tender előzetes eredményei*, blogbejegyzés, letöltve: 2021.02.10 https://metazsul.blog.hu/2019/12/11/sikeres_aukcio_de_van_meg_hova_fejlodni_az_elso_magyar_megujuloenergia_aukcio_elozetes_eredmenyeirol

- [8] Blücher, F. von, Gephart, M., Wigand, F., Anatolitis, V., Winkler, J., Held, A., Sekamane, J. K. & Kitzing, L. (2018): AURES II report D6.1: Design options for cross-border auctions, letöltve: 2019.10.02., http://aures2project.eu/wp-content/uploads/2019/06/AURES_II_D6_1_final.pdf
- [9] Blücher, F. von (2019): Cross border auctions - An emerging option to cost effectively deploy renewables; AURES II Regional Workshop, Budapest, 2019. június 25., letöltve: 2019.10.02., https://rekk.hu/downloads/events/Felix%20von%20Blücher_Navigant_Cross-boarder%20auctions.pdf
- [10] Bosshard, V., Bünz, B., Lubin, B., & Seuken, S. (2017): Computing Bayes-Nash Equilibria in Combinatorial Auctions with Continuous Value and Action Spaces. In IJCAI (pp. 119-127). letöltve: 2021.01.14 https://www.ifi.uzh.ch/ce/publications/BNE_Bosshard_et_al_IJCAI_2017-long.pdf
- [11] Bouallègue, F. B., Crouzet, J. F., & Mariano-Goulart, D. (2013): A heuristic statistical stopping rule for iterative reconstruction in emission tomography. *Annals of nuclear medicine*, 27(1), 84-95. letöltve: 2021.01.14 <https://link.springer.com/article/10.1007/s12149-012-0657-5>
- [12] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2019): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017), 2019. május 13-án módosított változat, 2019. októberében is hatályos verzió, letöltve: 2019.10.02, https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html
- [13] Bundesnetzagentur (2019): Ausschreibungen 2019, Napelemaukcíókról szóló statisztikák, letöltve: 2019.10.03., https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Solaranlagen/BeendeteAusschreibungen/BeendeteAusschreibungen_node.html
- [14] Chen, Y., & Hobbs, B. F. (2005). An oligopolistic power market model with tradable NO/sub x/permits. *IEEE Transactions on Power systems*, 20(1), 119-129.
- [15] Conejo, A. J., Plazas, M. A., Espinola, R., & Molina, A. B. (2005): Day-ahead electricity price forecasting using the wavelet transform and ARIMA models. *IEEE transactions on power systems*, 20(2), 1035-1042.
- [16] Cretu, Gabriela (2019): RES Auctions in the Energy Community, előadva: 2nd AURES II Regional Workshop Renewable Energy Auctions in Austria - Best Practices and Impact Mitigation, 2019. november 22, Bécs

- [17] CELEX:32009L0028uaresma, J. C., Hlouskova, J., Kossmeier, S., & Obersteiner, M. (2004): Forecasting electricity spot-prices using linear univariate time-series models. *Applied Energy*, 77(1), 87-106. de Keijzer, B., Markakis, E., Schäfer, G., & Telelis, O. (2013): Inefficiency of standard multi-unit auctions. In *European Symposium on Algorithms* (pp. 385-396). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [18] del Río, P., & Linares, P. (2014): Back to the future? Rethinking auctions for renewable electricity support. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 42-56.
- [19] del Río, P. (2017a): AURES Report D4.4-ZM, Auctions for Renewable Support in Zambia: Instruments and lessons learnt, letöltve: 2019.05.25, http://auresproject.eu/sites/aures.eu/files/media/documents/zambia_final.pdf
- [20] del Río, P. (2017b): AURES Report D4.4-PE, Auctions for Renewable Support in Peru: Instruments and lessons learnt, letöltve: 2019.05.25 http://auresproject.eu/sites/aures.eu/files/media/documents/peru_final.pdf
- [21] Diallo, A., Dézsi, B., Denková, A., Jakóbik, W., Jordanova, A., Kácsor, E., Madleňák, T., Misik, M., Moskwik, K., Oravcova, V., Roszkowski, M., Szabó, L., Takácsné Tóth, B., Törőcsik, Á. (2018): ‘Beyond gas’ – energy security issues in the V4 after 2020, Final Synthesis Report, Letöltve: 2019.11.03, <http://www.amo.cz/wp-content/uploads/2018/12/V4-Beyond-Gas-Beyond-2020-Final-Synthesis-Report.pdf>
- [22] ENTSO-E: Transparency Platform, <https://transparency.entsoe.eu/>
- [23] ENTSO-E (2015): Europe’s future secure and sustainable electricity infrastructure, e-Highway2050 project results, <https://docs.entsoe.eu/baltic-conf/bites/www.e-highway2050.eu/e-highway2050/>
- [24] ENTSO-E (2018): Ten Year Network Development Plan, <https://tyndp.entsoe.eu/>
- [25] Európai Bizottság (2009): Az Európai Parlament és a Tanács 2009/28/EK irányelve (2009. április 23.) a megújuló energiaforrásból előállított energia támogatásáról, valamint a 2001/77/EK és a 2003/30/EK irányelv módosításáról és azt követő hatályon kívül helyezéséről, letöltve: 2019.05.25., <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN>

- [26] Európai Bizottság (2014): Iránymutatás a 2014–2020 közötti időszakban nyújtott környezetvédelmi és energetikai állami támogatásokról (2014/C 200/01), [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014XC0628\(01\)&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014XC0628(01)&from=EN)
- [27] Európai Bizottság (2016): EU Reference Scenario 2016 Energy, transport and GHG emissions Trends to 2050, letöltve: 2019.05.26., https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160713%20draft_publication_REF2016_v13.pdf
- [28] Európai Parlament és a Tanács (2018): Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2018/1999 rendelete, az energiaunió és az éghajlat-politika irányításáról, valamint a 663/2009/EK és a 715/2009/EK európai parlamenti és tanácsi rendelet, a 94/22/EK, a 98/70/EK, a 2009/31/EK a 2009/73/EK, a 2010/31/EU, a 2012/27/EU és a 2013/30/EU európai parlamenti és tanácsi irányelv, a 2009/119/EK és az (EU) 2015/652 tanácsi irányelv módosításáról, továbbá az 525/2013/EU európai parlamenti és tanácsi rendelet hatályon kívül helyezéséről, letöltve: 2020.02.01, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1999&from=EN>
- [29] Európai Tanács (2014): Conclusions - 23/24 October 2014, letöltve: 2019.05.25. https://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/en/ec/145397.pdf
- [30] Eurostat (2021): SHARES database, datatable: Share of energy from renewable sources, letöltve: 2021.01.15, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/shares>
- [31] Fabra, N., von der Fehr, N.-H., & Harbord, D. (2002): Designing Electricity Auctions: Uniform, Discriminatory and Vickrey. Letöltve: 2019.05.17, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.297.1810&rep=rep1&type=pdf>
- [32] Federico, G., & Rahman, D. (2003): Bidding in an electricity pay-as-bid auction. *Journal of Regulatory Economics*, 24(2), 175-211.
- [33] Foxon, T. J., Gross, R., Chase, A., Howes, J., Arnall, A., & Anderson, D. (2005). UK innovation systems for new and renewable energy technologies: drivers, barriers and systems failures. *Energy policy*, 33(16), 2123-2137.

- [34] Fraunhofer ISE (2015): Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Study on behalf of Agora Energiewende, letöltve: 2019.05.25. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/AgoraEnergiewende_Current_and_Future_Cost_of_PV_Feb2015_web.pdf
- [35] Fraunhofer (2018): Levelized Cost Of Electricity, Renewable Energy Technologies, March 2018, letöltve: 2019.05.25. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/cost-of-electricity.html>
- [36] Fraunhofer (2019): Energy charts database, Net installed electricity generation capacity in Germany, letöltve: 2019.10.02, https://www.energy-charts.de/power_inst.htm
- [37] Garcia, R. C., Contreras, J., Van Akkeren, M., & Garcia, J. B. C. (2005): A GARCH forecasting model to predict day-ahead electricity prices. IEEE transactions on power systems, 20(2), 867-874.
- [38] Gazdasági és Közlekedési Minisztérium (2002): 56/2002. (XII. 29.) GKM rendelet az átvételi kötelezettség alá eső villamos energia átvételének szabályairól és árainak megállapításáról, letöltve: 2019.09.30, http://www.panenerg.hu/webimages/files/56_2002_GKM_rendelet.pdf
- [39] Güth, W., R. Ivanova-Stenzel & E. Wolfstetter (2005): “Bidding Behavior in Asymmetric Auctions: An Experimental Study,” European Economic Review 49:1891-1913.
- [40] Hailu, A., & Thoyer, S. (2006): Multi-unit auction format design. Journal of Economic Interaction and Coordination, 1(2), 129-146.),
- [41] Haufe, M. C., & Ehrhart, K. M. (2018): Auctions for renewable energy support–Suitability, design, and first lessons learned. Energy policy, 121, 217-224.
- [42] Higgins, N. A. (2010): Computational and Experimental Market Design (Doktori értekezés), University of Maryland, letöltve: 2021.01.14 <https://drum.lib.umd.edu/handle/1903/10260>
- [43] Hudson, R. (2000): Analysis of uniform and discriminatory price auctions in restructured electricity markets. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- [44] IEA (2015): Projected Costs of Generating Electricity, 2015 Edition, Paris, France (letöltve: 2017.05.26), <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2015/7057-proj-costs-electricity-2015.pdf>

- [45] IEA (2017): Renewables 2017, Analysis and Forecasts to 2022, letöltve: 2019.05.26 <https://www.iea.org/renewables2017/>
- [46] IEA (2018): Trends 2018 in photovoltaic applications Report IEA PVPS T1-34:2018, letöltve: 2019.05.26. http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/intranet/task1/IEA_PVPS_Trends_2018_in_Photovoltaic_Applications_03.pdf
- [47] IRENA (2016): The Power To Change: Solar And Wind Cost Reduction Potential to 2025, International Renewable Energy Agency, Bonn, Germany, 2016., letöltve: 2019.05.26, <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/The-Power-to-Change-Solar-and-Wind-Cost-Reduction-Potential-to-2025>
- [48] IRENA (2018): Renewable Power Generation Costs in 2017, letöltve: 2019.05.26. <http://www.irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-power-generation-costs-in-2017>
- [49] Itaba, S., & Mori, H. (2017): A Fuzzy-Preconditioned GRBFN Model for Electricity Price Forecasting. *Procedia Computer Science*, 114, 441-448.
- [50] Iychettira, K., Hakvoort, R., Linares, P., & Jeu, R. (2017): Towards a comprehensive policy for electricity from renewable energy: designing for social welfare, *Applied Energy*, Volume 187, 1 February 2017, Pages 228–242
- [51] Iychettiraa K., Hakvoort, R., & Linares, P. (2017): Towards a comprehensive policy for electricity from renewable energy: An approach for policy design, *Energy Policy*, Volume 106, July 2017, Pages 169–182
- [52] Jakaša, T., Andročec, I., & Sprčić, P. (2011, May): Electricity price forecasting—ARIMA model approach. In *Energy Market (EEM), 2011 8th International Conference on the European* (pp. 222-225). IEEE.
- [53] Jensen, S. G., & Meibom, P. (2008). Investments in liberalised power markets: Gas turbine investment opportunities in the Nordic power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 30(2), 113-124.
- [54] Kácsor, E., Kerekes, L., & Mezősi, A. (2019). Egy sikeres piacnyitás története? Liberalizáció a magyar villamosenergia-szektorban= Is it a history of a successful market opening? Liberalization in the Hungarian electricity sector. *Vezetéstudomány-Budapest Management Review*, 50(ksz.), 19-31.
- [55] Kácsor, E. (2020) Hatékony kiosztás a nagyoknál, sok érvénytelen pályázat a kicsiknél, Végleges METÁR eredmények, blogbejegyzés, letöltve: 2021.02.10 https://metazsul.blog.hu/2020/04/01/hatekony_kiosztas_a_nagyoknal_sok_ervenytelen_palyazat_a_kicsiknel?token=8441d8e712dbe1b31009ea4266ec76e4

- [56] Keles, D., Scelle, J., Paraschiv, F., & Fichtner, W. (2016): Extended forecast methods for day-ahead electricity spot prices applying artificial neural networks. *Applied energy*, 162, 218-230.
- [57] Klemperer, P. (1999): *Auction Theory: A guide to the literature* (Vol. 13) (No. 3).
- [58] Klobasa, M. & Ragwitz, M. (2018): *Diskussionspapier Contract for Difference Regime (CfD) – Mögliche Ausgestaltungen*, Karlsruhe, Fraunhofer
- [59] Kormány (2007): 389/2007. (XII. 23.) Korm. rendelet a megújuló energiaforrásból vagy hulladékból nyert energiával termelt villamos energia, valamint a kapcsoltn termelt villamos energia kötelező átvételéről és átvételi áráról, letöltve: 2019.09.30, http://njt.hu/cgi_bin/njt_doc.cgi?docid=112846.293540
- [60] Kotek, P. (2016): Honnan fűj? A szélerőműveket érintő szabályozás változásairól. letöltve: 2019.09.30, https://rekk.hu/downloads/academic_publications/rekk_policybrief_2016_05.pdf
- [61] Köztársasági Elnöki Hivatal (2019): Áder János köztársasági elnök beszéde az ENSZ-klímacsúcson New Yorkban, az ENSZ székházában, letöltve: 2019.10.01., https://www.keh.hu/beszedek/2681-Ader_Janos_koztarsasagi_elnok_beszede_az_ENSZ_klimacsucson-New_Yorkban_az_ENSZ_szekhazaban&pnr=1
- [62] Kreiss, J., Ehrhart, K., & Haufe, M. (2017): „Appropriate design of auctions for renewable energy support—Prequalifications and penalties.” *Energy Policy* 101, 512-520.
- [63] Krishna, V. (2010): *Auction theory – Second edition*, Elsevier, London, UK
- [64] Kumar, V., Singh, N., Singh, D. K., & Mohanty, S. R. (2018): Short-Term Electricity Price Forecasting Using Hybrid SARIMA and GJR-GARCH Model. In *Networking*
- [65] Kylili, A., Fokaides, P. A. (2015): Competitive auction mechanisms for the promotion renewable energy technologies: The case of the 50 MW photovoltaics projects in Cyprus, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42 (2015) 226–233 pp
- [66] Lazard (2017): *Lazard’s Levelized Cost of Energy analysis – Version 11.0*, letöltve: 2019.05.26. <https://www.lazard.com/media/450337/lazard-levelized-cost-of-energy-version-110.pdf>

- [67] Luo, X., Stordal, A. S., Lorentzen, R. J., & Naevdal, G. (2015): Iterative ensemble smoother as an approximate solution to a regularized minimum-average-cost problem: theory and applications. arXiv preprint arXiv:1505.01135. letöltve: 2021.01.14 <https://arxiv.org/pdf/1505.01135.pdf>
- [68] Marshall, R. C., Meurer, M. J., Richard, J. F., & Stromquist, W. (1994): Numerical analysis of asymmetric first price auctions. *Games and Economic behavior*, 7(2), 193-220. letöltve: 2021.01.14 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0899825684710451>
- [69] McAfee, R. P., & McMillan, J. (1987): Auctions and bidding. *Journal of economic literature*, 25(2), 699-738.)
- [70] MEKH (2016): 17/2016 MEKH rendelet a megújuló energiaforrásokból termelt villamos energia működési támogatásának mértékéről, letöltve: 2017.05.26, https://net.jogtar.hu/jr/gen/hjegy_doc.cgi?docid=A1600017.MEK×hift=ffffff4&txtreferer=00000001.TXT
- [71] MEKH (2019): Pályázati kiírási dokumentáció, Megújuló energiaforrásból termelt villamos energia támogatása pályázati zöld prémium rendszer keretében, letöltve: 2019.10.01, http://www.mekh.hu/download/fix/metar_kiirasi_dokumentacio_20190902
- [72] MEKH(2020): A 2020-as METÁR-pályázat bontási adatai, letöltve: 2021.02.10 <http://www.mekh.hu/a-2020-as-metar-palyazat-bontasi-adatai>
- [73] Mezősi, A., & Szabó, L. (2016). Model based evaluation of electricity network investments in Central Eastern Europe. *Energy Strategy Reviews*, 13, 53-66.
- [74] Mezősi, A., Pató, Zs. & Szabó, L. (2017a): Meg-megújuló statisztikák, REKK Policy brief, 2017/1, letöltve: 2019.10.01, https://rekk.hu/downloads/academic_publications/rekk_policybrief_hu_2017_01.pdf
- [75] Mezősi, A., Kácsor, E., Beöthy, Á., Törőcsik, Á., & Szabó, L. (2017b). Modelling support policies and renewable energy sources deployment in the Hungarian district heating sector. *Energy & Environment*, 28(1-2), 70-87.
- [76] Mezősi, A., Szabó, L., & Szabó, S. (2018). Cost-efficiency benchmarking of European renewable electricity support schemes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98, 217-226.

- [77] Mezősi, A., Bartek-Lesi, M., Dézsi, B., Diallo, A., Kácsor, E., Kerekes, L., Kotek, P., Mészégetőné Keszthelyi, A., Rácz, V., Selei, A., Szajkó, G., Szabó, L., & Vékony, A. (2019): A hazai nagykereskedelmi villamosenergia-piac modellezése és ellátásbiztonsági elemzése 2030-ig különböző erőművi forgatókönyvek mellett, REKK, https://rekk.hu/downloads/projects/2019_Arampiac_REKK.pdf
- [78] Milgrom, P. R., & Weber, R. J. (1982): A Theory of Auctions and Competitive Bidding (Vol. 50) (No.5). Letöltve: 2019.05.17, <http://www.jstor.org/stable/1911865?origin=crossref>, doi: 10.2307/1911865
- [79] Morgan, J. (2001): Efficiency in auctions: theory and practice. Updated copies of this paper can be found at www.wss.princeton.edu/~rjmorgan. Journal of International Money and Finance, 20(6), 809-838.
- [80] Mori, H., & Nakano, K. (2016): An Efficient Hybrid Intelligent Method for Electricity Price Forecasting. Procedia Computer Science, 95, 287-296.
- [81] Naroditskiy, V., & Greenwald, A. (2007): Using iterated best-response to find Bayes-Nash equilibria in auctions. In PROCEEDINGS OF THE NATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE (Vol. 22, No. 2, p. 1894). Menlo Park, CA; Cambridge, MA; London; AAAI Press; MIT Press, letöltve: 2021.01.14 <https://www.aaai.org/Papers/AAAI/2007/AAAI07-322.pdf>
- [82] Nemzetgazdasági Miniszter (2016): A nemzetgazdasági miniszter 34/2016. (IX. 14.) NGM rendelete a Villamosmű Műszaki-Biztonsági Követelményei Szabályzat hatályba léptetéséről szóló 8/2001. (III. 30.) GM rendelet, és a villamosművek, valamint a termelői, magán és közvetlen vezetékek biztonsági övezetéről szóló 2/2013. (I. 22.) NGM rendelet módosításáról,
- [83] Nemzeti Fejlesztési Minisztérium (2011): Szabályozási koncepció a megújuló- és alternatív energiaforrásokból előállított hő- és villamos energia kötelező átvételi rendszerről, letöltve: 2019.09.30, http://metar.hu/metar_szabalyozas_torveny.html
- [84] Nemzeti Fejlesztési Minisztérium (2016a): 62/2016 NFM rendelet a megújuló energiaforrásból származó villamos energia termelési támogatás korlátairól és a prémium típusú támogatásra irányuló pályázati eljárásról, letöltve: 2017.05.26, https://net.jogtar.hu/jr/gen/hjegy_doc.cgi?docid=a1600062.nfm

- [85] Nemzeti Fejlesztési Minisztérium (2016b): 63/2016 NFM rendelet a megújuló energiaforrásokból nyert energiával termelt villamos energia működési támogatásának finanszírozásához szükséges pénzeszköz mértékének megállapítási módjára és a megfizetésre vonatkozó részletes szabályokról, letöltve: 2017.05.26, https://net.jogtar.hu/jr/gen/hjegy_doc.cgi?docid=a1600063.nfm
- [86] Nemzeti Fejlesztési Minisztérium (2016c): 55/2016 NFM rendelet a megújuló energiát termelő berendezések és rendszerek beszerzéséhez és működtetéséhez nyújtott támogatások igénybevételének műszaki követelményeiről, letöltve: 2017.05.26, https://net.jogtar.hu/jr/gen/hjegy_doc.cgi?docid=A1600055.NFM×hift=ffffff4&txtreferer=00000001.TXT
- [87] Novshek, W., & Sonnenschein, H. (1982): Fulfilled expectations Cournot duopoly with information acquisition and release. *The Bell Journal of Economics*, 214-218. letöltve: 2021.01.14 https://www.jstor.org/stable/3003442?seq=1#metadata_info_tab_contents
- [88] Osepayshvili, A., Wellman, M. P., Reeves, D. M. & MacKieMason J. K. (2005): Self-Confirming Price Prediction for Bidding in Simultaneous Ascending Auctions. Műhelytanulmány, University of Michigan Ann Arbor, MI 48109 USA. letöltve: 2021.01.14 <https://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2005/202/pdf/05011.MacKieMasonJeffrey.Paper.202.pdf>
- [89] Ostrovsky, M., & Schwarz, M. (2011): Reserve prices in internet advertising auctions: a field experiment. *EC*, 11, 59-60. Letöltve: 2019.05.17. <https://web.stanford.edu/~ost/papers/rp.pdf>
- [90] Pató, Zs. (2016): A hurok szorításában, REKK Jelentés az Energia-piacokról 2016/1, letöltve: 2019.10.02, https://rekk.hu/downloads/publications/Rekk_jelentes_2016_1.pdf#page=11
- [91] Pineau, P. O., & Zaccour, G. (2007). An oligopolistic electricity market model with interdependent segments. *The Energy Journal*, 28(3), 165.
- [92] Rabinovich, Z., Naroditskiy, V., Gerding, E.H., & Jennings N.R. (2013): Computing pure bayesian-nash equilibria in games with finite actions and continuous types. *Artificial Intelligence*, 195:106–139, 2013.
- [93] Reeves, D. & Wellman, M. (2004): Computing best-response strategies in infinite games of incomplete information. In *Proceedings of the 20th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI)*, pages 470–478, 2004.

- [94] Reiley, D. H. (2006): Field experiments on the effects of reserve prices in auctions: More magic on the internet. *The RAND Journal of Economics*, 37(1), 195-211. Letöltve: 2019.05.17 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1756-2171.2006.tb00012.x>
- [95] res-legal (2019): RES Legal, Legal sources on renewable energy, Letöltve: 2019.11.03, <http://www.res-legal.eu/en/home/>
- [96] Selei, A. (2017). Az európai fogyasztók jólétének az elemzése: Vizsgálatok gázpiaci modellezés segítségével (Doctoral dissertation, Budapesti Corvinus Egyetem).
- [97] Shrimali, G., Konda, C., & Farooquee, A. A. (2016): „Designing renewable energy auctions for India: Managing risks to maximize deployment and cost-effectiveness.” *Renewable Energy* 97 (2016): 656-670.
- [98] Singh, N., Mohanty, S. R., & Shukla, R. D. (2017): Short term electricity price forecast based on environmentally adapted generalized neuron. *Energy*, 125, 127-139.
- [99] Sternkopf, T. (2019): res-legal.eu, Tenders (Sliding feed-in premium) in Germany, letöltve: 2019.10.02, <http://www.res-legal.eu/search-by-country/germany/single/s/res-e/t/promotion/aid/tenders-auctioning-the-feed-in-support-for-ground-mounted-installations/lastp/135/>
- [100] Sugianto, L. F., & Liao, K. Z. (2014): Comparison of different auction pricing rules in the electricity market. *Modern Applied Science*, 8(1), 147.
- [101] Szabó, L., Mezősi, A., Pató, Zs., Kelemen, Á., Beöthy, Á., Kácsor, E., Kaderják, P., Resch, G., Liebmann, L., Hiesl, A., et al. (2017): South East Europe Electricity Roadmap: Country report: Albania, Budapest, Magyarország : REKK Regionális Energia- és Infrastruktúra-politikai Együttműködésért Alapítvány, 52 p., letöltve: 2020.02.01, https://rekk.hu/downloads/projects/SEERMAP_CR_ALBANIA_A4_ONLINE.pdf
- [102] Szabó, L., Mezősi, A., Pató, Zs., Kelemen, Á., Beöthy, Á., Kácsor, E., Kaderják, P., Resch, G., Liebmann, L., Hiesl, A., et al. (2017): South East Europe Electricity Roadmap: Regional report: South East Europe, Budapest, Magyarország : REKK Regionális Energia- és Infrastruktúra-politikai Együttműködésért Alapítvány, 64 p., letöltve: 2020.02.02, https://rekk.hu/downloads/projects/SEERMAP_RR_SEE_A4_ONLINE.pdf
- [103] Szabó, L., Bartek-Lesi, M., Diallo, A., & Dézsi, B. (2019): AURES – II: Cross-border auctions – considerations for Hungary, előadva: Project Meeting 2019. november 20-21, Bécs

- [104] Szabó, L., Kelemen, Á., Mezősi, A., Pató, Z., Kácsor, E., Resch, G., & Liebmman, L. (2019). South East Europe electricity roadmap—modelling energy transition in the electricity sectors. *Climate policy*, 19(4), 495-510. <https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1532390>
- [105] Tierney, S. F., Schatzki, T., & Mukerji, R. (2008): Uniform-pricing versus pay-as-bid in wholesale electricity markets: does it make a difference?. New York ISO.
- [106] Varga, K. (2020b) Jönnnek a hatalmas naperőműparkok? A MEKH kiírta a második METÁR-pályázatot, blogbejegyzés, letöltve: 2021.02.10 https://metazsul.blog.hu/2020/08/11/jonnek_a_hatalmas_naperomuparkok
- [107] Varga, K. (2020b) Egy ábrán az eddigi METÁR-aukciók, blogbejegyzés, letöltve: 2021.02.10 https://metazsul.blog.hu/2020/10/27/egy_abran_az_eddigi_metar-aukciok?token=cee4e0c84a1d6c635392d03f56752174
- [108] Viana, A. G., & Ramos, D. S. (2018). Outcomes from the first large-scale solar PV auction in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 219-228.
- [109] Vickrey, W. (1961): “Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders,” *Journal of Finance*, 16(1), 8–37.
- [110] Vorobeychik, Y., Wellman, M. (2008): Stochastic search methods for nash equilibrium approximation in simulation-based games. In *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, pp 1055–1062, 2008.
- [111] Welisch, M., Ortner, A., & Resch, G. (2016). Assessment of RES technology market values and the merit-order effect—an econometric multi-country analysis. *Energy & Environment*, 27(1), 105-121.
- [112] Welisch, M. (2019): Multi-unit renewables auctions for small markets- Designing the Danish multi-technology auction scheme. *Renewable energy*, 131, 372-380.
- [113] Wigand, F., Förster, S., Amazo, A., & Tiedemann, S. (2016): AU-RES Report D4.2, Auctions for Renewable Energy Support: Lessons Learnt from International Experiences, letöltve: 2019.05.25, http://auresproject.eu/sites/aures.eu/files/media/documents/aures_wp4_synthesis_report.pdf

- [114] Wirth, H. (2019): Recent Facts about Photovoltaics in Germany, letöltve: 2019.10.02., <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany.pdf>
- [115] Zhao, Z., Wang, C., Nokleby, M., & Miller, C. J. (2017): Improving short-term electricity price forecasting using day-ahead LMP with ARIMA models. In Power & Energy Society General Meeting, 2017 IEEE (pp. 1-5). IEEE.

Függelék

Az EEMM modell technikai specifikációja

A TÖKÉLETESEN VERSENYZŐ piac feltételezésből adódóan az egyensúlyi állapot a teljes modellezett régió jólétének együttes maximalizálásával kapható – a termelők és a fogyasztók jólétei összegének maximumát keressük minden modellezett óra esetén. Ennek a jólétnek a számítása a következőképpen történik:

$$W = \sum_{i=1}^n TCS_m - TC$$

A jólét tehát a bruttó fogyasztói többlet (vagyis a keresleti görbe alatti terület) és az áramtermeléshez kapcsolódó változó költségek különbsége. A két tétel kibontva a következőképpen írható fel:

$$TCS_m = \int_0^{Q_m} D_m^{-1}(Q) dQ = A_m Q_m - \frac{B_m}{2} Q_m^2 \text{ és } TC = \sum_{p=1}^P c_p q_p$$

A fenti értékek különbségének maximumát három feltétel mellett keressük. Minden termelőegységhez tartozik egy kapacitáskorlát: a blokk termelése nem lehet nagyobb, mint a kapacitása, de nagyobb vagy egyenlő kell, hogy legyen, mint nulla. A második feltétel a határkeresztező kereskedelemre vonatkozik, a szállítás nem lépheti át az adott metszék (adott irányú) kapacitását. A harmadik feltétel pedig a kereslet és kínálat egyensúlyára vonatkozik: a teljes fogyasztás minden piac esetén meg kell, hogy egyezzen a hazai erőművi termelés és a nettó import (ami negatív is lehet!) összegével minden egyes modellezett óra esetén. (Az utolsó feltétel esetén δ értéke 1, ha a kereskedelem A-ból B irányába történik, és -1 ellenkező esetben).

1. $0 \leq q_p \leq C_p$,
2. $N_i \leq t_i \leq N_i$,
3. $Q_m = \sum_p q_p + \sum_i \delta_{i,m} t_i$.

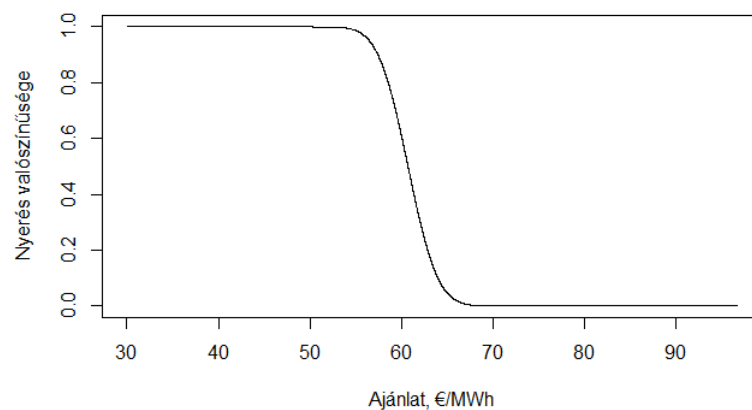
A fentieket összefoglalva tehát a következő maximalizáció végzi a modellt:

$$W = \sum_{m=1}^M \left(A_m \left(\sum_p q_p + \sum_i \delta_{i,m} t_i \right) - \frac{B_m}{2} \left(\sum_p q_p + \sum_i \delta_{i,m} t_i \right)^2 \right) - \sum_{p=1}^P c_p q_p \rightarrow \max \quad (1)$$

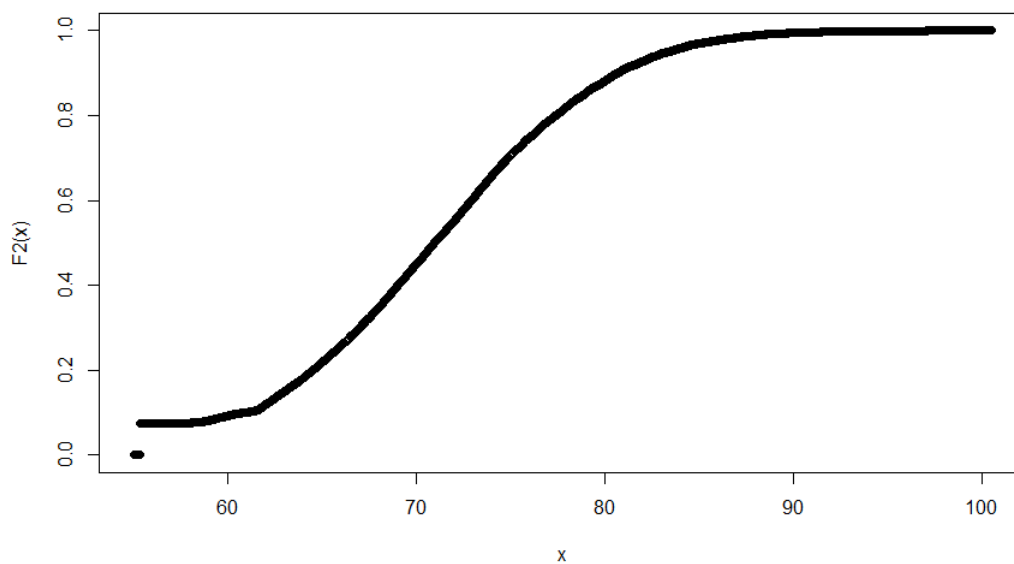
Jelölések: piacok: $m = 1, \dots, M$; fogyasztás: Q ; erőművi blokk: p ; erőművi termelés: q ; változó költség: c ; export-import áramlás: t ; erőművi kapacitáskorlát: C ; kapacitáskorlát a határokon: N ; teljes jólét: W ; Teljes fogyasztói többlet: TCS ; Villamosenergia-termelés költsége: TC , kereslet: D ; keresleti görbét meghatározó konstansok: A és B

Az iteráció egyes lépéseire tartozó ábrák és eloszlásfüggvények

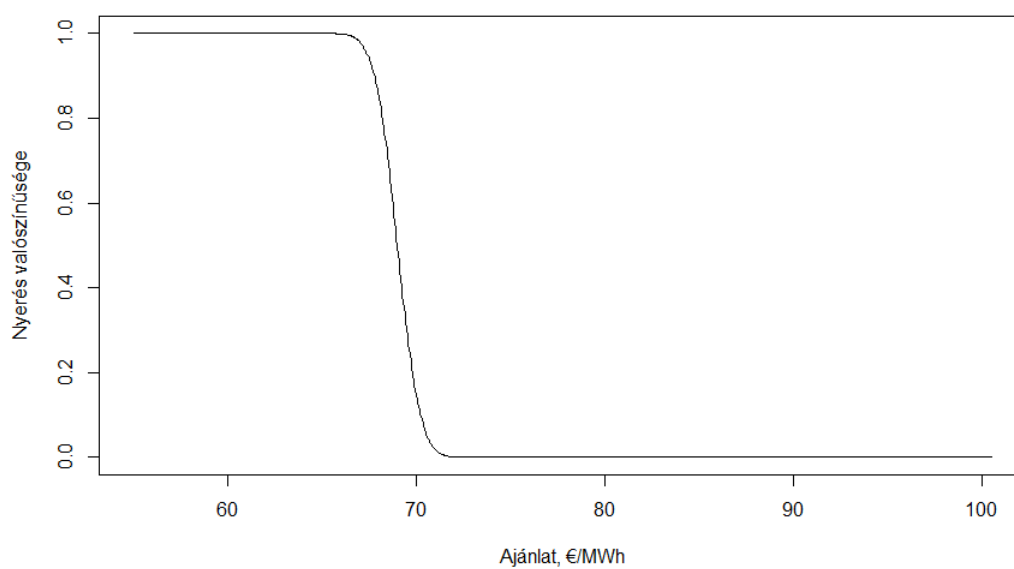
A normális eloszlásból induló, 10 000 adatpontot tartalmazó eset



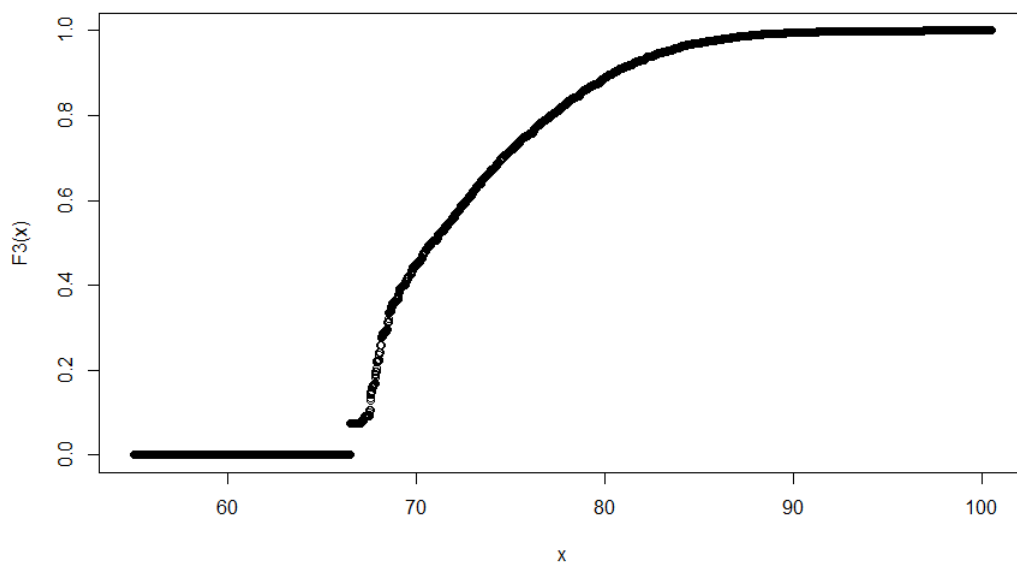
1. ábra. A nyereség valószínűsége különböző ajánlatok esetén, F_1 ajánlati eloszlást feltételezve, forrás: saját ábra



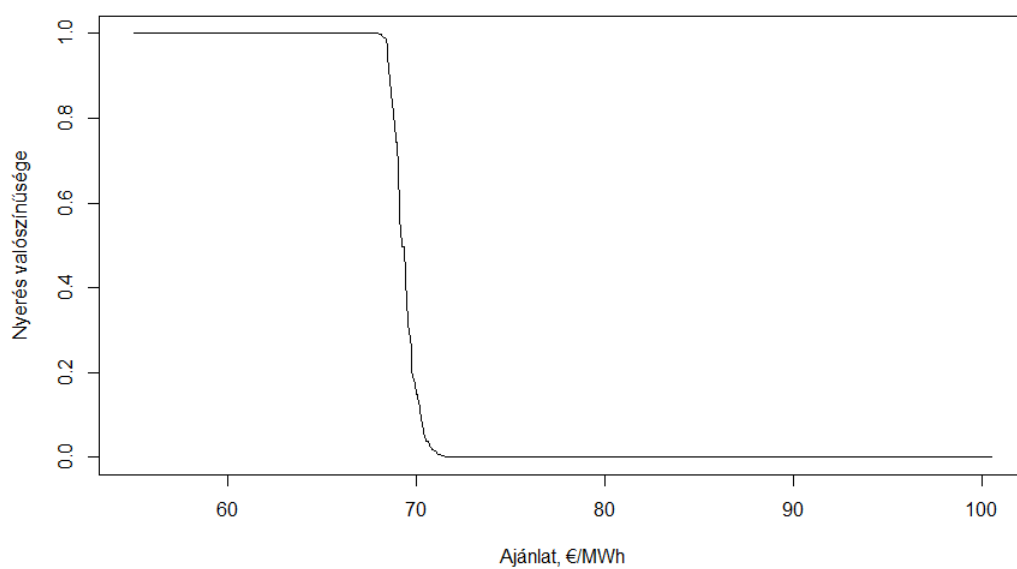
2. ábra. Az illesztett F_2 ajánlati eloszlás, forrás: saját ábra



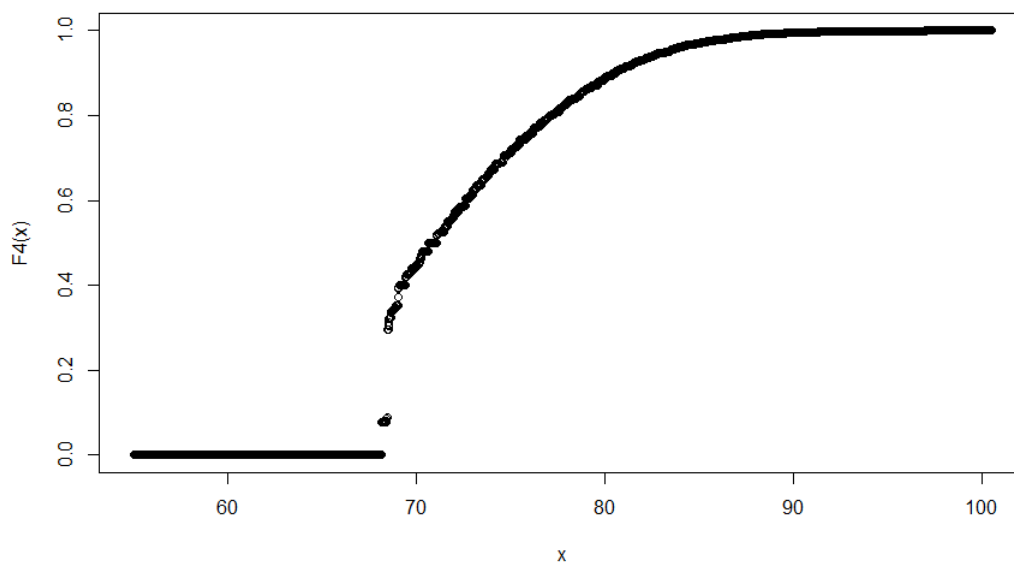
3. ábra. A nyereség valószínűsége különböző ajánlatok esetén, F_2 ajánlati eloszlást feltételezve, forrás: saját ábra



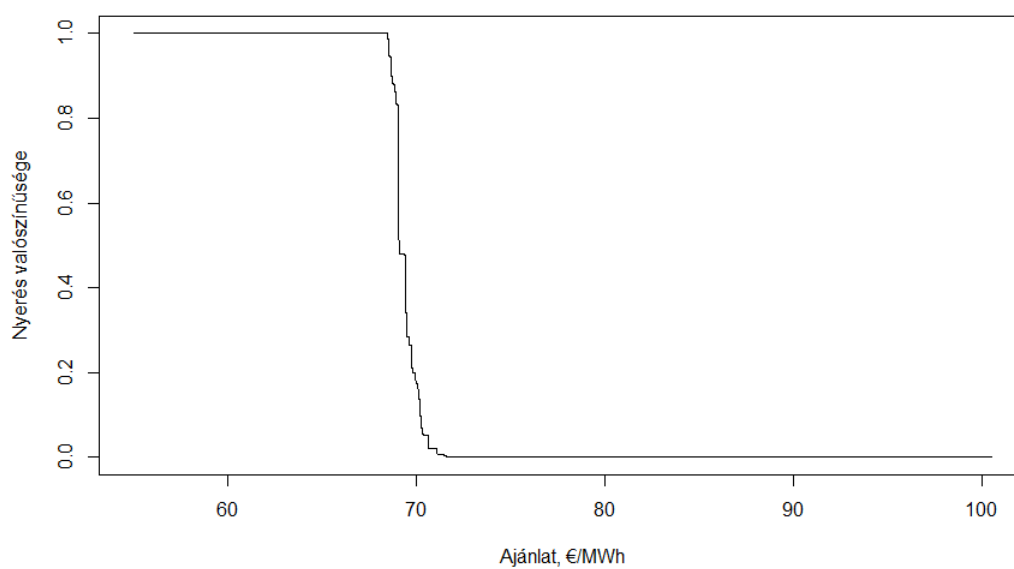
4. ábra. Az illesztett F_3 ajánlati eloszlás, forrás: saját ábra



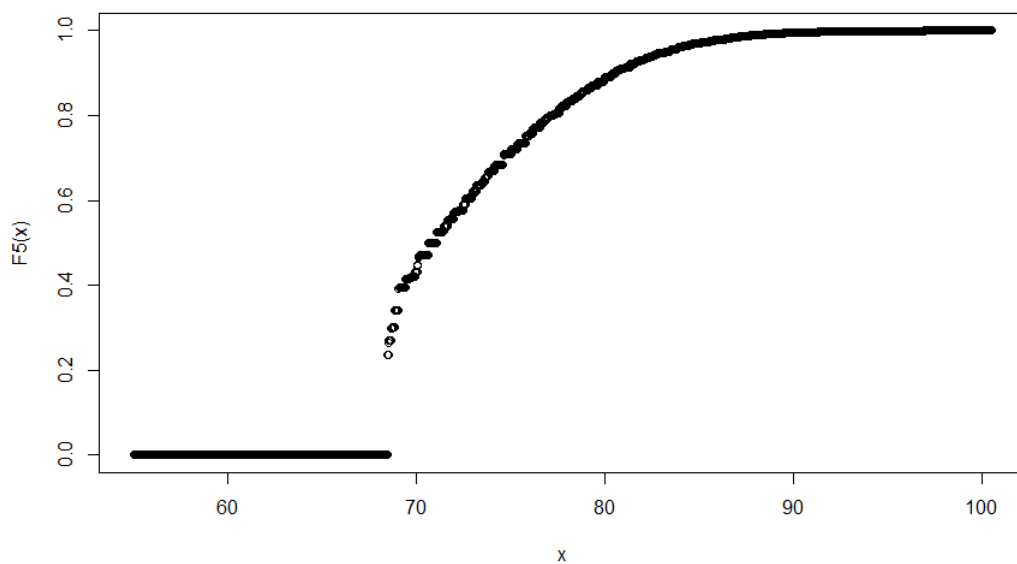
5. ábra. A nyeres valószínűsége különböző ajánlatok esetén, F_3 ajánlati eloszlást feltételezve, forrás: saját ábra



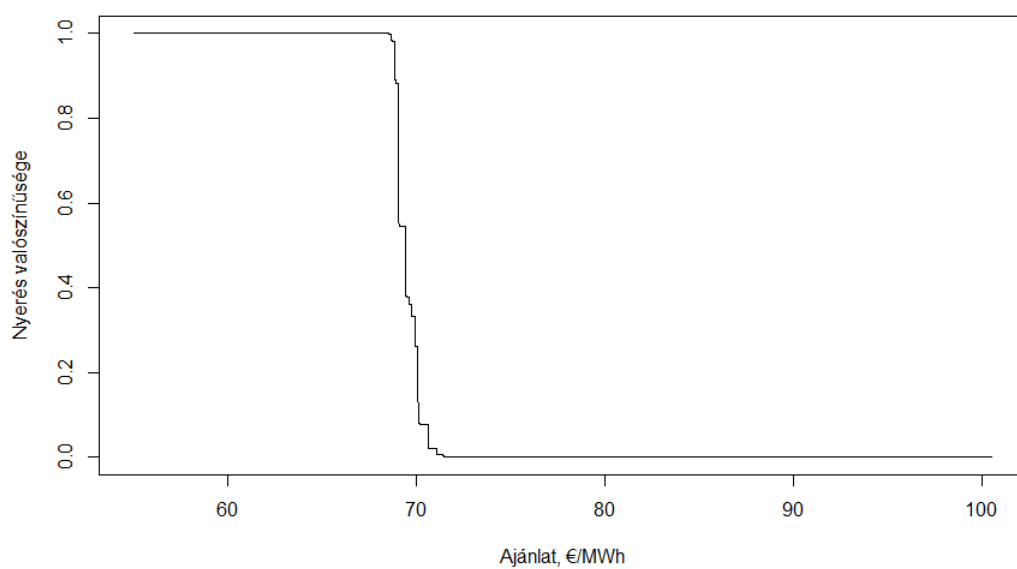
6. ábra. Az illesztett F_4 ajánlati eloszlás, forrás: saját ábra



7. ábra. A nyereség valószínűsége különböző ajánlatok esetén, F_4 ajánlati eloszlást feltételezve, forrás: saját ábra

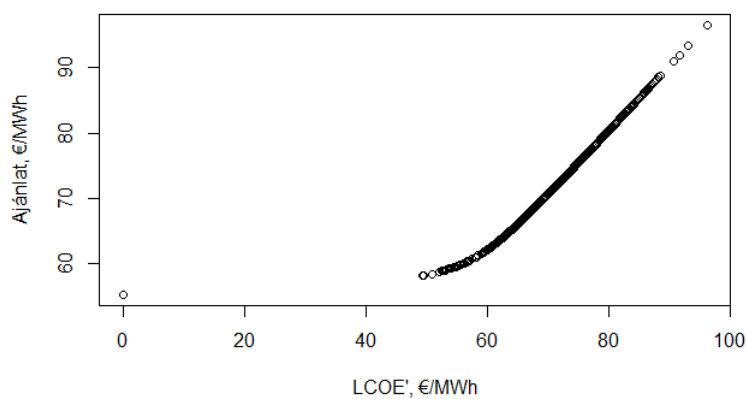


8. ábra. Az illesztett F_5 ajánlati eloszlás, forrás: saját ábra

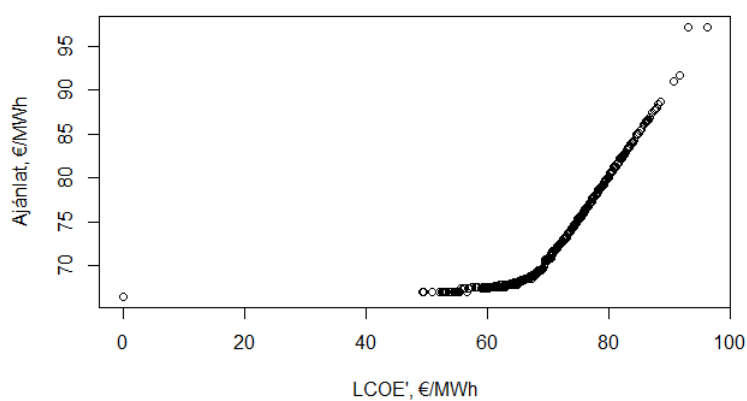


9. ábra. A nyerés valószínűsége különböző ajánlatok esetén, F_5 ajánlati eloszlást feltételezve, forrás: saját ábra

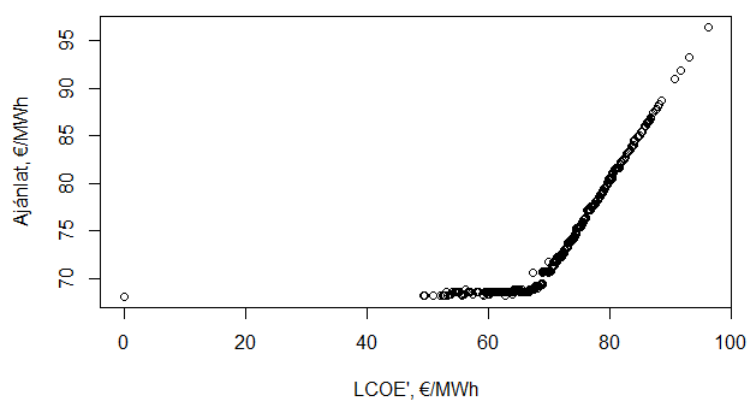
A normális eloszlásból induló, 1 000 adatpontot tartalmazó eset



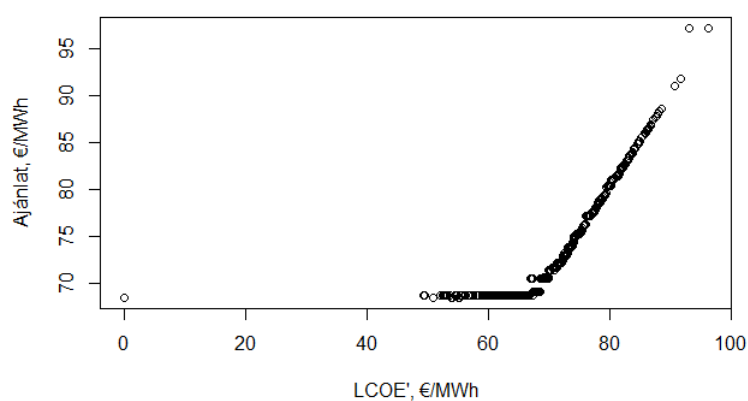
10. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_1 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



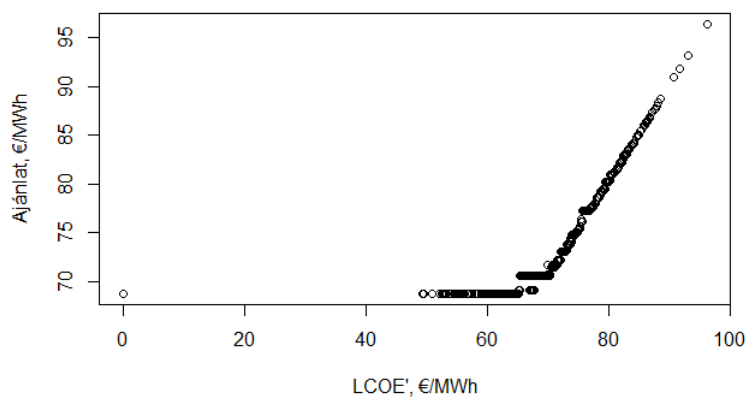
11. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_2 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



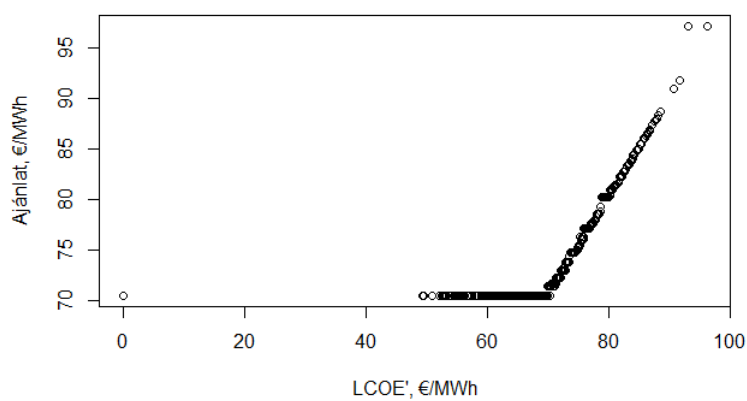
12. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_3 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



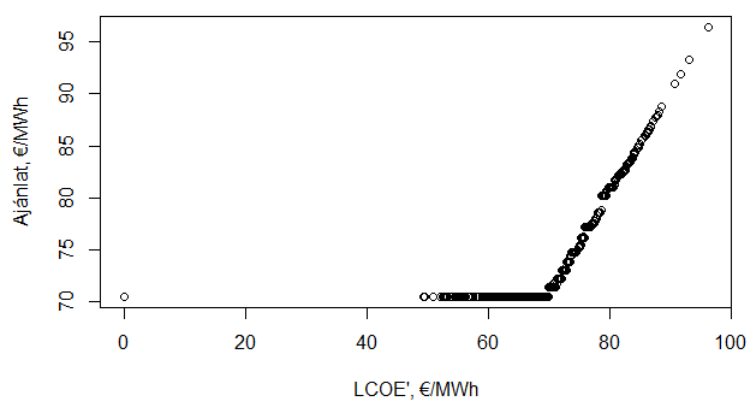
13. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_4 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



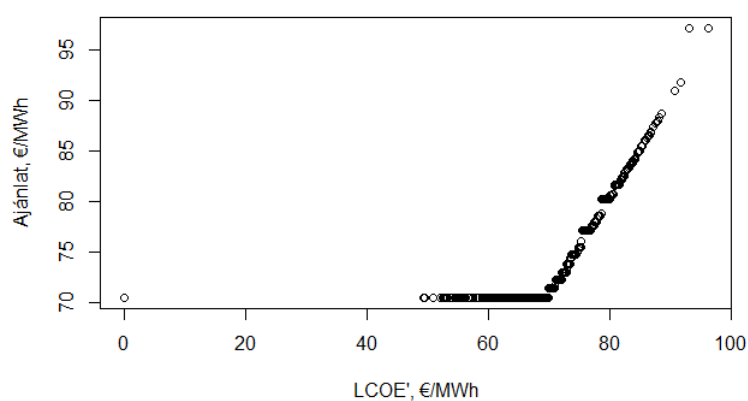
14. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_5 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



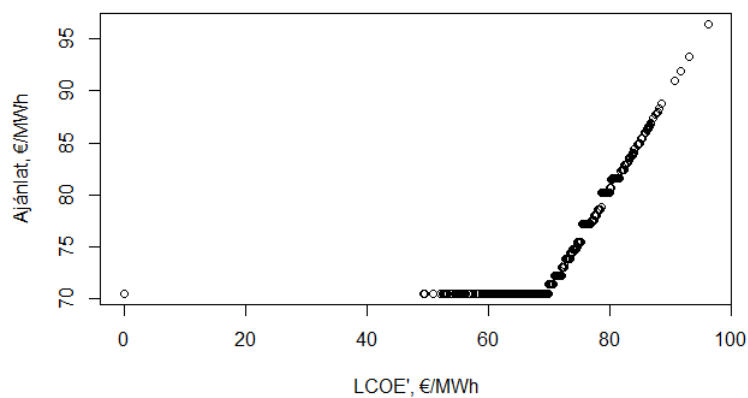
15. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_6 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



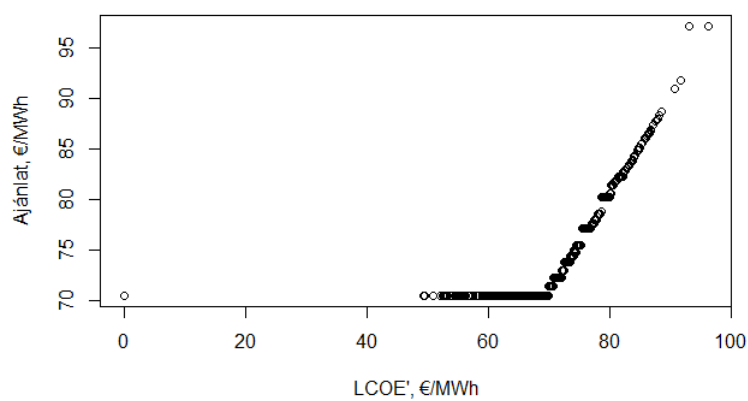
16. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_7 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



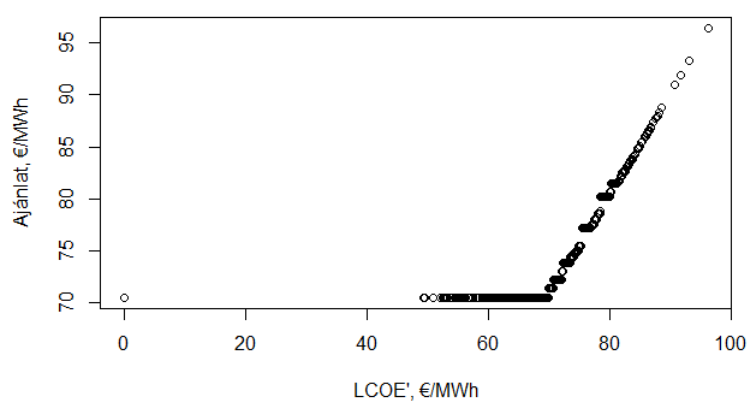
17. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_8 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



18. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_9 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra

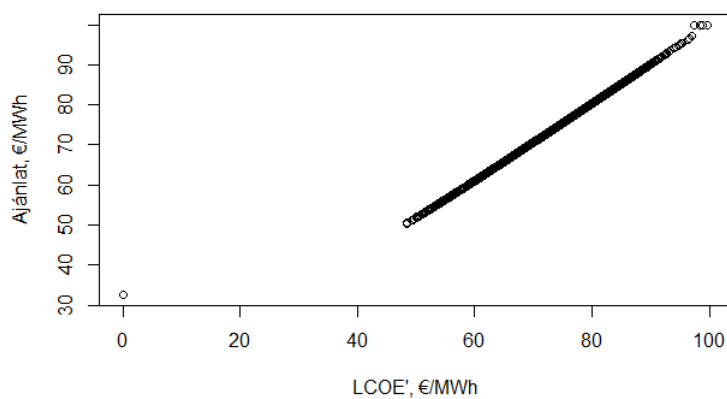


19. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_{10} ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra

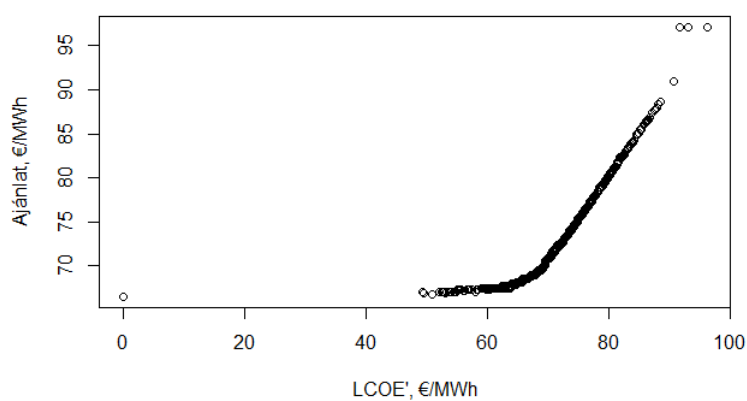


20. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_{11} ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra

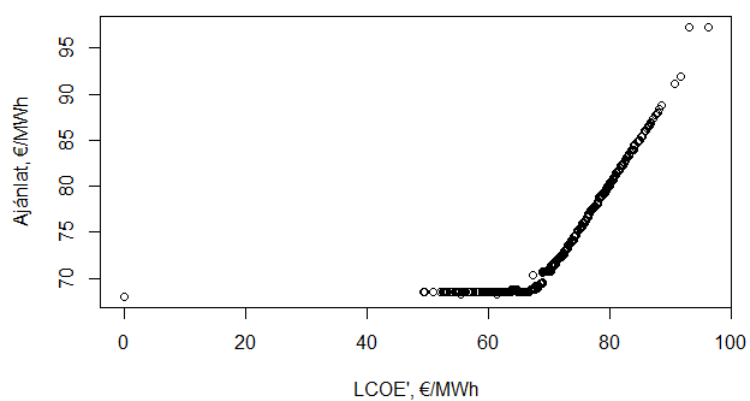
Az egyenletes eloszlásból induló, 1 000 adatpontot tartalmazó eset



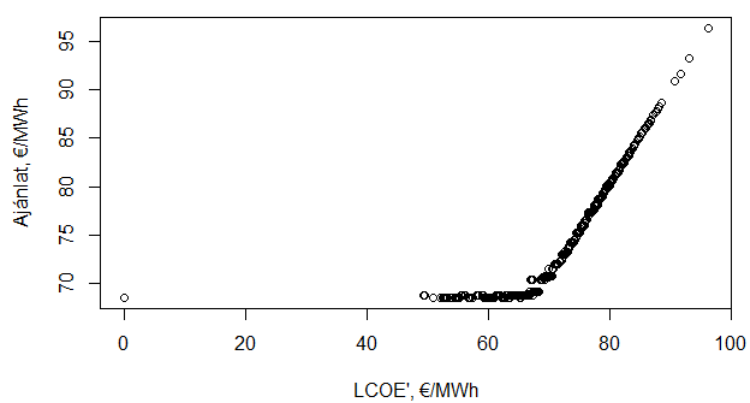
21. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_1 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



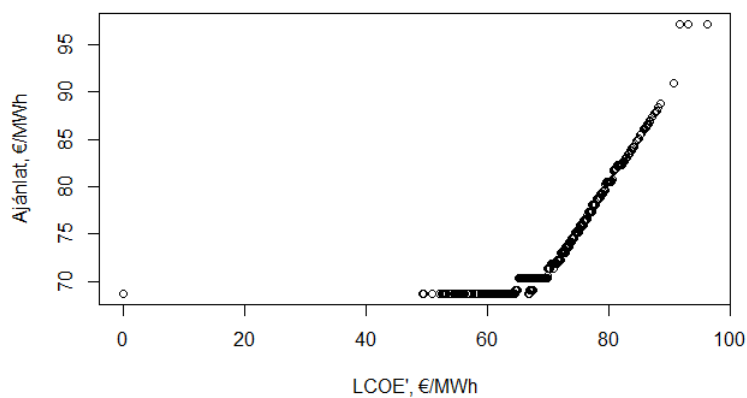
22. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_2 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



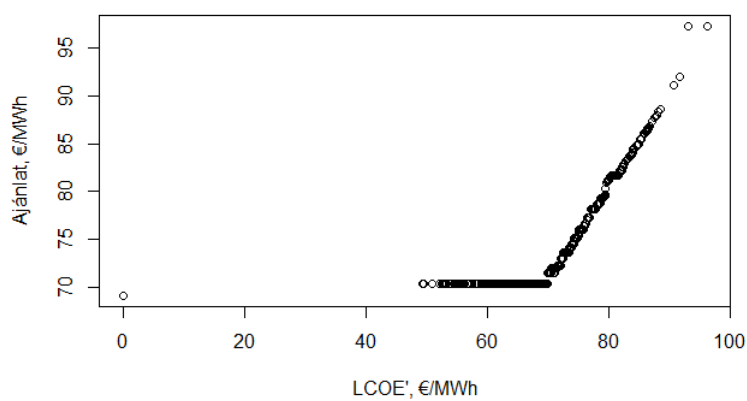
23. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_3 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



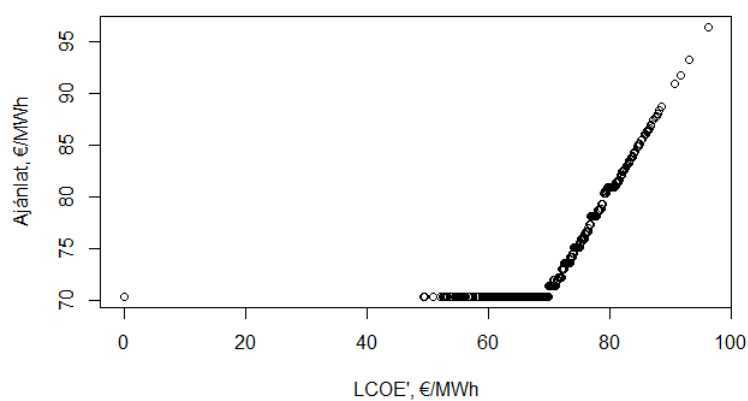
24. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_4 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



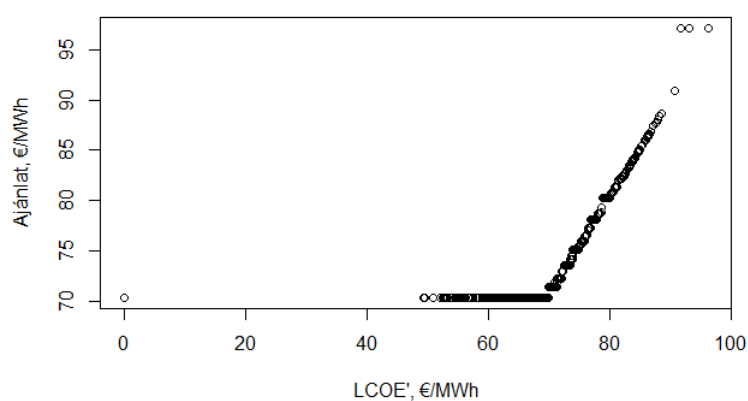
25. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_5 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



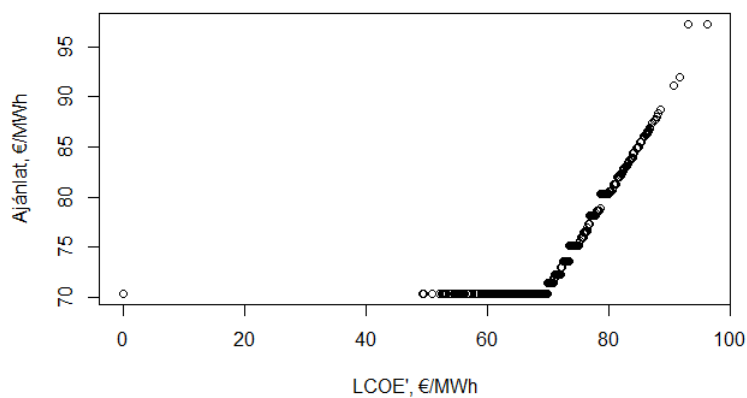
26. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_6 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



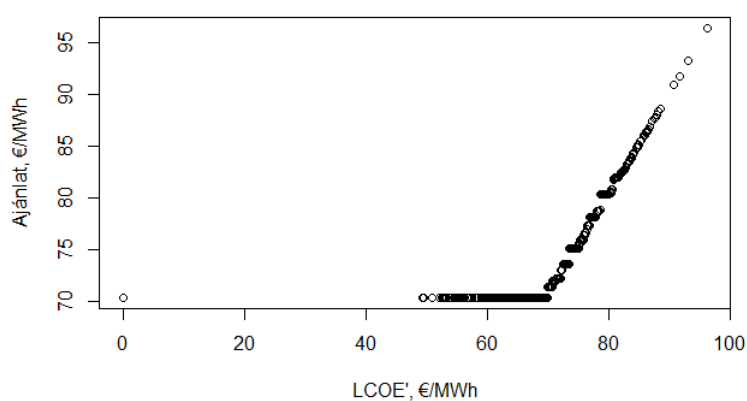
27. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_7 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



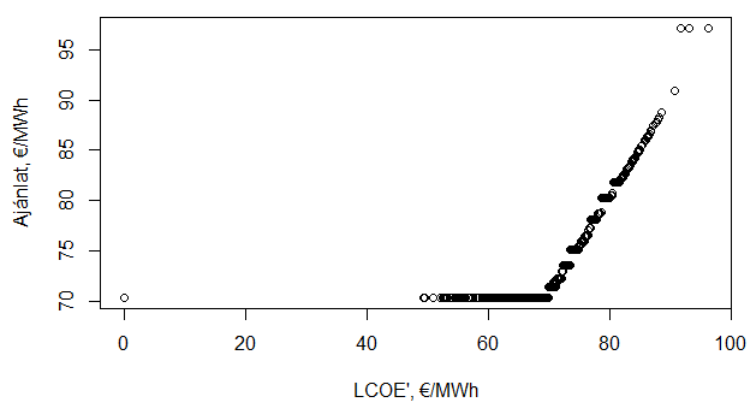
28. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_8 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



29. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_9 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra

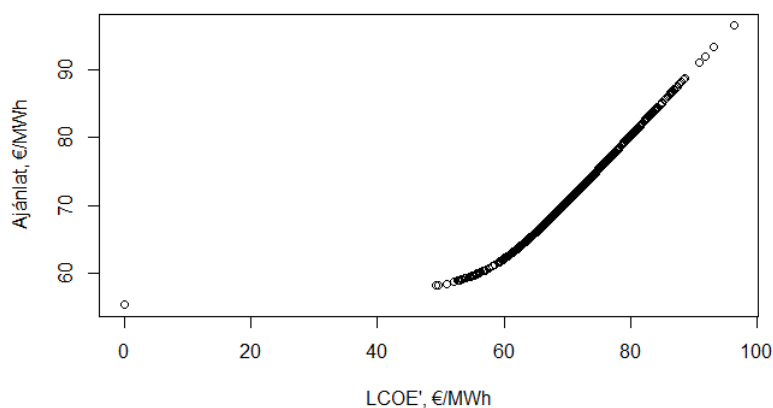


30. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_{10} ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra

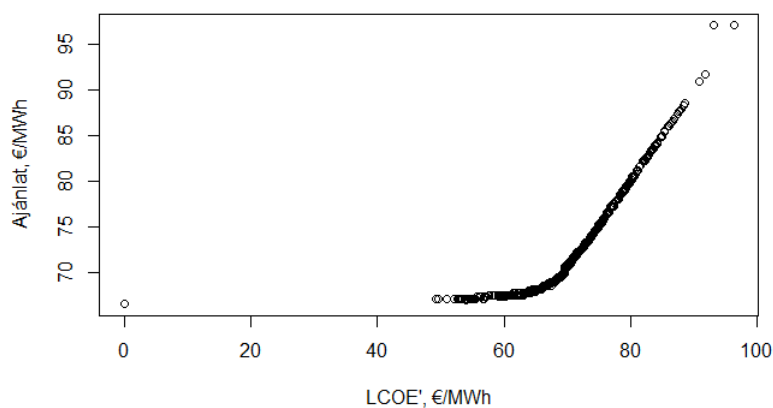


31. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_{11} ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra

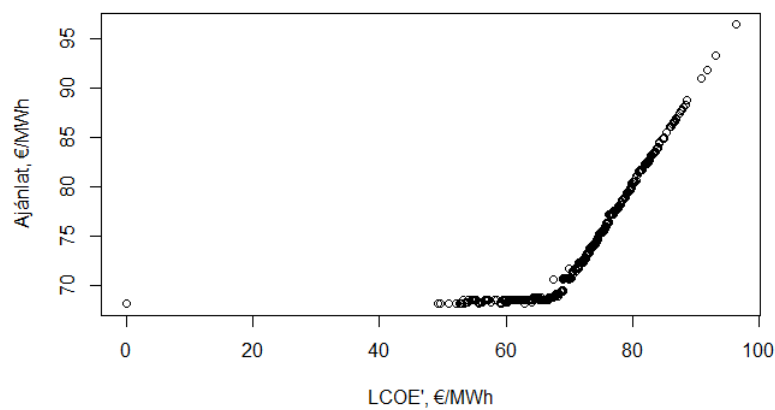
A normális eloszlásból induló, 1 000 adatpontot tartalmazó, döntetlent is figyelembe vevő eset



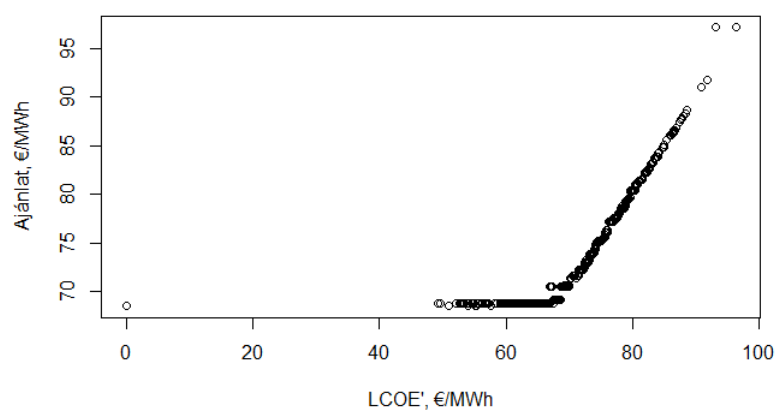
32. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_1 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



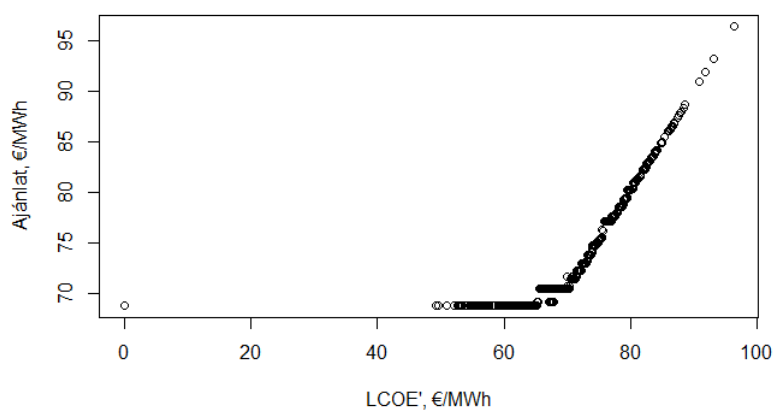
33. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_2 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



34. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_3 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



35. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_4 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra



36. ábra. Az ajánlati függvény alakja az F_5 ajánlati feltételezésre adott optimális ajánlatok esetén, forrás: saját ábra

Rövidítések jegyzéke

EU, 31	NTC, 55
PV, 21	OCGT, 55, 57
ARA, 56	OPEX, 42, 44, 45, 56, 64
ARIMA, 53	PV, 28, 41, 44, 46, 48–50, 61, 62
CAPEX, 42, 44, 45	REKK, 46, 56, 58, 149
CCGT, 55, 57	SEERMAP, 24, 58
CCS, 18, 57	TYNDP, 58
EEG, 28, 30, 58	WACC, 42–45, 47, 49, 51, 57, 58, 63,
EEMM, 46, 47, 52, 54–56, 58, 60–62,	64
104	
EGMM, 56	
EIA, 56	
ENTSO-E, 46, 55, 57, 58, 60	
ETS, 56	
EU PRIMES, 62	
EU, 20, 21, 23–27, 34–36, 55, 56, 58,	
71	
FIP, 21, 26	
FiT, 20–22, 26, 28, 35, 41, 48, 63	
GARCH, 54	
GCC, 72	
GDP, 25	
IEA, 44, 56	
IMF, 56	
LCOE', 64, 65, 91, 98, 103, 105	
LCOE, 12, 16, 39, 41–49, 54, 57, 63,	
104	
LCOE', 64	
MAVIR, 68, 69	
MEKH, 38, 39	
METÁR, 36	
NEKT, 23	
NFM, 36	

Utószó és köszönet

A DOLGOZAT ELKÉSZÍTÉSÉBEN rengeteg segítséget kaptam Magyarkuti Gyulától, melyet itt szeretnék megköszönni, nélküle nem készülhetett volna el ez a munka. Szintén köszönet illeti a REKK-es kollégáimat, akik egyrészt kérdéseikkel, meglátásaikkal segítettek, másrészt hozzájárultak az elmúlt évek folyamán szakmai tudásom gyarapításához. Külön kiemelném Paizs Lászlót, Selei Adrienn, Szabó Lászlót és Mezősi Andrást, akik nem csak az első eredményeket véleményezték, de tanácsot adtak a témaválasztáskor, a pontos kutatási kérdés meghatározásakor is.

Külön köszönettel tartozom Kiss Andrásnak és Virág Gábornak a kutatás korábbi fázisaiban nyújtott segítségükért, a velük folytatott diskurzus, az ötleteik, kérdéseik, tanácsaik akkor lendítettek tovább, amikor a legnagyobb szükségem volt rá.

A családom biztatása és támogatása is elengedhetetlen volt az elmúlt évek során, e nélkül nem jöhetett volna létre ez a dolgozat, köszönöm a türelmeteket.