

Pocsarovszky Károly

Villamosenergia-piaci szereplők csoportosulása a kiegyenlítési percepcióik mentén

KÖZGAZDASÁGI ÉS GAZDASÁGINFORMATIKAI DOKTORI ISKOLA

Témavezető: Dr. Kő Andrea

© Pocsarovszky Károly



KÖZGAZDASÁGI ÉS GAZDASÁGINFORMATIKAI DOKTORI ISKOLA

Pocsarovszky Károly

Villamosenergia-piaci szereplők csoportosulása a kiegyenlítési percepcióik mentén

Doktori értekezés

Témavezető: Dr. Kő Andrea

Budapest, 2026

Tartalomjegyzék

1	BEVEZETÉS	8
2	SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	11
3	A KUTATÁSI PROBLÉMA.....	18
4	A KUTATÁS CÉLJA, KUTATÁSI KÉRDÉSEK.....	21
5	A KUTATÁS MÓDSZEREI	24
5.1	EGYENSÚLYI MODELLEK	26
5.2	ÁGENS ALAPÚ SZIMULÁCIÓ	27
5.3	IMPLEMENTÁCIÓS MEGKÖZELÍTÉS.....	28
5.4	A MODELLFELTEVÉSEK MEGALAPOZÁSA ÉS KORLATAI.....	29
6	ELMÉLETI HÁTTÉR	31
6.1	VILLAMOSENERGIA-PIAC LEHETSÉGES LEÍRÁSA.....	35
6.2	MODELLEZÉS EMPIRIKUS MEGALAPOZÁSA.....	36
7	SZIMULÁCIÓ FORMÁLIS LEÍRÁSA	43
7.1	MODELL - NAIV FOGYASZTÓ	44
7.2	MODELL - TUDATOS FOGYASZTÓ.....	55
7.3	MODELL - PERCEPCIÓ ELTÉRÉS	61
7.4	MODELL - MÉRLEGKÖR	65
7.5	MODELL - TERMELÉSI KORLÁTOK.....	76
7.6	MODELL – KÖVETŐ TANULÁS	79
8	NUMERIKUS SZIMULÁCIÓ.....	84
8.1	FÜGGETLEN SZEREPLŐK	86
8.2	RQ1: PIACI SZEREPLŐK CSOPORTOSÍTÁSA.....	93
8.3	RQ2: TÁMOGATÁSOK HATÁSA	97
8.4	RQ3: CÉLFÜGGVÉNY RENDSZER VIZSGÁLATA	100
9	KONKLÚZIÓ.....	103
10	IRODALOMJEGYZÉK.....	108

Ábrajegyzék

2-1. ábra. Scopus találatok számossága „Energiaközösség” kulcsszóra.....	16
5-1. ábra. Kutatás felépítése.....	25
6-1. ábra HUPX DA piac keresleti és kínálati adatok, balra a teljes görbe, jobbra az egyensúly kissugarú környezete nagyítva látható.	37
6-2. ábra MAVIR rendszerterhelés adatok – tény és becsült adatok.....	40
6-2. ábra MAVIR LE és FEL szabályozási lehívások volumenei.	41
7-1. ábra. Fogyasztási és termelési függvény példák az ár-mennyiség térben.....	49
7-2. ábra. Kiegyenlítő termelő DA piacra szánt mennyisége adott DA ár mellett.	51
7-3. ábra Egyensúlyi ár tudatos fogyasztó esetén.	59
7-4. ábra. DA egyensúlyi ár változása menetrendezési percepció eltérése esetén.	63
7-5. ábra. Kereskedő válasza a bizonytalanság emelkedésére.	70
7-6. ábra. DA piaci egyensúly magas kiegyenlítő piaci árak esetén.	71
7-7. ábra. Választás az egyensúlyi megoldások közül.	72
7-8. ábra. DA piaci egyensúlyi mennyiség FEL és LE irányban.	72
7-9. ábra. DA piac egyensúlyi árai és mennyiségei FEL és LE irányú kiegyenlítésre. .	73
7-10. ábra. Kereskedő profit várakozásának hatása a DA egyensúlyi ár ollóra.....	74
7-11. ábra. Kereskedő percepciójának eltérése a kiegyenlítőpiactól.	74
7-12. ábra. Véletlen kezdeti egyensúlyi mennyiség és percepció.....	79
7-13. ábra. Konvergencia véletlen követési mátrixra.	81
8-1. ábra. Lineáris fogyasztási függvények melletti konvergencia.....	88
8-2. ábra. Konvergencia a fogyasztás-percepció szerint legközelebb eső szereplőhöz .	90
8-3. ábra. Konvergencia a fogyasztás-percepció szerinti legjobb szereplőhöz.....	92
8-4. ábra. Konvergencia időben sztochasztikus kiegyenlítő percepcióra	94
8-5. ábra. Sztochasztikus konvergencia válasz sztochasztikus percepcióra.	95
8-6. ábra. OPEX és CAPEX jellegű támogatás hatása az egyensúlyi kínálati árra.	98

Rövidítések jegyzéke

aFRR	automatic Frequency Restoration Reserve – automatikus kiegyenlítő tartalék
CAPEX	Capital Expenditure – Tőkeköltség / beruházási kiadás
DA	Day-Ahead – Másnapi kereskedelem
DAM	Day-Ahead Market – Másnapi piac
DSO	Distribution System Operator - Elosztóhálózat-üzemeltető, elosztói engedélyes
EK	Energiaközösség
EU	Európai Unió
FEL	Fel irányú kiegyenlítőpiaci szabályozás
HMKE	Háztartási Méretű Kiserőmű
HUPX	HUPX Magyar Szervezett Villamosenergia-piac Zrt. – Magyar Villamosenergia Tőzsde.
ID	Intraday - Napon belüli kereskedelem
IDM	Intraday Market – napon belüli piac
KÁT	Kötelező Átvételi Tarifa
KIF	Kisfeszültségű hálózat (230V/400V jellemzően – 1 kV alatt)
KKV	Kis- és Középvállalkozás
KÖF	Középfeszültségű hálózat (22 kV jellemzően - 1 kV felett, 35 kV alatt)
LE	Le irányú kiegyenlítőpiaci szabályozás
MAVIR	MAVIR Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító ZRt.
MEKH	Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal
METÁR	Megújuló Támogatási Rendszer
mFRR	manual Frequency Restoration Reserve - kézi aktiválású kiegyenlítő tartalék
NAF	Nagyfeszültségű hálózat (120, 220, 400 kV jellemzően – 35 kV felett)
OPEX	Operating Expenditure – Működési költség
RHD	Rendszerhasználati díj
TSO	Transmission System Operator - Átviteli rendszerirányító – Magyarországon a MAVIR tölti be ezt a szerepet.
VER	Villamosenergia-rendszer

1 Bevezetés

Egyes gazdasági mechanizmusok már önmagukban is olyannyira összetettek, hogy csak egyes részfolyamataik írhatók le részletesen. E leírások önmagukban is fontosak, ugyanakkor a részfolyamatok közötti kapcsolatok feltárása további kutatást igényel. Különösen igaz ez azokra a területekre, ahol a gazdasági döntések és a fizikai folyamatok szorosan összefonódnak.

Az európai villamosenergia-piac mint versenyzői szerkezet az energetika liberalizációjával jelent meg (Bolton, 2021) és az elmúlt közel 30 év során az aktív gyakorlatban, valamint a szabályozói oldalon is rendkívüli fejlődésen ment keresztül. Miközben alappilléreiben nem szakadt, és nem is szakadhatott el az alapvető fizikai jelenségeként manifesztálódó villamosenergia-szállítási és elosztási folyamatoktól, mégis, fizikai folyamatokra ültetett gazdasági és elszámolási eljárások néhány év leforgása alatt egy rendkívül összetett rendszert eredményeztek.

Miközben a kutatások számos területen zajlanak a villamosenergia-piac gazdasági vonatkozásában, maga az elektromosság fizikai tulajdonságai is hatással vannak az elosztási folyamatokra (lásd 6. fejezet). Ezen kettőség összefonódása kihívás elé állítja a modellezési gyakorlatokat. Hogyan egyszerűsíthető és vizsgálható egy olyan összetett konstrukció, amelynek minden eleme valamely szempontból ismert, ugyanakkor azok egymásra épülésében csak modellezési kompromisszumokkal szeparálható.

A modellalkotás során el kell különíteni a kívülről adottnak tekintett exogén tényezőket a modell összefüggései által meghatározott endogén változóktól. Ezzel kijelöljük a vizsgálat határait, de egyben egyszerűsítjük a valóságot is. Ezért külön figyelmet igényel, hogy az egyszerűsítés során ne maradjanak figyelmen kívül azok a kölcsönhatások, amelyek érdemben alakítják a vizsgált döntéseket és eredményeket.

Jelen kutatásban a másnapi és a kiegyenlítő piac összefüggéseit a szereplők döntései szemszögéből vizsgálom. Olyan modellkeretet alakítok ki, amelyben megkülönböztetem a menetrendi eltéréseket és az azokról alkotott szereplői vélekedéseket, vagyis a kiegyenlítési percepciókat. A formális leírást ágensalapú szimulációval összekapcsolva vizsgálom, hogy e percepciók és a pénzügyi ösztönzők hogyan alakítják a piaci döntéseket és az egyensúlyi árakat. Arra is keresem a választ, hogy a percepciók és az egyéni gazdasági érdekek mentén milyen feltételek mellett érdemes a szereplőknek

közösen fellépni. Az így kialakuló csoportokat az energiaközösségek lehetséges gazdasági alapjaként vizsgálom, közös célfüggvényüket pedig a mérlegkört szervező kereskedő célfüggvényével vetem össze.

A modell kialakításakor a szakirodalmi eredményekre és az iparágban szerzett több mint tizenöt éves tapasztalatomra támaszkodom. A gyakorlati tapasztalat elsősorban a vizsgálandó problémák azonosítását és a modell feltételezéseinek kialakítását segíti. A piaci működést a kutatási kérdések szempontjából lényeges összefüggésekre egyszerűsítom, amelyeket matematikailag formalizálok. Erre építve alakítom ki az ágensalapú szimuláció szoftveres megvalósítását. A szimulációval a modellben leírt döntések és kölcsönhatások következményeit vizsgálom különböző paraméterbeállítások mellett.

A jelen bevezetést követő második fejezetben a szakirodalom áttekintését végzem el, kiemelve azokat a törekvéseket, amelyek a villamosenergia-rendszer és az arra épülő energiaközösségek leírására irányultak.

A harmadik fejezetben a szakirodalmi áttekintésben azonosított kutatási hiányra építve fogalmazom meg a kutatási problémát, és bemutatom annak gazdasági jelentőségét.

A negyedik fejezet a kutatási kérdéseket, a kutatás fő célját és tudományos hozzájárulását fogalmazza meg, kitérve azok szükségességére is.

Az ötödik fejezetben ismertetem az alkalmazott kutatási módszereket, a felhasznált egyensúlyi modellek lényegi elemeit, az ágens-alapú modellek szimulációs megközelítését, valamint ezek ötvözését egységes keretben.

A hatodik fejezet a villamosenergia-piac sajátosságait mutatja be egészen a fizikai jelenségektől a piac szervezésen át a szabályozási specifikumokig. A szereplők azonosítása is itt történik meg, akik a későbbi modellezés során bevonásra kerülnek.

A hetedik fejezetben a kutatásom a modellek formális leírását követi, itt definiálom azokat az alapvető összefüggéseket, amelyek megfeleltethetők a villamosenergia-szektor alapfogalmainak, de már alkalmasak az egyes szereplők döntési kereteinek bemutatására.

A nyolcadik fejezet során fejtem ki a kutatási kérdésekre adott választ és itt jelenik meg részletesen a szimuláció eredményeit is tartalmazó leírás.

A kilencedik fejezet a kutatás eredményeit foglalja össze, valamint kitér a továbbfejlesztési lehetőségekre is.

2 Szakirodalmi áttekintés

A villamosenergia-piac liberalizációja az '90-es évek második felétől kezdődően Európa szerte átalakította az ellátást. Az Európai Bizottság 96/92/EC direktívája 1996-ban kimondta az európai villamosenergia-szektor versenyzői piaccá válásának kötelezettségét 2010. év végére. A korábbi környezetet elsősorban az infrastruktúra és a termelés belépési korlátai indukálták, természetes monopóliumként tekintett rá a gazdaság (Berg & Tschirhart, 1988). A liberalizáció során azonban a monopóliumot nem egyszerűen egy új piaci szerkezet váltotta fel, hanem egészen új rétegződés és ellátási láncolat jött létre. Ahhoz, hogy versenyző szereplők jelenhessenek meg, a továbbra is magas beruházási költséggel járó fizikai szállítás egyre inkább elvált az ellátás pénzügyi elszámolásától. Az egyes szereplők, fogyasztók és termelők külön-külön megállapodásokat képesek ezáltal kötni, a szállítás mégis egész Európában egységes közös infrastruktúrán történik. A fizikai harmonizáció, az egyes elszámolási piacok összekapcsolása, valamint a centralizált rugalmasság kezelése egy új összetett villamosenergia-rendszert hozott létre. A szabályozás által indukált, de a piaci mechanizmusok által vált korunk egyik legösszetettebb gazdasági szektorává a villamosenergia-ellátás.

A létrejött gazdasági folyamatok megértése több szempont szerint is a tudományos kutatások céljává vált:

- A villamosenergia-piacok nem önmagukban, hanem rétegzett, egymásra épülő rendszerben működnek. Egyazon szállítási időpontra hazánkban több különálló szabályozott piacon lehet villamosenergiát eladni és vásárolni, mindegyik piac más-más informáltsági szinttel és szabályrendszerrel rendelkezik.
- Egyszerre értékesíthető egy adott erőmű pozitív termelése egy fogyasztónak, és ugyanazon erőmű, ugyanazon vezetékre vett csökkentett termelése a villamosenergia-rendszer egésze felé ugyanarra a szállítási időpontra. Egy termelő ugyanarra az időpillanatra két különböző termelési volumennel rendelkezhet (a „termelés” és a „nem termelés” volumenével), mindkettő kereskedhető, miközben fizikailag csak az egyik valósulhat meg.
- A villamosenergia-piac működése számos más gazdasági folyamatra hatással van és függőségben áll azokkal, így az inputanyagokkal, a szállítmányozással, de a karbonkibocsátás-kereskedelmi kontraktusokkal is.

- A villamos energia egységes, harmonizált szállítási követelményeknek kell megfelelnie, azaz 1 kW villamos energia a hálózat minden pontján 1 kW villamos energiának felel meg. Ugyanakkor ennek ellenére strukturálisan több, mint 40 paraméterrel rendelkezik a termelés.
- A villamosenergia ma már nagyobb mennyiségben is tárolható, és noha ennek térnyerése még csak most érvényesül a liberalizált piacokon, jelentősége megkérdőjelezhetetlen.
- Villamosenergia-termelő már nemcsak egy fosszilis erőmű lehet, hanem megújuló termelőként akár egy lakossági fogyasztó is beléphet, ezzel a néhány kWh termeléstől a több 100 MWh-ig megjelenhet egy termelő a piacon.
- A hálózaton egy adott pont képes termelővé és fogyasztóvá is válni, villamosenergiát vételezni és visszatáplálni.
- Praktikusan minden fizikai pont a hálózatban egyszerre képes megjelenni közvetlenül, vagy közvetve minden szerepkörben: fogyasztóként, termelőként, kiegyenlítési kapacitásként.
- A villamosenergia-rendszer fizikai ellátása az elszámolás tényére invariáns, azaz a szereplők bárhogyan is számolnak el egymással, az nem érinti a fizikai réteget. Ezért olyan konstrukciók is életképesek, amelyeknél a termelés és fogyasztás más pontokon történik elszámolás tekintetében, mint fizikailag.

A fenti aspektusok csak néhány kiragadott érve és értelmező megvilágítása annak, amely miatt a villamosenergia-piacok és azok gazdasági vizsgálatai tudományos érdeklődésre is számot tartanak. A piac egészének pontos, átfogó leírása ma már szinte elképzelhetetlen vállalkozásnak tűnik, miközben mind egyre nagyobb igény mutatkozik arra, hogy értelmezhető legyen a teljes rendszer működése, az azon belüli hatásmechanizmusok, valamint ezek mentén következtetések legyenek levonhatók a beruházások, ösztönzők, ellátási nehézségek és új szabályozási konstrukciók tekintetében.

Az úgynevezett kezdeti villamosenergia-piaci modellek elsősorban a liberalizáció hatásait kívánták megragadni. A termelők viselkedését és céljait elemezték oligopol egyensúlyi megközelítésben (Kahn, 1998), ahogyan ezek a szereplők már nem egy koncesszió részeként jelentek meg centralizált monopóliumként. A Cournot-egyensúlyi modellek (Hobbs, 2001) széles körű analitikai leírását adták a szektor számos aspektusának, ugyanakkor a versenyzői piacok mélyebb elemzést igényeltek.

A szimulációs modellek térnyerése egészen korán tetten érhető. Az egyensúlyi modellekre a szakirodalom elsősorban hosszú távú megközelítésként tekintett (Ventosa et al., 2005), miközben a rövid távú gyors mechanizmusok leírását nem tudta megfelelően kezelni. A 2000-es évek elejei szimulációs megközelítések még továbbra is az egyensúlyi modellek alapjaira támaszkodtak, azonban az egyensúlykeresés már nem analitikus módon számított, hanem iteratív eljárással (Otero-Novas et al., 2000). Mindez nagyobb rugalmasságot eredményez a modell paramétereit mentén, ugyanakkor a szimuláció eredményei összevethetők a formális modellekkel (Day & Bunn, 2001).

Az eredmények során az igazi áttörést a számítási megközelítésben az úgynevezett ágensalapú modellek (Agent Based Model – ABM) és azok szimulációja (ABMS) jelentették. A modellosztály alkalmazásával dinamikai leképezések is tehetők, az egyensúlykeresés és ezáltal az árazás, illetve a piacra lépés memóriával rendelkező optimalizáló folyamatként is megragadható (Bower & Bunn, 2000). Az ágensként reprezentált termelők múltbeli döntéseik eredményéből képesek visszacsatolást tenni és tanulni, ezáltal a Nash-egyensúly keresésével párhuzamosan számos piaci mechanizmus tervezése és tesztelése is lehetővé vált.

Ugyanakkor a kezdeti ABMS megközelítések mellett versenyző módszerek is teret nyertek az energia-piaci kutatások során. Az egyensúly és az egyensúlyi termelői stratégia feltárása mellett jelentős szerepet képviselnek az árak alakulásának leírására vonatkozó modellek is. Az egyes megközelítések adott szeparált piacra, jellemzően a rövid távú másnapi kereskedelemre (DA) tekintettel rögzítenek összefüggésrendszereket idősor-elemzés alkalmazásával AR, ARIMA és MR módszerekkel. (Karakatsani & Bunn, 2008; Schmöller, 2005; Bowden & Payne, 2008). Az ilyen módon konstruált modellek fundamentumaikban már elhagyják a piac mögöttes optimalizáló folyamatainak megragadását, nem kívánják azokat mélységükben feltárni, azonban az eseménytér időben vett összefüggéseire fókuszálnak. A megközelítés részletes összefoglalóját adja Möst és Keles (2010).

A számítási kapacitások térnyerésével a villamosenergia gazdasági elosztási összefüggéseinek feltárására a korábban elenyésző mértékben alkalmazott dinamikus rendszer modellek (SD) is megjelentek. Botterud et al. (2002) a kezdeti lépéseket követően elsőként írták le az energiapiacok alakulását teljes mértékben SD-megközelítésben. A hosszú távú folyamatok megragadása mellett az SD-modellek

képesek a tanulási és beruházási döntések összefüggéseit is feltárni, mégis, a piacok rövid távú leképezésében a szerepük már csökken (Teufel et al., 2013).

A rövid távú, másnapi (DA) villamosenergia-piacok modellezésében a 2010-es évek végére az ABMS térnyerése egyértelműnek látszik. Az ABMS robusztus módszerként képes kezelni a fogyasztók egyidejű termelővé válását, a vételezés és visszatáplálás szimultán jelenlétét egyazon ellátási ponton (Hämäläinen et al., 2000; Kowalska-Pyzalska et al., 2014; Zhang & Nuttall, 2011). Hasonlóan az ABMS megfelelő választ ad a fizikai infrastruktúra hálózati aspektusainak figyelembevételére is, amelyek egyre nagyobb számban kaptak fókusz az egyes smartgrid megközelítések előremozdulásával (Snape et al., 2011; Chassin et al., 2014). A modellek bővíthetősége, rugalmassága kétségkívül. A fogyasztás változása (Zhou et al., 2011), az elosztott termelési modellek (Pinto et al., 2011) mellett a piacok összefonódása is teret kapott. Az ABMS térnyeréséről és képességeinek lehetőségeit a szektorban részletesen mutatják be Ringler et al. (2016). A villamosenergia-piac számos aspektusa valamely vertikumban a 2020-as évek elejére már megjelenik az ABM-szimulációk során: a megújuló termelés (szél- és napenergia-termelés), az aggregátorok, az elektromobilitás, a kereskedők szerepe mind-mind különböző modellváltozatokban érhetők nyomon. Optimalizálás tekintetében is széles skálán mozognak a megközelítések: lineáris programozási feladatként, egyensúlyi modellként leírt, játékelméletet alkalmazó, genetikusan algoritmust vagy valamely ML tanulási eljárást kiaknázó módszerek jelentek meg ABMS-re építve (Shinde & Amelin, 2019).

A piaci működés részleteinek leírásában tett törekvéseket Kell et al. (2022) foglalja össze a közelmúltban. 55 kiemelt kutatás egyedi megközelítését feltárva, a villamosenergia elosztási és gazdasági mechanizmusában a kiegyenlítetlenség és a DA piaci jelenléte egyidejűleg nem jelenik meg a források tartalmában. Az alkalmazott ABMS alapú ML és AI modellek rendkívüli összetettségben ragadják meg az egyes piacok működését, de az összetett aukciós és bilaterális rendszerek eredményei képezik a vizsgálatok elsődleges fókuszát.

A kiegyenlítő piac figyelembevétele ugyanakkor nem pusztán a modell teljesebbé tétele miatt szükséges. A kiegyenlítetlenséghez kapcsolódó költségek és kockázatok már a szállítást megelőzően is alakíthatják a szerződéses feltételeket, az árazást és a szereplők piaci preferenciáit. Befolyásolhatják, hogy a szereplők kivel, milyen mennyiségekre és

milyen költségviselés mellett kívánnak megállapodni. A kiegyenlítetlenség ezért nem kizárólag utólagos elszámolási kérdés, hanem az előzetes piaci döntések egyik meghatározó szempontja is lehet. E döntések azonban még nem a később megvalósuló eltérésekre, hanem az azokról alkotott várakozásokra épülnek. Éppen ezért a másnapi és a kiegyenlítő piac összefüggéseinek vizsgálatában a szereplők kiegyenlítési percepcióinak is szerepet kell kapniuk.

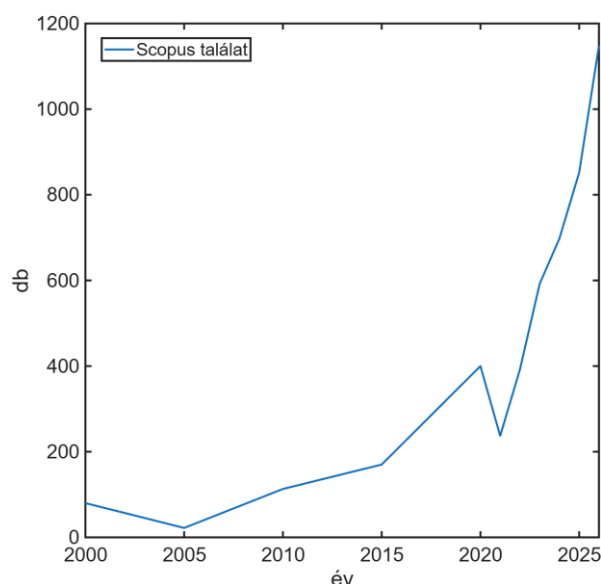
A DA és a kiegyenlítő piacok összekapcsolását Pineda és Morales (2016) a termelőkapacitások bővítésének vizsgálatában valósítja meg. Modelljük az előrejelzési hibák bizonytalanságát forgatókönyvekkel kezeli, és azt vizsgálja, hogy az ezekből eredő kiegyenlítési költségek hogyan befolyásolják a beruházási döntéseket.

Cuisinier et al. (2021) több mint 60 kutatás áttekintésével mutatják be a helyi energetikai rendszerek tervezésére alkalmazott optimalizálási megközelítéseket. A tárgyalt modellek között rögzített energiaigénnyel és árrugalmas kereslettel dolgozó megoldások egyaránt szerepelnek. Kiemelendő Graf (2025), aki szintén vizsgálta a szóban forgó piacok összefonódását, azonban nem modellezési keretben.

Az előrejelzési bizonytalanság vagy az árrugalmasság figyelembevétele ugyanakkor önmagában még nem jelenti az ugyanazon menetrendi eltérésről alkotott, szereplőnként különböző vélekedések modellezését. A jelen kutatásban ezt a megkülönböztetést helyezem előtérbe: a menetrendi eltérések mellett az azokról alkotott kiegyenlítési percepciókat is figyelembe veszem, és azt vizsgálom, hogy különbségeik miként alakítják a szállítást megelőző piaci döntéseket, valamint a kialakuló egyensúlyt.

A kiegyenlítetlenség mellett fontos megvizsgálni a szakirodalomban az energiaközösségek modellezésére és leírására tett törekvéseket is. Az energiaközösség fogalma mai értelemben az úgynevezett RED II.-től (Renewable Energy Directive) számított, azaz a 2018/2001 EU direktívától datált. A RED II. kimondja az energiaközösségek piaci jelenlétének szabályozási követelményeit minden tagállam vonatkozásában, valamint az energiaközösségek belső energia megosztási képességét az EU/2019/944 direktívában. Ugyanakkor az energiaközösségek piaci jelenlétének kutatására, annak újszerűségére tekintettel is, rendkívül kevés idő állt rendelkezésre. A meglévő villamosenergia-modellekbe nehezen illeszthető az energiaközösség fogalma, továbbá szabályozása sem teljesen letisztult (Bukovszki et al., 2020).

A Scopus adatbázisban végzett kutatásom alapján az energiaközösségek vonatkozásában az energiapiaci vizsgálatokkal összevetve kevés publikáció jelent meg, illetve ezek több mint fele 2023-at követően került publikálásra folyóiratokban vagy konferenciaközleményekben. „Energy communities”/ „Energy community” kulcsszóra keresve 4704 dokumentum érhető el időben az alábbi ábra szerinti eloszlásban.



2-1. ábra. Scopus találatok számossága „Energiaközösség” kulcsszóra.
Forrás: saját illusztráció

A kurrens szimulációs megközelítéssel szűkítve a Scopus-kutatást (keresés: 2026.02.11) az „Energy community” + „Simulation” kulcsó együttes mindössze 247 publikációt ad eredményül, míg az „Energy community” + „Equilibrium model” mindössze 14 releváns találatot mutat. Az eredmények közül kiemelkedik jelen kutatás tekintetében Cajna et al. (2025), amelyben a kiegyenlítő piacok nem játszanak ugyan szerepet, de a DA árak és az energiaközösségek megjelenésének hatása modellezett sztochasztikus keretben.

A szakirodalom részletes vizsgálata során azt találtam, hogy az energiaközösségek belső működési összefüggései kapnak elsősorban fókuszot (Mello et al., 2023; Belmar et al., 2023; Peeren et al., 2025). Ugyanakkor az együttműködés gazdasági feltételei is megjelennek a szakirodalomban. Abada et al. (2020) a közösségi hasznok megosztásának és az együttműködés stabilitásának feltételeit vizsgálja kooperatív játékelméleti keretben, míg Petrichenko et al. (2022) a közösségi és az egyéni prosumer működés jövedelmezőségét hasonlítja össze. Ezek a megközelítések előzményt adnak annak vizsgálatához, hogy a szereplőknek milyen feltételek mellett érdemesen közösen fellépni.

Az áttekintett szakirodalomban nem azonosítottam olyan megközelítést, amely az energiaközösségek csoportképzését a menetrendi eltérésekről alkotott, szereplőnként különböző kiegyenlítési percepciók és az egyéni gazdasági érdekek együttes figyelembevételére alapozná.

Összességében az energiaközösségek működésének és gazdasági eredményeinek vizsgálata mellett külön kérdés, hogy mely szereplőknek, milyen érdekeik mentén érdemes csoportba szerveződniük. A közös fellépés előnyössége ugyanis a működési szabályok mellett a csoport összetételétől és a tagok piaci döntéseitől is függhet. A jelen kutatás ezért a kiegyenlítési percepciókat nemcsak az egyéni döntések magyarázatában, hanem a csoportképzés lehetséges alapjaként is vizsgálja. Arra keres választ, hogy e percepciók és az egyéni érdekek mentén milyen feltételek mellett alakulhatnak ki az önálló piaci fellépéshez képest gazdasági előnyt biztosító csoportok. Ehhez kapcsolódik annak vizsgálata is, hogy a tagok egyéni céljaiból levezetett közös célfüggvény optimalizálási szempontból egyenértékű-e a mérlegkört szervező kereskedő célfüggvényével.

3 A kutatási probléma

Az európai villamosenergia-piac kiemelkedően fejlődött az elmúlt években. A liberalizáció mentén a megújuló energia térnyerése és a kapcsolódó következmények, valamint a digitalizáció fejlődése számos aspektusból alakította a szereplők viselkedését, felkészültségét és piaci megjelenését. A szabályozó és az intézményi háttér néhány esetben utólag, adaptív módon, más esetben pedig éppen előre menően reagált bizonyos jelenségekre. A megújuló fotovoltaikus termelés például mára jelentősen formálta a csúcsidőszaki termelési piacot, negatív kínálati árakat eredményezve, amelyek feloldása a termelés szabályozásának és a tárolási kapacitás bővítésének irányába hat. Ugyanakkor az energiaközösségek definiálása és célkitűzései mind a mai napig összetett viták célkeresztjében áll annak relevanciája és piaci létjogosultsága miatt.

Az energiaközösség fogalmát és tartalmát a 2019/944/EU irányelv emelte be a szabályozói környezetbe. Az irányelv célja a helyi, lokális megújuló erőforrásokra alapuló termelési és felhasználási közösségek létrehozásának támogatása. Az energiaközösségek lehetséges előnyei jól körülhatároltak: a megújuló termelés ösztönzése mellett a közösségek saját menterendjük, lokális rugalmasságuk menedzselését végzik, így tehermentesíthetik a rendszerirányító és a mérlegkörök feladatait, ezáltal a teljes hálózatra nehezedő költségeket csökkenthetik.

A hazai szabályozásban a „2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról” (továbbiakban VET) **66/B. § (1)** szerint az energiaközösségek:

„Az energiaközösség egyesület, szövetkezet vagy nonprofit gazdasági társaság formában működő jogalany, amelynek elsődleges célja nem a pénzügyi haszonszerzés, hanem az, hogy a tagjai számára, vagy az energiaközösség létesítő okiratában megjelölt működési területen környezeti, gazdasági és szociális közösségi előnyöket biztosítson azáltal, hogy az energiaközösség vagy annak tagjai villamosenergia-termelés, -tárolás, -fogyasztás, elosztói rugalmassági szolgáltatás nyújtása, villamosenergia-megosztás, aggregálás, energiahatékonysági szolgáltatás nyújtása, a közúti közlekedésről szóló törvény szerinti elektromobilitás szolgáltatás nyújtása és elektromos töltőberendezés üzemeltetése tevékenységek közül legalább az egyiket végzi.”

A jogalkotó az energiaközösségek lehetséges előnyeit az energiafüggetlenségben, a költségek csökkentésében, különböző környezeti hatások csökkentésében, valamint a versenyképesség előremozgatásában értékeli.

Ugyanakkor az ellenérvek is már korán szemmel láthatóak voltak: a megújuló beruházások létrejötte önmagában még nem mutatja meg, hogy azokhoz milyen gazdasági többletet ad a közösségi szerveződés. Hasonlóan a villamosenergia lokalitása értelmezési nehézségekbe ütközik (lásd 6. fejezet), valamint az energiaközösségek szabályozási képességének és menetrendezésének éppen ellene hat az úgynevezett portfólióhatás, amely révén a szereplők nagyobb hányadát tömörítő csoportok sokkal hatékonyabb menetrendezőnek bizonyulnak a független valószínűségi eloszlásoknak köszönhetően, mint a kisebb közösségek.

Az energiaközösségek megragadása tehát kérdőjelekkel övezett, miközben a jogalkotó egyre több jogosultsággal tünteti ki a konstrukciót, pénzügyi ösztönzők jelennek meg, és támogatási programok indulnak a létrehozásuk megkönnyítésére. Az energiaközösségek a gyakorlatban olyan keretté válnak, amelynek tagjai megújuló beruházásokat kezdeményeznek, de ezen beruházások pénzügyi hasznait osztják el, nem pedig a termelési potenciáljukat.

Mindezek alapján az energiaközösségek kérdése nem zárható le a szabályozási keretek megteremtésével. Attól, hogy a szereplők közös fellépése jogilag lehetséges, még nem következik, hogy az számukra gazdaságilag is előnyös. Ehhez azt szükséges megérteni, hogy mely szereplőknek, milyen érdekeik mentén érdemes csoportba szerveződniük. A kérdés tehát nem pusztán az, hogyan működjön egy már létrehozott energiaközösség, hanem az is, hogy milyen gazdasági összefüggések indokolhatják a közösség kialakulását.

A csoportképzés egyik lehetséges szempontja a menetrendi eltérések értékelése. A szereplők a tényleges szállítást megelőzően döntenek a fogyasztásukról és termelésükről, de a vállalt mennyiségektől később eltérhetnek. Ennek irányáról és mértékéről előzetesen csak várakozásuk lehet, amelyet a kutatásban kiegyenlítési percepciónak nevezek. Ezen percepciók már a kereskedelmi megállapodások megkötésekor alakíthatják a szereplők döntéseit, és ezeken keresztül a piaci árakat is. Éppen ezért felmerül a kérdés, hogy a percepciók mentén nemcsak az egyéni döntések érthetők-e meg, hanem olyan csoportok is kialakíthatók-e, amelyek tagjainak érdemes közösen fellépniük a piacon.

A kiegyenlítési percepciók azért adhatnak alapot a csoportképzéshez, mert az eltérések várható költségei révén befolyásolhatják, hogy a szereplők az önálló vagy a közös piaci fellépést tartják előnyösebbnek. Az együttműködésről ugyanis a tényleges eltérések megvalósulása előtt, az azokról alkotott vélekedéseik figyelembevételével döntenek.

Ugyanakkor a csoportosulás gazdasági előnyei az ösztönzőktől és a közös fellépés módjától is függhetnek. Egy támogatás megváltoztathatja a fogyasztási döntéseket, de ezen keresztül az egyensúlyi árakat is, így a hatása nem ítélni meg kizárólag a nyújtott kedvezmény alapján. Hasonlóan, a kereskedő által szervezett mérlegkör és a tagok saját érdekei mentén kialakuló csoport sem feltétlenül ugyanazt a döntési problémát oldja meg. A közös piaci megjelenés hasonlósága önmagában még nem jelenti a célfüggvények egyenértékűségét.

Éppen ezért a kutatásban a szereplők döntései alapján közelítem meg a csoportosulás kérdését. Azt szükséges feltárni, hogy a kiegyenlítési percepciók és az egyéni érdekek mentén levezethető-e olyan együttműködés, amely gazdasági alapot adhat az energiaközösségek létrejöttéhez. Ennek vizsgálatához a percepciókat, az ösztönzőket és a célfüggvényeket az általuk alakított piaci egyensúlyokkal együtt kell kezelni.

A vizsgálathoz a villamosenergia-piac kutatási kérdések szempontjából lényeges összefüggéseit formálisan írom le. Az erre épülő szimulációs környezetben különböző paraméteregyüttesek mellett vizsgálom a szereplők döntéseit, valamint a csoportosulás gazdasági következményeit.

4 A kutatás célja, kutatási kérdések

A kutatás célja annak feltárása, hogy a villamosenergia-piaci szereplők saját magukra vonatkoztatott kiegyenlítési percepciói hogyan alakítják a szállítást megelőző piaci döntéseiket, és e percepciók mentén milyen feltételek mellett alakulhatnak ki közös piaci fellépésre alkalmas csoportok.

A villamosenergia-piacon a szállítandó mennyiségekre vonatkozó kereskedelmi megállapodások a tényleges szállítást megelőzően jönnek létre. A megvalósuló fogyasztás és termelés azonban eltérhet az előzetesen vállalt mennyiségektől: a szereplők a tervezettnél többet vagy kevesebbet fogyaszthatnak, illetve termelhetnek. A kutatásban kiegyenlítési percepciónak nevezem a szereplőknek az ilyen, a saját menetrendi eltérésének várható irányáról és mértékéről alkotott vélekedését. Ez nem feltétlenül egyezik meg sem a később megvalósuló eltéréssel, sem a többi szereplő ugyanarra az eltérésre vonatkozó várakozásával.

A vizsgálat során arra keresem a választ, hogy az eltérő percepciók miként jelennek meg a szereplők keresleti és kínálati döntéseiben, és ezeken keresztül hogyan alakítják a piaci egyensúlyt. Ezt követően azt vizsgálom, hogy a szereplők percepcióinak egymáshoz igazodása létrehozhat-e csoportosulásokat, valamint hogy a csoportok közös piaci fellépése milyen feltételek mellett járhat gazdasági előnnyel a tagok számára. Az így kialakuló együttműködéseket az energiaközösségek lehetséges gazdasági alapjaként értelmezem, anélkül, hogy előzetesen feltételezném azok előnyösségét vagy azonosságát a jogszabályban meghatározott energiaközösségekkel.

A kutatás létjogosultsága többért:

- Az aggregátorokon keresztüli piaci részvétel a kisebb fogyasztók és termelők számára is lehetőséget teremthet az esetleges szabályozási képességük gazdaságos hasznosítására. Ebben fontos szerepet kap a várható fogyasztás és termelés, valamint az ezekkel szemben bekövetkező eltérések felmérése.
- A kiegyenlítő piac hatásait közvetetten érzékelő szereplők döntéseit is befolyásolhatják a kiegyenlítési költségek és kockázatok, amelyek a kereskedői árképzésen keresztül jelenhetnek meg számukra.
- Az energiaközösségek működését lehetővé tevő szabályozási keretek mellett gazdasági szempontból is lényeges kérdés, hogy mely szereplőknek és milyen

feltételek mellett érdemes közösen fellépniük a piacon. A kutatásban ezt a kérdést a szereplők kiegyenlítési percepciói és egyéni érdekei szempontjából értékelem.

Tudományos szempontból a kutatás újdonságtartalma két, egymáshoz kapcsolódó megközelítésben ragadható meg.

(i) A szereplők saját kiegyenlítési percepcióinak döntési és árképzési szerepének formalizálása. A másnapi és a kiegyenlítő piac összefüggéseit olyan modellkeretben vizsgálom, amelyben megkülönböztetem a szereplők menetrendi eltérésekre vonatkozó várakozásait. A hozzájárulás középpontjában annak feltárása áll, hogy e percepciók különbségei miként alakítják a szállítást megelőző keresleti és kínálati döntéseket, valamint az ezekből kialakuló piaci egyensúlyt. E keretben vizsgálom azt is, hogy a pénzügyi ösztönzők döntési és árhatásai hogyan függenek a kiegyenlítési percepcióktól.

(ii) A szereplők saját kiegyenlítési percepcióikra épülő csoportképzésének és a csoport célfüggvényének vizsgálata. A szereplők csoportosítását nem előzetesen rögzített struktúraként kezelem, hanem azt vizsgálom, hogy percepcióik és azok egymáshoz igazodása alapján milyen, a tagok számára gazdaságilag előnyös csoportosulások alakíthatók ki. A közös fellépés célfüggvényét a tagok egyéni céljaiból vezetem le, majd összevetem a mérlegkört szervező kereskedő célfüggvényével. Ezen keresztül értékelem, hogy a csoport célfüggvénye optimalizálási szempontból egyenértékű-e a mérlegkört szervező kereskedő célfüggvényével.

A kutatás során a vizsgált villamosenergia-piaci összefüggéseket formálisan írom le, majd ezekre építve szimulációs szoftverkörnyezetet alakítok ki. Ebben kapcsolom össze az egyensúlyi modelleket az ágensalapú szimulációval. Ezen keresztül vizsgálom a percepciók piaci hatásait, a csoportképzés gazdasági következményeit, valamint a csoport és a kereskedő célfüggvényének egyezését vagy eltérését.

Kutatási kérdések:

RQ1: Kialakíthatók-e a piaci szereplők kiegyenlítési percepciói alapján a résztvevők számára gazdaságilag előnyös csoportok?

Azt vizsgálom, hogy a szereplők saját kiegyenlítési percepciói és azok egymáshoz való igazodása alapján milyen csoportosulások alakíthatók ki, és hogy ezek közös piaci fellépése milyen feltételek mellett eredményez gazdasági előnyt a tagok számára egyenként az önálló fellépéshez képest.

RQ2: A pénzügyi ösztönzők hogyan befolyásolják a piaci döntéseket és az egyensúlyi árakat különböző kiegyenlítési percepciók mellett?

Azt vizsgálom, hogy a modellben alkalmazott pénzügyi ösztönzők hatása miként függ a szereplők kiegyenlítési percepcióitól. Arra keresem a választ, hogy az ösztönzők által módosított keresleti döntések hogyan épülnek be a piaci árképzésbe, és milyen feltételek mellett eredményeznek kedvezőbb vagy kedvezőtlenebb beszerzési árakat a fogyasztók számára.

RQ3: Megegyezik-e a kiegyenlítési percepciók alapján kialakuló szereplőcsoport célfüggvénye a mérlegkört szervező kereskedő célfüggvényével?

Az energiaközösségekkel szemben megfogalmazott kritika (Felsmann, 2023), hogy működésük érdemben nem különbözik a mérlegkörök működésétől, ugyanakkor a kisebb csoportméret miatt gyengíthetik a mérlegkörök kockázatsökkentő portfólióhatását. Éppen ezért a csoport tagjainak egyéni céljaiból és közös piaci fellépéséből levezetett célfüggvényt a mérlegkört szervező kereskedő célfüggvényével vetem össze. Azt vizsgálom, hogy azonos piaci feltételek mellett a két célfüggvény azonos optimalizálási problémát ír-e le. Az egyezés vagy eltérés alapján értékelem, hogy a kialakuló csoportosulás célrendszere megfeleltethető-e a mérlegkört szervező kereskedő célrendszerének.

5 A kutatás módszerei

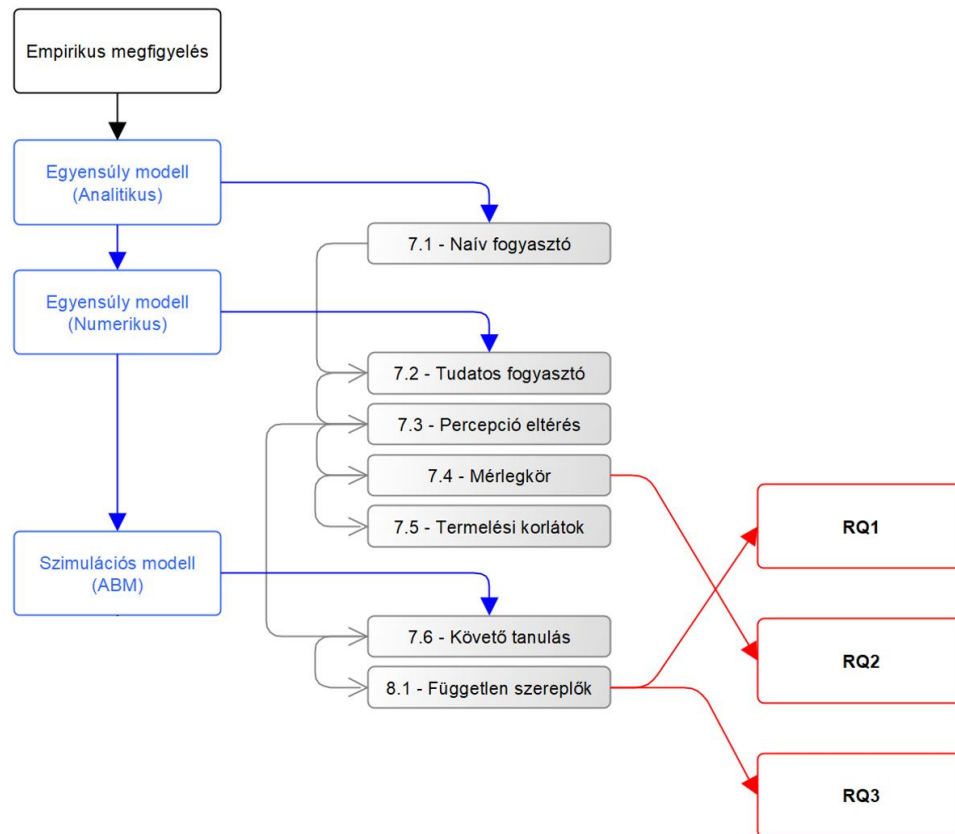
A kutatási kérdések megválaszolásához a szereplők egyéni döntéseit és az ezekből kialakuló piaci egyensúlyt közös modellkeretben vizsgálom. A másnapi és a kiegyenlítő piac összefüggéseinek formális leírásában megkülönböztetem a menetrendi eltéréseket és az azokról alkotott percepciókat. Az egyensúlyi modelleket ágensalapú szimulációval kapcsolom össze, hogy a percepciók és a pénzügyi ösztönzők piaci hatásai mellett a szereplők csoportosulását és közös fellépésének gazdasági következményeit is vizsgálhassam. E keretben összevetem a tagok egyéni céljaiból levezetett csoportcélfüggvényt a mérlegkört szervező kereskedő célfüggvényével.

Ahhoz, hogy érdemi válaszok legyenek adhatók, kutatásomban a jól definiált villamosenergia-piac egyszerűsített szabályrendszere alapján formalizálom az egyensúly kialakulásának folyamatát. A szabályrendszer egyes elemeinek kiragadása, valamint az egyszerűsítés önkényesnek tűnhet, azonban iteratív módon egyre több elem kerül a formalizált modellrendszer alakító tényezői közé abban a sorrendben, amely egy egyensúlyelméleti megközelítésben ideális logikai indukciót tesz lehetővé.

A következtetések egy épülő, lépésenként egyre összetettebb modellcsalád részeként kerülnek leírásra, ahol a modell feltételek végig formalizáltak, a megoldásokat azonban az analitikus megközelítéstől a numerikus optimalizáción át az ágens-alapú szimulációs módszer révén számítom ki egyedileg alkotott szoftveres környezetben.

A modellfeltevések kialakítását a piaci szabályok, a szakirodalom és a rendelkezésre álló empirikus adatok alapján indokolom. Kifejezett célom, hogy az alkalmazott módszerek az elemzés szolgálatában álljanak. Az analitikus levezetéseket addig alkalmazom, amíg azok segítik az összefüggések feltárását; az összetettebb modellváltozatokat numerikus eljárásokkal és ágensalapú szimulációval vizsgálom. A következtetéseket minden esetben az adott modell feltételei és az alkalmazott vizsgálati módszer korlátai figyelembevételével értelmezem.

A kutatás során az egyes modellek egymásra épülésének és a következtetések levonásának útját a következő ábra szemlélteti, amely az alkalmazott módszereket és elemzési megközelítéseket is tartalmazza.



5-1. ábra. Kutatás felépítése.
 Modellek, alkalmazott módszerek és kutatási kérdések egymásra épülése.
 Forrás: saját illusztráció

A piaci szereplők döntési kereteit a vonatkozó jogszabályok, piaci szabályzatok és a szakirodalom alapján határozom meg, a modellfeltevések indokolásához pedig empirikus adatokat is felhasználok. A közgazdasági alapmodelleket azokkal a sajátosságokkal egészítem ki, amelyek a menetrendi eltérések és a kiegyenlítési percepciók döntési hatásainak vizsgálatához szükségesek.

A modellváltozatok bővítésével az egyensúlyi feltételek analitikus megoldása egyre összetettebbé válik. A numerikus eljárások lehetővé teszik az egyensúlyi megoldások és azok paraméterfüggésének vizsgálatát akkor is, amikor az analitikus alak már nehezen értelmezhető. Ezért a „1. Naív fogyasztói modell”-től továbblépve a 2. modelltől kezdve numerikus optimalizálási megoldást vezetek be, az egyensúlykeresés gradiens módszerrel és approximációval GLOBAL megközelítéssel (Pál , 2010) történik.

A 6. modelltől az egyensúlyi megközelítést ágensalapú szimulációval egészítem ki. A szereplők percepcióinak egymáshoz igazodását követési szabályokkal írom le (Conway, 1970; Macal & North, 2009), míg az ezek mellett kialakuló árakat és mennyiségeket

továbbra is az egyensúlyi modell határozza meg. Így a szereplők közötti kölcsönhatások és azok piaci következményei együttesen vizsgálhatók.

A kutatási kérdésekre adott válaszok elsősorban az ágens-alapú szimuláció eredményeire építenek, de speciális kiegészítéseket tartalmaznak a kereskedőt is tartalmazó 4. mérlegköri modell alapján, valamint kitérek az 5. termelési korlátok modell eredményeire is.

5.1 Egyensúlyi modellek

A kutatásban az egyensúlyi modellek alkalmazásának sajátossága, hogy a menetrendi eltérések mellett az azokról alkotott, szereplőnként különböző percepciókat is beépítem a döntési összefüggésekbe. A kiegyenlítetlenség így nem pusztán utólag elszámolandó mennyiségként jelenik meg: a várható eltérés megítélése már a szállítást megelőző keresleti és kínálati döntéseket is befolyásolja. A modellváltozatokban elkülönítem, hogy a fogyasztó, a kiegyenlítő termelő és a kereskedő milyen információval rendelkezik az eltérésről, és azt hogyan veszik figyelembe. A kutatás egyik újdonsága ezen eltérő percepciók döntési és árképzési szerepének formalizálása.

Az egyensúlyi megközelítés révén az egyéni döntések következményeit a piac egészével együtt vizsgálom. Ez lehetővé teszi annak feltárását, hogy a percepciók vagy a pénzügyi ösztönzők változása hogyan módosítja az egyensúlyi árakat és mennyiségeket. Egyúttal alapot ad a későbbi csoportképzési vizsgálatokhoz, amelyekben a percepciók egymáshoz igazodásának és a közös fellépés gazdasági következményeit értékelem.

Az egyensúlyi modellek széles családja áll rendelkezésre a gazdasági elemzésekhez. Ezek elsősorban a kereslet és kínálat összevetésén keresztül képesek leírni a piaci árak és egyensúlyi mennyiségek alakulását. Az egyensúly fogalom (Gintis, 2007; Amir & Grilo, 1999; Qiu, 1997), az információs struktúra (Csekő, 1999), valamint a célfüggvények (Csekő, 2016) jelentősen változnak az egyes megközelítésekben.

A villamosenergia-piaci leírások annyiban egyediek, hogy elsősorban a DA piacot ragadják meg (aukciós, vagy egyensúlyelméleti megközelítésben), és a kiegyenlítő piac leírására jelentősen kevesebb publikált modell található (Wu et al., 2020; Klaeboe et al., 2022).

Hasonlóan az egyensúly megközelítésében a különböző torzított versenypiaci, elsősorban oligopolisztikus szerkezetek láthatóak a villamosenergia-piaci leírásokban (Cournot és Bertrand egyensúly), ahol a termelők egymással versengő módon lépnek a piacra. A céltól ettől eltérő azonban: megmutatni, hogy a kiegyenlítő piac nemcsak egy kiegészítő eleme a vizsgálatoknak, hanem lényegi alakítója is a DA/ID kereskedelemnek.

Az egyensúlyelmélet alkalmazása kulcsfontosságú a vizsgálatomnak, hiszen a teljes piacot alakító mechanizmusok megragadása, megértése és olyan leírásának megragadása, amely mentén értékelhetők az új típusú szereplők megjelenése, vagy éppen a szereplők egymáshoz viszonyított döntéseinek hatása.

Az egyensúlyi modellek legnagyobb hiányossága ugyanakkor a széleskörű feltételrendszer, amelyek a valóságban nem, vagy nehezen garantálhatók. Éppen ezért a levont következtetések alkalmazása rendkívüli tudatosság és körültekintés mellett tehető csak meg.

Az oligopolisztikus versenyt középpontba állító modellektől eltérően a kutatás kiindulópontjaként a tökéletesen versenyző piac egyensúlyelméleti megközelítését veszem alapul. A hangsúlyt így a szereplők stratégiai versengése helyett a menetrendi eltérések és az azokról alkotott percepciók döntési hatásaira helyezem. Erre építve alakítok ki egy saját, többpiacos modellrendszert, amely a másnapi piaci döntéseket a kiegyenlítés várható mennyiségeivel és költségeivel kapcsolja össze. A modellváltozatok fokozatos bővítésével vizsgálom, hogyan módosítja az egyensúlyt a szereplők eltérő informáltsága, a kereskedő közvetítő szerepe, valamint a percepciók egymáshoz való igazodása.

5.2 Ágens alapú szimuláció

Az ágens-alapú modellezés és szimuláció (ABMS) a modellezési megközelítések széles skáláját magában foglalja. A szoftveres támogatású rendszerek egyik első megjelenése (Conway, 1970) is már tartalmazta az ágens-alapú modellezés kulcselemeit kezdetleges formában (Wooldridge, 2009):

- *Ágens*: egyedi entitás, amely oszthatatlan, térbeli és időbeli megjelenése van, valamint adott tulajdonság halmazzal rendelkezik
- *Tér*: az ágenseket magába foglaló tér

- *Idő*: az idősíki, amely a lehet diszkrét vagy folytonos és amely mentén az ágensek tulajdonságai változnak
- *Szabály rendszer*: az ágensek közötti interakciókat leíró szabályrendszer, elmozdulásukat, tulajdonságaik változását időben leíró rendszer

Az ágens alapú modellezés és szimuláció esetében a szimuláció a szoftveres kiértékelést jelenti, amelyben iteratív módon, időben vagy térben adott felosztási finomság mellett történik a szabályrendszer okozta változások kiértékelése az ágensek működésében (Tessier, 2006). A megközelítés kiválóan alkalmas elsősorban diszkrét rendszerek kezelésére, ahol mind az ágensek, mind a tér, mind az idő diszkrét. Folytonos időben vett eseményekre a diszkrét eseményszimuláció alkalmasabb megközelítés lehet (Babulak & Wang, 2010), hiszen ott csak az esemény tér diszkrét, maga az idő folytonosan telik. Amennyiben folytonos a tér, úgy a dinamikus rendszerek szimulációja a relevánsabb módszer (Randers, 1997). Hasonlóan, amennyiben a tér diszkrét pontjainak relevanciája van, és a felosztás finomsága nem approximációs közelítés, hanem a struktúrából fakadó topológiai tér, úgy a sejt-szimulációk alkalmazása indokolt (kiürítési szimulációk, forgalmi szimulációk, biológiai szimulációk).

A gazdasági elemzésekben elsősorban az ágens-alapú modellek érhetők nyomon, hiszen a szabályrendszer jól formalizálható az ágensek célfüggvényei alapján. A jelen kutatási megközelítésben diszkrét időben alkalmazom az ABMS-t. Az ABMS alkalmazása során a célfüggvények kiértékelése az egyensúlyi modellek eredményéből derivált, azaz az ágensek csak adott paramétereikben döntenek, és ezen keresztül már egy centralizált egyensúlyi modell számítja ki a piacra vitt/fogyasztott mennyiségi egységeket. Ez a hibrid megközelítés teszi lehetővé, hogy a szűkös számítási kapacitások mellett is széles körű, de pontos gazdasági folyamatok mentén lehessen modellezést végezni.

5.3 Implementációs megközelítés

A modell implementáció során a MATLAB szoftver megoldást alkalmazom. Az elsősorban akadémiai környezetben használt és dinamikai szimulációkra is tökéletes program rendkívül széles skálán képes problémák megoldására JAVA háttér-folyamatok támogatásával. A környezetre annak összetettsége, performanciája és könnyű kezelhetősége miatt esett a választásom:

- Mátrix műveleteknél és lineáris algebrai műveletek esetén az elterjedt Python környezeteknél natívan gyorsabb futást eredményez.
- A MATLAB számos csomaggal és kódolt eljárással rendelkezik, amelyek kifejezetten segítik a numerikus optimalizálási és szimulációs problémák kezelését, a valószínűségi tér leképezéseit, valamint komfortos megjelenítési lehetőségeket és kódolási konvenciókat alkalmaz.
- A MATLAB kódok jellemzően célorientáltak, rövidebb kódolást tesznek lehetővé, ezáltal a vizsgálatok könnyebben kerülnek a fókuszba, mint például egy Python környezet esetén. A MATLAB koherens, integrált rendszer, szemben a számos egymáshoz illesztett Python-csomag környezettel.

A kutatásomban az ágens-alapú szimulációt, az egyensúlyi modellek célfüggvényeinek numerikus közelítéseit, valamint a kiértékelések megjelenítését mind MATLAB környezetben végzem. A MATLAB-ot keretrendszerként, programozási környezetként alkalmazom, az egyensúlykeresés numerikus eljárásai saját fejlesztésem eredményei, ahogyan az ágens-alapú szimuláció teljes kidolgozása és kódolása is saját fejlesztésem eredménye.

5.4 A modellfeltevések megalapozása és korlátai

A gazdaságmodellek felépítése során az egyik kritikus elemzői tényező a valósággal való kapcsolat megtartása. A mögöttes szabályrendszer pontos ismerete önmagában nem garantálja, hogy minden leírás során helyes és robosztus rendszerek építhetők. Még a fizikai jelenségek illesztése során is azt tapasztaljuk, hogy extrém körülmények között eltérhet a valóság a korábban megfogalmazott, addig erősnek hitt fizikai törvényektől. Éppen ezért helyesebb modellezési megközelítés, hogy a részletszabályok bevezetése során mindig tesztelésre kerülnek a bevezetett fogalmak, és az empiria és az elmélet folyamatosan összevetésre kerülnek.

Így járok el a kutatás során is. Minden egyes modell, minden szereplőjével a piaci lehetőségeivel, döntési rendszerével, érdekeivel és információival összevetésre kerül az egyes jogszabályi és árazási döntései nyomán érhető információkkal, piaci tapasztalatokkal.

Mindez nem garantálja a modellek valósággal összevetett leírási képességének teljes körűségét, de következtetési lehetőségeiket nagyfokúan emeli, illetve lehetővé teszi a közelebbi gyakorlati alkalmazhatóságot.

A modellalkotás és a feltevések ellenőrzésének közös alapját a 6. fejezetben bemutatott villamosenergia-piaci működés adja. Az ott ismertetett fizikai sajátosságokból, kereskedelmi és elszámolási szabályokból bontom ki a modellek szereplőit, döntési kereteit és a piacok közötti összefüggéseket. A modellváltozatok feltevéseit ugyanezzel a piaci leírással vetem össze: azt vizsgálom, hogy az alkalmazott egyszerűsítések mellett megmaradnak-e a kutatási kérdések szempontjából lényeges kapcsolatok. A 6. fejezet így nem pusztán háttérként szolgál, hanem a formális modellrendszer felépítésének és piaci értelmezésének viszonyítási alapja is.

6 Elméleti háttér

A villamosenergia-piac formális leírásához mindenképp fontos magának a villamos energiának, majd a villamosenergia-piac folyamatainak és szabályozásának feltárása és működési alapjainak rögzítése.

A villamos energia alapvető fizikai jelenség, mai ismereteink szerint (Csanád, 2025) hullámként terjed a vezető/vezeték felületén, koncentrálna, közel fénysebességgel. A „dominószerű” fizikai jelenség számos intuícióval szembemegy, amelyek az elektromosságot folyadékszerű tulajdonságokkal ruházzák fel. Az elektromosság sokkal inkább állapotszerű jelenség (már önmagában a terjedési sebessége miatt is), mintsem anyagi természetű. Éppen ezért már az elektromosság lokalitásának definiálása is fizikai szinten értelmezési akadályba ütközik. Az összekapcsolt európai villamosenergia-hálózat hatására a valóságban nem állapítható meg, hogy az energia honnan származik. Nem mutatható rá egy elektronra, hogy azt melyik erőműben termelték, mert nem az elektronok „folynak” a vezetékekben, hanem az energia potenciál „utazik” fénysebességgel. Egyenáram (DC), egyenfeszültség esetén pontosan ez történik jelen ismereteink szerint. A váltakozó áram (AC), vagy váltakozó feszültség is hasonlóan fénysebességgel halad, annak ellenére is, hogy 50Hz, azaz másodpercenként 50-szer vált irányt a feszültség szinuszos dinamikával. Adott feszültségállapot fénysebességgel éri el a hálózat minden pontját, és ha a termelő ezen 50-szer változtat egy másodperc alatt, akkor ez pontosan 50-szer fog érvényesülni minden pontban. Vagyis a feszültség frekvenciája nem hat a terjedési sebességre.

Ugyanakkor, ha minden fénysebességgel történik, és a hálózat egyetlen pontján sem értelmezhető a termelési forrás kimutatása, azaz, hogy kitől származik a megtermelt energia, akkor hogyan lehetséges egyáltalán az elszámolás a szereplők között?

A villamosenergia fizikai szállítása és elszámolása elválak egymástól. Előbbi egy valóban fizikai folyamat, utóbbi pedig egy gazdasági mechanizmus. A gazdasági mechanizmus és a fizikai folyamatok a hálózat egésze szempontjából csak a szereplők aggregátumai mentén kapcsolódnak össze.

Példa. Adott egy villamosenergia-hálózat, amelyben 3 termelő és 3 fogyasztó található. Ekkor legyen a termelők fizikai mért betáplálása a hálózatba rendre:

$$\mathbf{T} = [10\text{kWh}, 15\text{kWh}, 30\text{kWh}]$$

A fogyasztók fizikai mért vételezése a hálózathoz legyen rendre:

$$\mathbf{F} = [15\text{kWh}, 20\text{kWh}, 20\text{kWh}]$$

A gazdasági elszámolás során az 1. fogyasztó az 1. és 2. termelőtől vásárolt, a 2. fogyasztó a 2. és 3. termelőtől vásárolt, a 3. fogyasztó pedig csak a 3. termelőtől vásárolt. Ekkor a fogyasztók és termelők kapcsolata az alábbi mátrixszal írható le, ahol a sorok a fogyasztók, az oszlopok a termelők:

$$\mathbf{ELSZ} = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 0 \\ 0 & 2/3 & 1/3 \\ 0 & 0 & 2/3 \end{bmatrix}$$

*Az **ELSZ** elszámolási mátrix megmutatja, hogy melyik fogyasztó, melyik termelővel áll elszámolási kapcsolatban, és tőle a termelésének mekkora részét vásárolja meg. Ekkor*

$$\mathbf{F}' = \mathbf{ELSZ} \cdot \mathbf{T}'$$

*azaz a fogyasztók fogyasztása az elszámolási mátrix elemei mentén a termelésből kaphatók meg, valamint **ELSZ**-ben az elszámolás oszloponként vett összege 1 minden termelőre.*

*Ugyanakkor az **ELSZ** mátrix nem determinált, azaz nem teljesen meghatározott **F** és **T** vektorok függvényében. Az alábbi $\overline{\mathbf{ELSZ}}$ ugyanúgy teljesíti a fenti feltételeket:*

$$\overline{\mathbf{ELSZ}} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/3 & 1/6 \\ 0 & 2/3 & 1/3 \\ 1/2 & 0 & 3/6 \end{bmatrix}$$

A fizikai szállítás és elszámolás tehát csak aggregátumok szintjén kell, hogy megegyezzen, a bilaterális kereskedelmi megállapodásokra a fizikai szállítás a fenti korlátok mellett invariáns. Eltekintek most attól az esettől amikor a fogyasztók és termelők más KIF vezetéken helyezkednek el, ott a további fizikai korlátokkal kell számolni, de azok relevanciája kisebb, mint elsőre gondolnánk. Lásd 7.5 modell.

Csupán annyi állítható tehát fizikailag, hogy a hálózatba „kerülő”, indukált, vagy elosztási szempontból betáplált villamos energia mekkora, valamint mekkora a hálózathoz „kikerülő”, elfogyasztott, vagy elosztási szempontból vételezett villamos energia. E kettő egyensúlya a hálózat szempontjából kritikus. Amint egy zárt hálózatban a vételezett és betáplált villamosenergia nem egyezik meg, a termodinamika törvényei mentén

(Dhawan, 2025) a többlettermelés hővé alakul, vagy váltakozó áram (AC) esetén a teljes hálózati frekvencia növekszik. Ennek megfordítása is igaz, amikor a termelés alacsonyabb, mint a vételezés, akkor a hálózati frekvencia csökken. Mindkét eset kritikus a villamosenergia-ellátás szempontjából.

A villamosenergia-piac egyik kiemelt feladata, hogy a hálózati egyensúlyt, a vételezést és visszatáplálást minden időpillanatban egyensúlyban tartsa. Éppen ezért a kereskedelmi, gazdasági megállapodások nem a szállítás időpillanatában születnek meg, hanem azt megelőzően rétegzett módon készülnek fel rá. A hazai szabályozás szerint az alábbi lényeges piacokkal és mechanizmusokkal szembesülnek a szereplők (MAVIR Kereskedelmi Szabályzat, 2026; HUPX Szabályzat, 2025):

- **Forward piac (FW):** heti, havi, negyedéves és éves zsinór valamint csúcsidőszaki termékek piaca, amelyben egy példa termék: *2026.10.01 00:00 és 2026.12.31 24:00 között 1MW villamosenergia-fogyasztása/termelése.*
- **DA piac, vagy DAM:** másnapi órás (2025. októbertől negyedórás) piac, például: *holnapi nap 12:00 és 13:00 között 0,5MW villamosenergia-fogyasztása/termelése.*
- **ID piac, vagy IDM:** napon belüli negyedórás piac, például: *mai nap 16:00 és 16:15 között 0,1MW villamosenergia-fogyasztása/termelése.*
- **Határkeresztező kapacitás piac (JAO):** éves, havi és napi bontásban az országhatárokon átvéelő kereskedelmi megállapodások fizikai allokációja.

A kereskedelmi megállapodások rétegződése az idő előrehaladásával, adott szállítási naphoz közeledve, egyre pontosabb prognózist tesz lehetővé és a szereplőket tereli abban a tekintetben, hogy a kereskedelem és a fizikai szállítás aggregátuma közel kerüljön egymáshoz, így az egyensúly könnyen fenntartható legyen.

Ugyanakkor a kereskedelem és a bilaterális megállapodások rétegződésével sem garantálható a teljes piac-tisztulás: a vételezés és a visszatáplálás tökéletes egyezősége. A szereplők gyakran rosszul mérik fel saját termelésüket/fogyasztásukat akár még rövid távon 1-1 negyedórára előre is. Egy szél erőmű esetében kihívást jelent akár a következő negyedóra előrejelzése is. A fogyasztás esetén sem minden piaci szereplő tudatos: a lakossági fogyasztók nem jelentik be előre az indítani kívánt elektromos eszközöket. Az egyensúly tehát a kereskedelmi piacokon végig fennáll, de a fizikai szállítás mégis eltérhet ettől.

Éppen ezért egy centralizált szereplő, a rendszerirányító (TSO, Magyarországon a MAVIR) szervezi a kiegyenlítő piacot, pontosabban piacokat, hogy a rendkívüli eltérésekre is felkészüljön a hálózat (MAVIR Kereskedelmi Szabályzat, 2026):

- Amennyiben a vételezés meghaladja a visszatáplálás mértékét, úgy **FEL irányú** szabályozási piacról beszélünk: bizonyos termelőket be kell vonni a termelésbe rendkívül gyorsan.
- Amennyiben a vételezés elmarad a visszatáplálás mértékétől, úgy **LE irányú** szabályozásról beszélünk: adott termelőket utasítani szükséges, hogy fogják vissza termelésüket.

Hogy pontosan kiket szükséges, illetve lehet utasítani, azt a kapacitás-piacok/kapacitás-aukciók határozzák meg. Különböző időintervallumokon (15 perces, 5 perces, 5 percen) belüli utasítások mentén automatikus (aFRR), vagy manuális (mFRR) utasításkövetési vállalás tehető. Az összességében kiegyenlítő kapacitás aukcióknak nevezett piacon elsősorban termelők jelennek meg, akik képesek visszafogni (LE), vagy fokozni (FEL) a termelésüket. A rendszerirányító ideje korán az „utasíthatóság” kapacitásait köti le éves, havi, illetve napi aukciók segítségével. A tényleges beavatkozás egy összetett szabályrendszer szerint az aukciókon adott díjak és a szabályozási képesség, az úgynevezett gradiens mentén kerül lehívásra. Mindezek mentén a villamosenergia-rendszer végül fizikailag is egyensúlyba kerül.

Összességében tehát négy meghatározó szinten rétegzett a villamosenergia-piaci elszámolás és szállítás ugyanazon időpont vonatkozásában:

- **Előzetes piac:** a fogyasztás (vételezés) és a termelés (visszatáplálás) szereplői egymással szabályozott piacokon kereskednek, valamint bilaterális megállapodásokat köthetnek a jövőbeni villamosenergia-fogyasztási és termelési mennyiségekre vonatkozóan.
- **Kiegyenlítő piac:** a szabályozható termelők felajánlják kapacitásaikat a rendszerirányítónak, amely révén a rendszer egyensúlytalansága esetén segítenek helyreállítani az egyensúlyt.
- **Fizikai szállítás** adott időpontra: a vételezés és visszatáplálás megtörténik, a rendszer egyensúlyát a rendszerirányító a kiegyenlítő piaci szereplők segítségével korrigálja.
- Kiegyenlítő költségek **utólagos elszámolása**.

A fenti folyamat gördülékenységének biztosítására az alábbi szereplők jelennek meg a villamosenergia-piacon:

- TSO: rendszerirányító, akinek elsődleges feladata a teljes villamosenergia-rendszer egyensúlyban tartása, és az egyensúly tartásához kapcsolódó kapacitások szervezése, lekötése és menedzselése
- DSO: elosztó, amelynek feladata a fizikai infrastruktúra fenntartása, üzemeltetése, abban a csatlakozási pontok, úgynevezett POD-ok létrehozása, a kis (KIF) és közép (KÖF) vezetékek karbantartása, fejlesztése.
- Fogyasztó: elsősorban vételező fogyasztó
- Termelő: elsősorban visszatápláló termelő
- Kiegyenlítő termelő: szabályozási kapacitással rendelkező termelő
- Kereskedő: piaci műveleteket elvégző szereplő, aki a saját úgynevezett mérlegkörében minimalizálja a várható kiegyenlítetlenséget.

A hazai villamosenergia-piacon két fontos szereplő jelent meg az utóbbi évek során: ezek egyike az aggregátor, amely képes a fogyasztók és kisebb termelők kiaknázatlan szabályozási képességeit aggregáltan a kiegyenlítő piacra vinni. Kutatásomban az aggregátoroktól eltekintek, mert szabályozási képesség szempontjából kiegyenlítő termelőként viselkednek.

Hasonlóan új fogalmat jelent a villamosenergia-szektorban az energiaközösségek megjelenése, amelyek definiálását szándékosan nem teszem meg, hiszen bár jogszabályi szinten rögzített a működési feltételrendszerük, mégis jelen kutatásnak éppen tárgya az, hogy az energiaközösségek a fenti piaci működés és szereplői együttes természetes új csoportosulása, vagy kizárólag mesterséges fogalmi keret.

6.1 Villamosenergia-piac lehetséges leírása

Egy szektor alapvető működése, szabályainak egymásra épülése és összetettségének feltárása nemcsak a szereplőinek döntéseit, de a döntések eredményeit is segít megérteni, illetve prognosztizálni. Körültekintően szükséges ugyanakkor eljárni, mert a modellezés, mindig szükségképpen redukcióval, tömörítéssel is jár, hiszen egy modell nem tartalmazhatja a valóság minden elemét. Az, hogy mely elemek kerülnek kiválasztásra, illetve figyelmen kívül hagyásra vagy egyszerűsítésre, a modellező döntése. Jelen

kutatásban az energiaközösségek csoportképződése és kialakulása áll a középpontban, ugyanakkor az alapvető villamosenergia-piaci folyamatok nem egyszerűsíthetők teljesen le.

Több megközelítés során látható, hogy egy-egy szegmens, vagy döntési tér kerül csak modellezésre, illetve az árak alakulása is kifejezetten az előzetes DA/ID piacokat érinti, vagy csak a kiegyenlítő piac stratégiáit tömöríti. A specializált modellekkel szemben a célom, hogy általánosan a DA/ID-piacok és a kiegyenlítő piac is szerepet kapjanak az elemzésben, és azok egymásra hatását vizsgáljam.

A szereplők közül az alábbiak képzik a vizsgálat tárgyát:

- *Fogyasztók*: természetesen fontos pillérjei a villamosenergia-szektornak. Céljuk az adott árak mellett a fogyasztási hasznosság maximalizálása. Esetükben klasszikus Marshall-féle közgazdaságtani megközelítést alkalmazom.
- *Termelők*: tökéletes versenyző piaci szereplők, amelyek az oligopolisztikus piacoktól eltérő vizsgálati teret eredményeznek, azonban ma Magyarországon a szabadpiaci termelés valóban közelebb áll a szereplők számát tekintve a tökéletes verseny piac követelményeihez, mint a néhány nagyobb termelőt tömörítő oligopolisztikus döntési tér.
- *Kiegyenlítő termelők*: a modellezésnél figyelembe veszem a szabályozási képességgel rendelkező szereplőket, akik mind FEL, mind LE irányban képesek termelésüktől eltérni és részt venni a kiegyenlítő szabályozásban.
- *Kereskedő*: a modellek során a kereskedő célfüggvénye a profit minimum elérése, vagyis adott profitelvárásnál magasabb margin elérése. A megközelítés jelentősége inkább optimalizációs, nem befolyásolja a kereskedő döntési terét.

Az elosztó és a rendszerirányító a piaci működések szempontjából rövid távon passzív szereplők, így a kutatás során a megjelenésüket mellőzöm.

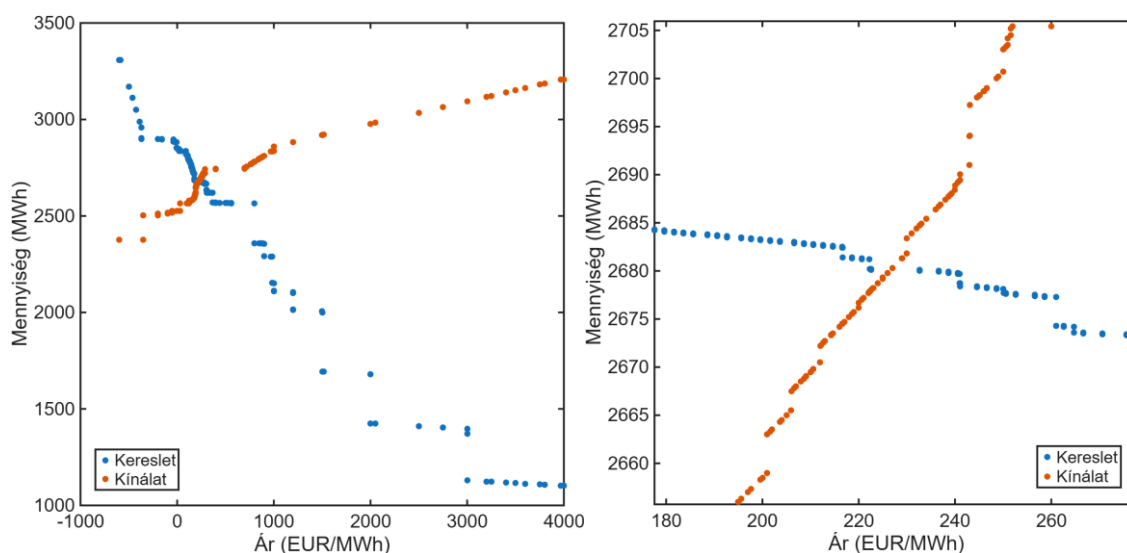
6.2 Modellezés empirikus megalapozása

A villamosenergia-piac leírása nem végezhető el a valós piac vizsgálata nélkül. A következőkben a kutatás számára releváns aspektusok szerint mutatom be a villamosenergia-piac működését, annak valósadat-alapú lenyomatának vizsgálatával.

Három kiemelt szegmenset szükséges feltárni:

- Másnapi villamosenergia-piac (DA piac), amely a HUPX Labs nevű publikációs platform szolgáltatásán keresztül érhető el (hasonlóan itt érhető el a villamosenergiapiaci ID és gázpiaci adatok is, de ezek most nem relevánsak a kutatásban)
- Kiegyenlítő piac (a MAVIR adatszolgáltatásán keresztül érhető el a szükséges kiegyenlítő energiamennyiségének és az elszámoló árak idősoros adatként).
- Energiaközösségek (MEKH adatszolgáltatás, NEÜ adatok)

A DA piac működését tekintve aukciós mechanizmus alapján működő nagykereskedelmi spotpiac. Minden megjelenő szereplő a másnap adott órájára (2025. októberétől adott negyedórájára) vonatkozóan keresett/kínált ár-mennyiség kombinációt határoz meg. Például A szereplő másnap 12:00 és 13:00 között 1MWh villamosenergiát kínál 100 EUR/MWh áron. Hasonlóan egy másik B szereplő 12:00 és 13:00 között 2MWh villamosenergiát keres (szeretne fogyasztani) 80 EUR/MWh áron. A HUPX az így összegyűjtött ajánlatok alapján sorrendezéssel a másnapi nap minden órájára egyensúlyi árat kalkulál. Ezen az egyensúlyi áron az ajánlati könyv minden szereplője értékesíthet, akinek az egyensúlyi árnál magasabb volt a keresleti vagy alacsonyabb a kínálti ára. Egy példa óra keresleti és kínálati könyve látható az alábbi ábrán:



6-1. ábra HUPX DA piac keresleti és kínálati adatok, balra a teljes görbe, jobbra az egyensúlyi kissugarú környezete nagyítva látható.

Ajánlati könyv adatai 2026.03.10, 0:00-0:15

Forrás: HUPX Labs adatok alapján saját megjelenítés

A keresleti és kínálati görbék rendre monoton, egyensúlykeresési szempontból lépcsős, matematikai értelemben pedig szakadásokkal rendelkező függvények. Mindez magából az egyensúlyképzési mechanizmusból következik: a HUPX a beérkező ajánlatokat sorrendezi: a magas keresleti árhoz tartozó mennyiségek kerülnek előre, hasonlóan, az alacsony kínálati árhoz tartozó mennyiségek élveznek elsőbbséget. Ezért a HUPX DA piacon a kereslet- és kínálati görbék mindig rendre monoton csökkennek és nőnek.

A görbék folytonossága nem garantálható, amelynek elsődleges oka a befogadható ajánlatok szabályozása: 0,1 MWh a minimális kereskedhető mennyiség és 0,01 MWh a minimális lépcső, valamint 0,01 EUR a minimális árlépcső. Ugyanakkor az ajánlati könyv 2025-ben átlagosan minden negyedórára 762 ajánlatot tartalmaz, amelyeknél megállapítható: **az egyensúlyi ár lokális környezetében az adatpontok egyszerű folytonos függvényalakokkal - lineáris, kvadratikusan – jól közelíthetők** (lineáris esetben medián $r^2 = 0.31$; kvadratikusan esetben medián $r^2 = 0.43$).

Fontos ugyanakkor látni, hogy a keresleti és kínálati görbék tartalmazhatnak olyan anomáliákat, amelyeket a modellezés során nem kezelünk. A KÁT piac például még magasabb piaci ár esetén is a kínálati görbe elején található, hiszen kötelező átvételről van szó, így a kínálati görbe eleje nem viselkedik a standard mikroökonómiában megszokott módon. Hasonlóan, a keresleti görbe tartalmazhat végtelenül rugalmas szakaszokat, mert a HUPX ajánlati könyv is tartalmazhat ár nélküli keresletet – amikor valamely szereplő ártól függetlenül keres adott mennyiséget. Kiemelendő, hogy az egyensúlyi ár sok fizikai termékkel szemben a villamosenergia-piacon gyakran negatív (ez a DA és ID piacra is jellemző). Ekkor a szerepkörök az adott szempont szerint megcserélődnek: a kereslet pénzt kap a fogyasztásért, a kínálat pedig fizet.

Mindezek a speciális esetek egy kibővített piaci leírásban tudhatnak helyet kapni, jelen vizsgálat szempontjából eltekintek tőle.

A kiegyenlítő piac hasonlóan fontos vizsgálandó szegmense jelen kutatásnak. A DA piacra bár spot, azaz azonnal piacként hivatkoztunk, de valójában a villamosenergia-piaci terminológiában a spot jelző itt csak a határidős termékek piacától való elválasztásra szolgál. A határidős termékek nem a másnapi, hanem a jövő heti termékektől egészen az éven túli termékekig terjednek (akár Y+8, azaz a 8 év múlva esedékes termelési és fogyasztási volumenekre vonatkozó kontraktusok is köthetők szabályozott piaci keretek

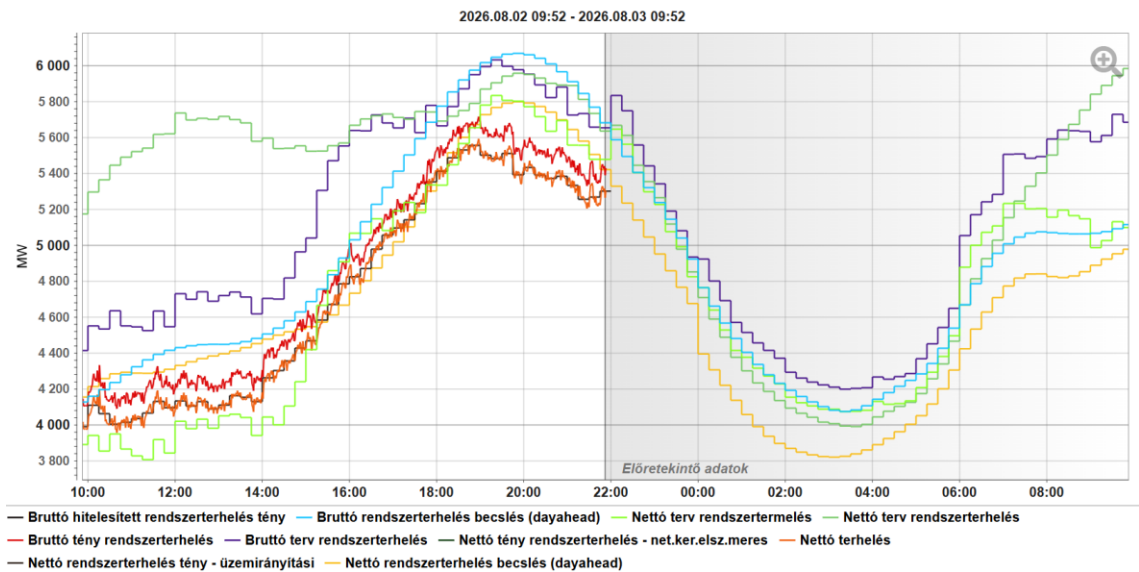
között). Ugyanakkor a hétköznapi értelemben vett azonnali terméket éppen a kiegyenlítő villamosenergia-piac testesíti meg: a MAVIR kapacitásaukción ideje korán leköti a kiegyenlítő kapacitásokat a piac szereplőinél, és szükség esetén használja ezeket a kapacitásokat.

A piaci szereplők képességük függvényében különböző mértékű szabályozásra képesek: néhány erőmű 1, 5, 15 percen belül képes menetrendjétől külső utasításra eltérni: 100 MW helyett a MAVIR kérésére 5 perc múlva FEL irányban 120 MW teljesítménnyel termelni, vagy adott esetben LE irányban például 80 MW teljesítménnyel termelni. Ugyanakkor a szabályozás nemcsak a termelők számára, hanem a fogyasztók részére is nyitott. Ha valamely fogyasztó képes a menetrendjétől eltérni utasításra, ugyanúgy része lehet a kiegyenlítő piacnak.

Az utasítás lehet automatikus (aFRR), vagy manuális (mFRR). aFRR szabályozás esetén a szabályozást digitális jelre kell megkezdeni (hazánkban egyre inkább ez a jellemző szabályozási forma).

A kapacitás aukciók a DA piachoz hasonlóan szervezett aukciós piacok. Minden résztvevő szereplő felajánlja a kapacitásainak egy részét a kiegyenlítő tartalékok piacán, de ezáltal döntést hoz arról is, hogy kapacitásának többi részét pedig fenntartja a DA és ID piacokon történő értékesítésre. **Ezek mentén egyazon szereplő egyszerre megjelenhet mindkét meghatározó piacon**, így pedig kapacitásainak értékesítése az egyes piactereken egy gazdasági döntés. Kutatásomban éppen ezt a gazdasági döntést írom le egy modell rendszeren keresztül a 7. fejezetben.

A kiegyenlítő piac jelentősége legjobban a rendszerterhelésen érhető nyomon. Az alábbi ábrán a MAVIR által publikált terhelési görbe látható, ahogyan a VER (villamosenergia-rendszer) összes fogyasztott/termelt villamosenergia-volumene a kinyilvánított információkhoz képest eltér.



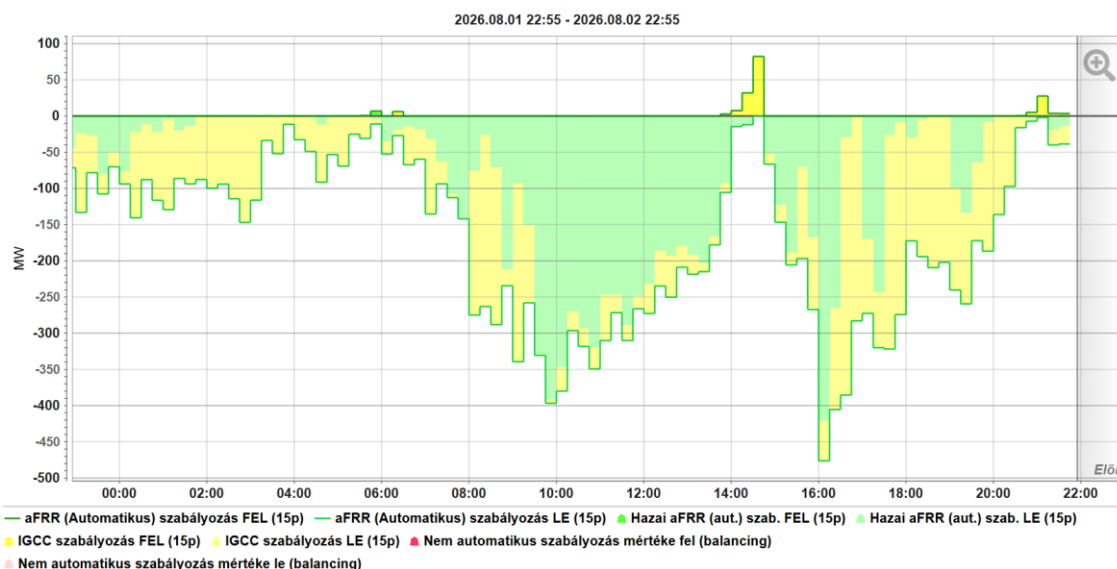
6-2. ábra MAVIR rendszerterhelés adatok – tény és becsült adatok.

Letöltve: 2026.08.02, 21:52

Forrás: MAVIR VER adatok

A beavatkozást a MAVIR a kiegyenlítő piacon keresztül lekötött kapacitás révén végzi el, és utasítja az egyes szereplőket az eltérésre, hogy a VER egyensúlyát képes legyen fenntartani. A szabályozás eredménye a LE és FEL irányú szabályozási kényszer, és ehhez kapcsolódó elszámoló ár, amely érvényesíti a MAVIR által fizetett kapacitás- és energiadíj együttesét.

Kutatásomban a kiegyenlítőpiaci ár exogén változóként ragadom meg, mert a kiegyenlítő kapacitás aukció és energiadíj együttes endogén alakulása és modellezése jelentősen túlnyúlik jelen kutatás keretein. Ugyanakkor a piac szereplői döntéseik során valójában nem árazási, hanem kapacitásfelajánlási döntést hoznak: termelésük/fogyasztásuk mely részét hajlandók szabályozási piacra vinni. Ezek mentén az egyszerűsítés megtehető, mert a vizsgálat során a döntés maga megjelenik csak volumen oldalról.



6-3. ábra MAVIR LE és FEL szabályozási lehívások volumenei.

Letöltve: 2026.08.02, 21:52

Forrás: MAVIR VER adatok

Energiaközösségek vonatkozásában is fontos megvizsgálni, hogy mi történik a valóságban, és Magyarországon hány energiaközösség milyen minőségben működik.

Működés tekintetében aktív egy nyilvántartásba vett energiaközösség, ha tagjai egymás között rendszeres energiamegosztást végeznek (beöltik a VET adta jogkört), de ennek elmaradása esetén is legalább közös beruházást hajtanak végre, amelynek hasznait heti/havi elszámolás keretében elosztják, és ezen elosztásról az energiaközösség vezetője elszámolást ad a tagoknak.

A működés szüneteltethető hivatalosan vagy passzívan is, utóbbi esetben a bejegyzést követően nem végez aktív tevékenységet az energiaközösség.

Az energiaközösségek nyilvántartása, engedélyezése és nyilvántartásba vétele a MEKH feladata. A közölt engedélyezési lista szerint Magyarországon (2026.08.02-án) összesen 18 energiaközösséget tart nyilván a MEKH, amelyből 2023-ban 2 db, 2024-ben 7 db, 2025-ben 8 db, míg 2026-ban 1 db került bejegyzésre. A 18 db bejegyzés több mint fele, 11 db az EMI-MA-21 kódjelű pályázati kötelezettje, amelyben a nyilvántartásba kerülés a pályázat elszámolási feltételeként volt adott. A pályázatok fenntartási periódusa még csak később, 2026.08.31-én indul. További 1db INTERREG pályázat kötelezettjeként került bejegyzésre, további 1db végrehajtás alatt áll, további 1db H2020 program keretében került bejegyzésre, további 1db ZFR-EKM-2020 pályázat kötelezettjeként létrejött energiaközösség. További 1db elérhetetlen, regisztrált domain-je lejárt. További 1db-nak nincs semmi elérhetősége.

A 18 db bejegyzett energiaközösségből **aktív működő energiaközösség 1 db van**, amely közösségi erőmű beruházást hajtott végre és a beruházás hasznainak visszaosztása aktívan megtörténik, ugyanakkor ezen szerveződés is EU forrás felhasználásával valósult meg.

Különösen fontos belátni, hogy a fentiek mentén az EU energiaközösségi célkitűzései Magyarországon a támogatási programok ellenére nem indultak el olyan intenzitással, mint azt a források volumene indokolná, illetve maguk a konstrukciók és kialakított programok indikátorként meghatározták.

Az energiapiaci szereplők csoportképzése támogatások mellett is akadózni látszik, miközben az energiaközösségek organikus előretörését várnánk azok pozitív gazdasági és energetikai hasznai miatt. A kérdéskör sokkal összetettebb, mint amennyi felfedhető lenne jelen kutatás egyéb célkitűzései mellett. Ugyanakkor kifejezett célom, hogy az energiaközösségek tekintetében a probléma körének egy vizsgálati lehetőségét tárjam fel (kiegyenlítő percepciók szempontjából), amellyel közelebb kerülhetünk a probléma megoldásához.

7 Szimuláció formális leírása

A következőkben saját, egymásra épülő egyensúlyi modellekből álló modellrendszert építék fel a 4. fejezetben megfogalmazott kutatási kérdések vizsgálatához. A modellezésben a közgazdasági alapösszefüggésekhez nyúlok vissza: a kereslet, a kínálat és a piaci egyensúly feltételeiből indulok ki. Az oligopolisztikus megközelítésektől eltérően a kiinduló modellben tökéletesen versenyző piacot feltételezek. A vizsgálat középpontjába így nem a szereplők piaci erőfölényét és stratégiai versengését, hanem a menetrendi eltérések és az azokról alkotott percepciók döntési hatásait helyezem.

A modellrendszert nem egyetlen piac feltételrendszerére építem: a másnapi piac mellett már a kiinduló modellbe bevezetem a kiegyenlítő piacot is. A két piacot a szereplők döntésein és elszámolásain keresztül kapcsolom össze. Ugyanaz a szereplő mindkét piacon megjelenhet, így a másnapi piaci döntésének gazdasági következménye nem ítéltető meg kizárólag az ott kialakuló ár és mennyiség alapján. A később megvalósuló menetrendi eltérés és annak elszámolása szintén alakítja a költségeit vagy bevételeit, az ezekre vonatkozó várakozás pedig már az előzetes döntésében is szerepet kaphat.

A saját megközelítés lényegi eleme, hogy a menetrendi eltérést megkülönböztetem az arról alkotott szereplői percepcióktól. Nem feltételezem, hogy az eltérésről minden szereplő azonos információval rendelkezik, vagy annak következményeit azonos módon veszi figyelembe. A modellváltozatokban e különbségeket beépítem a döntési összefüggésekbe, és vizsgálom az egyensúlyra gyakorolt hatásukat. A kutatás újdonságát tehát nem önmagában a két piac együttes kezelése, hanem a kiegyenlítési percepciók döntési és árképzési szerepének e keretben történő formalizálása adja.

A modellek szereplőit és döntési kereteit a 6. fejezetben bemutatott piaci működésből bontom ki. A legegyszerűbb feltételrendszertől haladva fokozatosan vezetem be az eltérő informáltságot, a kereskedő közvetítő szerepét, a termelési korlátokat, majd a percepciók egymáshoz igazodását. A matematikai formalizmus az egyes feltevések és következményeik pontos elkülönítését szolgálja. Az így felépített modellrendszer ad alapot a pénzügyi ösztönzők, a csoportképzés és a közös piaci fellépés gazdasági következményeinek későbbi vizsgálatához.

7.1 modell - Naiv fogyasztó

A kiinduló modellben legyen 3 szereplő, akik interakcióját a célfüggvényeik mentén vizsgálom. Legyen F fogyasztó, aki csak és kizárólag villamos energiát fogyaszt, ugyanakkor rugalmas módon: növekvő villamosenergia-árak esetén egyre kevesebbet, és fordítva, csökkenő árak esetén egyre többet hajlandó fogyasztani. Ezt a hajlandósági maximumot írja le $f(p): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ valós számokon értelmezett valós függvény.

Itt fontos kiemelni, hogy f mint keresleti függvény a fogyasztási volumen maximumot adja meg adott ár mellett, azaz F fogyasztó p ár mellett legfeljebb $q = f(p)$ mennyiséget fogyasztana. Ez nem jelenti azt, hogy kevesebb q mennyiség elfogyasztásáért nem adna ugyanúgy p árat. F fogyasztó fogyasztása tehát valahol az f függvény által meghatározott tér alatt helyezkedik el, azaz $q^* \leq f(p)$, ahol q^* a ténylegesen fogyasztott mennyiség. Ugyanakkor a definíció tovább erősíthető: p ár mellett F fogyasztó az $f(p)$ által definiált maximális mennyiséget is fogyasztja. Ez az egyszerűsítés jelentősen kezelhetőbbé teszi a modellezést.

Azt is külön ki kell emelni, hogy ezen definíció mentén p egységárat jelent. A fogyasztó számára q mennyiség elfogyasztása nem p költséggel, hanem $C = p \cdot q$ költséggel jár. Ennek megfordítása is igaz: q mennyiséget C/q átlagáron fogyaszt, illetve a korábbi kijelentést pontosítva q mennyiséget legfeljebb $(f(p) \cdot q)/q = f(p)$ átlagáron hajlandó fogyasztani. Későbbiek során ennek kiemelt jelentősége lesz.

Az árakat és mennyiségeket dimenzió nélküli fogalmakként értelmezem, hasonlóan a mechanisztikus modellezésben alkalmazottakhoz (Taitel, 1994). Eltekintek attól, hogy a villamosenergia jellemzően kW és kWh mennyiségi egységben definiált, vagy hogy a kettő mértékegység időbeli dimenziója releváns szerepet hordoz számos kapacitás kérdés tekintetében. Az egyensúlykeresés vonatkozásában jelen kutatás szempontjából elhagyhatók a mértékegységek. Ugyanakkor az értelmezési tartomány pozitív és negatív részei eltérő interpretációt hordoznak: a fogyasztó esetén a negatív mennyiség termelésként interpretálható. A kutatás során kezdeti vizsgálatokban a pozitív értelmezési tartományra szorítkozom, de később ez feloldásra kerül, mert jelentősége eltűnik.

Az f függvény fontos tulajdonsága, hogy függvény: minden p -re egy és csakis egy q mennyiséget rendel. Ennek a megfordítása is kiemelt feltétel: f^{-1} is létezik és szintén függvény, azaz:

$$f^{-1}: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$$

Az inverz létezése erős feltételezés, a valóságban nem minden esetben garantálható (Farrell, 1952), hogy teljesül, de a modellezést jelentősen megnehezíti az a tény, ha f inverze csak adott tartományokban viselkedne függvényként.

A 6.2 fejezetben látott folytonos közelítést ragadom most meg, és nem a pontos, lépcsős, illetve szakadós leképezést használok, ezzel is egyszerűsítve a számításokat.

Az F fogyasztó kapcsán már csak egy kritikus paramétert kell bevezetni: a tévedésének lehetőségét. Jelölje $\epsilon \in (-1,1)$ azt a mennyiséget amennyivel F fogyasztó az általa bejelentett q mennyiséghez képest többet vagy kevesebbet fogyaszt. Ennek mentén a tényleges fogyasztása $q + \epsilon$. Itt fontos megjegyezni, hogy a 6.2 alapján úgy is érvelhetne az olvasó, hogy ϵ éppen q függvénye, hiszen kisebb fogyasztás várhatóan kisebb mennyiségi eltérést okoz. Azonban már a termelői oldalon a nyilvános KÁT-mérlegkör esetében is látható a valóságban, hogy a kinyilvánított termelés és a tény termelés markánsan képes eltérni egymástól, akár több ezerszeres különbség is lehetséges. Hasonlóan a fogyasztás esetében a $q = 0$ kinyilvánított fogyasztás nem mond el semmit az elkövetett hibáról, sokkal inkább a fogyasztó hálózati vételezési pontjának kapacitása jelenthet korlátot, azaz ϵ ha függvényszerű is, nem a kinyilvánított q -tól függ. Jelen kutatásban ϵ végig q -tól független.

Be kell még vezetni az idő fogalmát.

Az idődimenzió a jelen kiinduló modellben kétállapotú. A $t = 0$ a „most” állapota, és $t = 1$ a „jövő” állapota, ami a szállítási dátum. F fogyasztó $t = 0$ -ban nyilatkozik a fogyasztani kívánt mennyiségéről adott áron, azonban a tényleges fogyasztása csak $t = 1$ -ben történik meg. Ugyanakkor a $t = 1$ időpontban megengedett, hogy $q_{t=0}$ mennyisége eltérjen $q_{t=1}$ -től, éppen a fenti ϵ mértékben, azaz formálisan:

$$q_{t=0} + \epsilon = q_{t=1}$$

A bevezetés megfeleltethető a $t = 0$ -ban a DA (Day-Ahead, másnapi) piac és a $t = 1$ -ben kiegyenlítő piac fogalmaknak a valóságban. F fogyasztó a DA piacon q mennyiséget vásárol, illetve fogyaszt, a kiegyenlítő piacon pedig ettől a q mennyiségtől ϵ mértékben eltér. A $t = 0$ -ban adott $q_{t=0}$ mennyiségre, mint a fogyasztó menetrendjére hivatkozom a későbbiek során. A „menetrend” fogalom valóban hasonló egy busz menetrendhez, ahol a menetrend előre adott, kinyilatkoztatott, és ahhoz képest késés történhet. A

villamosenergia-piacon, és így a modellben is, a menetrendhez képest annak is jelentősége van, hogy az eltérés pozitív vagy negatív. Amennyiben $\epsilon > 0$, FEL irányú szabályozásként hivatkozható, hiszen a tény fogyasztás eléréséhez többlet villamosenergiára van szükség, mint korábban arról tudomása volt a piacnak, valamelyik termelőnek többlet kell termelnie. Ha $\epsilon < 0$, akkor LE irányú szabályozásként hivatkozható, kevesebb villamosenergiára van szükség a rendszerben, ezért valamely termelőnek kevesebbet kell termelnie – kvázi „le kell csavarnia” a termelését. Innen ered a villamosenergia-piac LE és FEL irányú szabályozása is.

Az eltérésnek természetesen ára van. Legyen a kiegyenlítő piaci ár p_e . Ezáltal F fogyasztó által fizetendő teljes költség (adott p áron maximális fogyasztás mellett): $C = f(p) \cdot p + \epsilon \cdot p_e$. A teljes költségnek ugyanakkor csak akkor van relevanciája a fogyasztó számára, ha ϵ mértékéről van bármilyen információja, akár csak annak eloszlásáról. Amennyiben nincs, úgy a döntését nem képes hozzá igazítani semmilyen mértékben, még egy közvetett, úgynevezett szignálváltozón keresztül sem (Antelo & Loureiro, 2009), amely információt szolgáltatna.

A modellezés szempontjából ϵ -t valószínűségi változóként lenne érdemes bevezetni, azonban a kiinduló modellben naiv fogyasztót feltételezek. F nem ismeri ϵ -t, nem ismeri sem sűrűség, sem eloszlásfüggvényét, annak semelyik paraméterét, valamint feltételezem, hogy F nincs is tudatában ϵ létezésének. Ezen felételekből fakadóan F a DA piacon csak és kizárólag $f(p)$ függvénye szerint viselkedik és dönt, valamint ϵ -t egyelőre realizált skalárként vezetem be.

Formálisan összefoglalva tehát megfogalmazható a modell 1. feltétele:

1-A. Feltétel. Legyen F fogyasztó fogyasztási függvénye $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Tegyük fel f inverze f^{-1} létezik és függvény ($\forall p: f^{-1} \circ f(p) = p$). Fogyasztó tényfogyasztása ϵ mennyiséggel eltér a DA piaci fogyasztásától, azonban erről a fogyasztónak nincs tudomása. Minden ϵ -ra fogyasztó p_e egységárat fizet.

Definiáljuk most termelőt is. Legyen a modellben T termelő kínálati függvénye:

$$g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$$

A g függvény minden p ár mellett megadja, hogy T termelő mekkora mennyiséget hajlandó termelni maximum. A fogyasztó f függvényéhez hasonlóan g is maximum függvény, azaz adott ár mellett termelő termelhet kevesebbet is. Ugyanakkor feltételként

rögzítem, hogy p ár mellett termelése éppen ez a maximális $g(p)$. Negatív termelés fogyasztásként lenne interpretálható, ezért ezt az ágat csak a későbbiek során vesszem figyelembe, ugyanakkor a termelési függvény értelmezési tartományát nem szűkítem, csak az egyensúlykeresés történik a pozitív mennyiségi térben.

Szintén f -hez hasonló módon fel kell tenni a számítások egyszerűsítésének érdekében, hogy g inverze létezik és függvény. Egy ilyen erős feltétel nem biztosítható a hazai piacon (lásd 6.2 fejezet), így az inverze sem fejezhető ki egyszerű függvényalakban (Figueiredo & Silva, 2019), de fogyasztáshoz hasonlóan a termelési görbét is folytonos közelítő görbeként ragadom meg lineáris vagy kvadrátikus függvényként.

A $g(p)$ leképezés során a korábbiakhoz hasonlóan p átlagárát/egységárát jelent. T termelő q mennyiség esetén $p \cdot q$ bevételre tesz szert.

A termelés során az idődimenzióknak nincs hatása. Feltételezhető, hogy T tökéletesen menetrendez, ezáltal $t = 1$ -ben nem tér el a $t = 0$ -ban vett termelésétől, formálisan tehát termelőre: $q_{t=0} = q_{t=1}$. Termelő ezen információ teljes birtokában van.

Összefoglalva tehát:

1-B. Feltétel. Legyen T termelő termelési függvénye $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Tegyük fel g inverze g^{-1} létezik és függvény. Termelő ténytermelése nem tér el a DA piaci termelésétől, és erről így is van tudomása.

A fogyasztó és termelő együttes definiálása már piaci egyensúlyi modell leképezéséhez is alkalmas: Nevezzük egyensúlynak azt a p^* egyensúlyi árat, amelyre F fogyasztó fogyasztási mennyisége és T termelő termelési mennyisége megegyezik. Jelölje az így kapott egyensúlyi mennyiséget q^* . A p^* egyensúlyi áron tehát a fogyasztó nem fogyasztana q^* -nál többet, azaz éppen $q^* = f(p^*)$. Hasonlóan p^* esetén termelő nem termelne többet q^* mennyiségnél, azaz $q^* = g(p^*)$. Mindezek mentén:

$$g(p^*) = f(p^*) \quad (7-1)$$

Az egyensúly definíció önkényesnek tűnhet, azonban intuíció szerint a fogyasztó és a termelő valamiféle érdekellentétben áll. Termelő igyekszik magasabb áron minél többet termelni, fogyasztó pedig minél kevesebbet hajlandó fogyasztani. Éppen ezért abból a pontból, ahonnan egyikük sem képes kimozdulni egyoldalúan, úgy, hogy a másik félnek ne legyen érdeke változtatni, a piac egy stabil pontjának tekinthető (Wang, 1993).

De mi garantálja, hogy ez az egyensúly valóban létezik? Jelenlegi feltételrendszer még sajnos gyenge az egyensúly létezéséhez. Feltételezni kell, hogy f és g folytonosak a teljes értelmezési tartományukban. Ugyanakkor még ekkor sem garantálható az egyensúly létezése a függvények terében. A feltételrendszert tovább kell erősíteni az alábbiak szerint:

1-C. Feltétel. f és g függvények folytonosak, valamint f szigorúan monoton csökken és g szigorúan monoton nő.

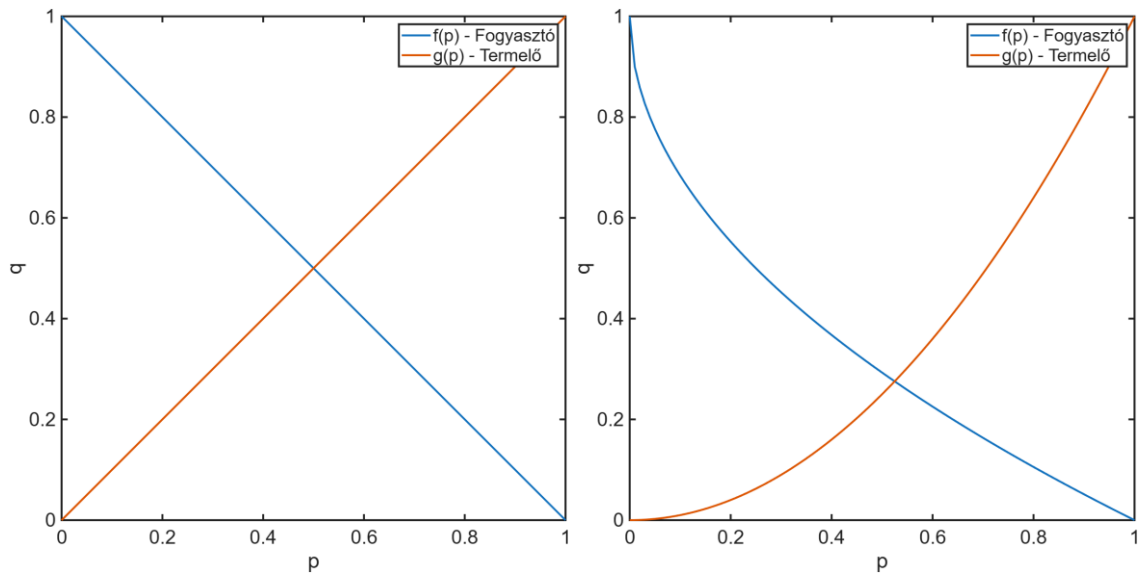
Ekkor létezik egyensúly a térben, miközben a feltétel interpretációja is kézenfekvő és a korábban leírtakkal összhangban van: a fogyasztó az árak növekedésével egyre kevesebbet fogyaszt, a termelő pedig az árak emelkedésére egyre több mennyiséget hajlandó termelni. A folytonosságból és a szigorú monotonitásból ugyanakkor egyszerűsíthető az inverz létezési feltétel, hiszen ekkor biztosan létezik f és g inverze.

Az egyensúly fogalom most $t = 0$ -ban, azaz DA piacon értelmezett. Egyelőre nem fogalmaztam meg állítást azzal kapcsolatban, hogy $t = 1$ -ben mi történik, de egy fontos implicit feltételezéssel éltem: F fogyasztó nem tud a fogyasztási eltéréséről $t = 1$ -ben, de erről T -nek sincs tudomása. Hasonlóan T nem téved a menetrendjében, pontosan ugyanazt termeli a DA piacon mint $t = 1$ -ben, ezt így is tudja, hogy erről F is pontosan ezt tudja.

Az informáltság rekurzív is, azaz F nem tudja eltérését, T sem tudja F eltérését, és F tudja, hogy T is úgy tudja, nem lesz eltérése, és így tovább. Fordítva T -re is, F tudja, hogy T nem tér el majd a menetrendjétől, és erről T is tud, hogy F tudja, és így tovább. A rekurzív szimmetrikus informáltságnak kiemelt szerepe van, mert minden egyéb esetben megváltozik az egyensúly fogalom. Ettől való eltérés esetén már nem írható fel egyszerűen az egyensúly egyenlet $g(p^*) = f(p^*)$ alakban. A rekurzív szimmetrikus informáltságnak rendkívüli szerepe van, ezért külön feltételként is kiemelem:

1-D. Feltétel. T és F $t = 1$ -beli eltérésének saját ismerete köztudott tudás egymás között.

Az egyensúly létezésére a fenti feltételek alapján mutat példát az alábbi ábra. A fogyasztási és termelési függvények alakja hatással van az egyensúlyi árra és mennyiségre is.



7-1. ábra. Fogyasztási és termelési függvény példák az ár-mennyiség térben.
 Fogyasztási és termelési függvények lineáris (balra) és kvadratikus (jobbra) alak esetén.
 $f(p) = 1 - p$; $g(p) = p$ (balra), valamint $f(p) = 1 - p^2$; $g(p) = p^2$ (jobbra)
 Forrás: saját illusztráció, MATLAB

A definiált szereplőkkel sikerült egy egyensúlyi modellt megalkotni a DA piacra, azonban még mindig nem értelmezhető a kiegyenlítő piac szerepe, azaz a $t = 1$ -ben vett termelés és fogyasztás. A tény termelés és fogyasztásnak ugyanakkor kötelezően meg kell egyeznie a valóságban, magából a villamosenergia fizikai terjedéséből fakadóan. Egyéb esetben frekvenciaváltozás jelentkezne a hálózatban, ami akár végzetes eredményekkel is járhat.

Legyen a modellben egy harmadik típusú szereplő is definiálva: $\bar{T}$ kiegyenlítő termelő. Kiegyenlítő termelő feladata $t = 1$ -ben vette eltérés kezelése, jelen esetben ϵ termelés lefedése szükség esetén. Legyen $\bar{T}$ kiegyenlítő termelő termelési függvénye $\bar{g}$. A $\bar{g}$ interpretációja hasonló a korábban definiált g függvényhez, azaz bármely p egységár mellett $\bar{T}$ kiegyenlítő termelő maximum $\bar{g}(p)$ mennyiség hajlandó termelni, de feltételezem, hogy ennyit is termel.

A kiegyenlítő termelő ugyanakkor ugyanúgy villamosenergiát termel $t = 0$ -ban és $t = 1$ -ben, ezért nem zárható ki, hogy mindkét piacon megjelenik. Ennél azonban erősebb állítás is megfogalmazható. Amennyiben ϵ pozitív és negatív is lehet, úgy $\bar{T}$ -nek mindkét piacon meg kell jelennie, hiszen amennyiben DA piacon nincs pozitív termelése, úgy a kiegyenlítő piacon nincs honnan LE irányba szabályoznia. Egyéb esetben a fogyasztónak kellene visszafogni a fogyasztását, amelyet a modell feltétel rendszere szerint nem tud, vagy ennek a kiegyenlítő termelőnek kell fogyasztóként viselkednie. Mindkét eset elkerülendő, így megengedhető $\bar{T}$ -nek mindkét piacon való megjelenése, mégpedig úgy,

hogy a termelését megbontja két piac között: w mennyiséget a DA piacra ajánl fel $t = 0$ -ban, és ϵ mennyiséget pedig a kiegyenlítő piacon $t = 1$ -ben.

Formálisan: $w + \epsilon = q = \bar{g}(\bar{p})$. Ugyanakkor $\bar{p}$ egységár két összetevő súlyozott átlagából ered: DA piacon p egységárból, és a kiegyenlítő piacon p_e egységárból. Ezért:

$$w + \epsilon = \bar{g}\left(\frac{w \cdot p + \epsilon \cdot p_e}{w + \epsilon}\right) \quad (7-2)$$

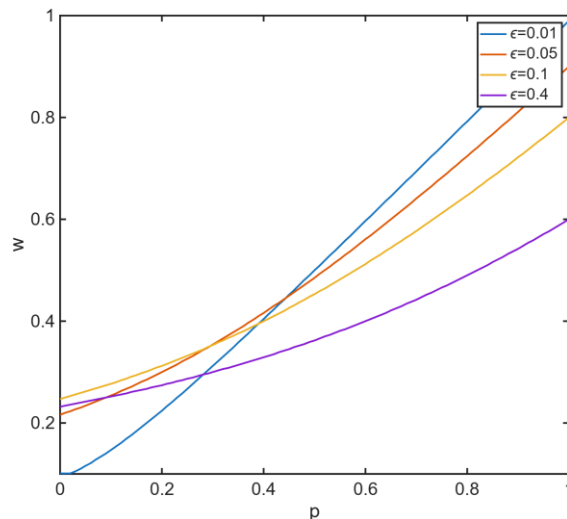
Összefoglalva tehát a következő állítható $\bar{T}$ kiegyenlítő termelőről:

1-E. Feltétel. Legyen $\bar{T}$ kiegyenlítő termelő termelési függvénye $\bar{g}: [-1,1] \rightarrow [-1,1]$. Tegyük fel $\bar{g}$ inverze $\bar{g}^{-1}$ létezik és függvény. Termelését jelölje w mennyiség $t = 0$ -ban, és jelölje ϵ pedig $t = 1$ -ben. Mindezekről $\bar{T}$ -nek tudomása van.

Az új szereplővel ismét leírható a korábbihoz hasonló piaci egyensúly. Ehhez mindenekelőtt $\bar{T}$ termelési függvényéből kell kiindulni és alkalmazni az inverz függvényét mindkét oldalra:

$$\begin{aligned} \bar{g}^{-1}(w + \epsilon) &= \bar{g}^{-1} \circ \bar{g}\left(\frac{w \cdot p + \epsilon \cdot p_e}{w + \epsilon}\right) = \frac{w \cdot p + \epsilon \cdot p_e}{w + \epsilon} \\ (w + \epsilon) \cdot \bar{g}^{-1}(w + \epsilon) &= w \cdot p + \epsilon \cdot p_e \\ \frac{1}{w}(w + \epsilon) \cdot \bar{g}^{-1}(w + \epsilon) - \frac{\epsilon}{w} \cdot p_e &= p \end{aligned} \quad (7-3)$$

Az egyszerűsítések után a kiegyenlítő termelő esetén látható, hogy adott p_e és p piaci ár esetén milyen mennyiségeket alokálna a DA és a kiegyenlítő piacra külön-külön. Az alábbi ábra ezt az összefüggést szemlélteti egy egyszerű függvényforma a $\bar{g}(p) = p$ esetén.



7-2. ábra. Kiegyenlítő termelő DA piacra szánt mennyisége adott DA ár mellett.

A piacra vitt mennyiség a bizonytalanság függvényében összetetten változik.

$$p_e = 1, \bar{g}(p) = p,$$

Forrás: saját illusztráció, MATLAB

Az ϵ kiegyenlítő piaci bizonytalanságnak is értelmezhető, amely mostani keretben kizárólag a kiegyenlítő $\bar{T}$ termelő számára ismert és prediktálható. Az $\epsilon = 0$ -ban visszakapható az eredeti termelési függvény, azonban ahogy ϵ növekszik, úgy $t = 1$ -ben megjelenő p_e a DA piacra szánt mennyiségre is hatással van.

A fenti ábra alapján ϵ bizonytalanság növekedésével kiegyenlítő piaci szereplő egyre kevesebb mennyiséget alokál a DA piacra magas p ár mellett, és készül fel a kiegyenlítő piaci szerepvállalására. A fogyasztó menetrendtartásának hiánya a szabályozni képes termelőket a kiegyenlítő piac felé orientálja, ezáltal csökken ugyanazon DA piaci áron a kínált mennyiség. Ez az intuíciókkal azonos irányba hat, azaz a bizonytalanság értékesebbé teszi a kiegyenlítő piaci jelenlétet. Ugyanakkor $\bar{g}(p) = \alpha p + \beta$ és $\bar{g}(p) = \alpha p^2 + \beta p + \gamma$ függvényalakokra az $\alpha, \beta, \gamma, \epsilon \in (0; 1]$ felülről zárt intervallumból egyenletesen eloszlással választva 1.000 futás eredményeként megfigyelhető a következő intuícióval ellentétes állítás:

1. Állítás. Alacsony DA piaci áron nőhet és csökkenthet is a kiegyenlítő termelő által a DA piacra vitt mennyiség. A menetrendezési eltérés növekedése és a DA piac összefüggése nem írható le tendenciózus relációként.

Ez önmagában egy markáns eredmény, hiszen az alapvető piaci mechanizmusok szerinti következtetés éppen a DA piaci árral magyarázná fix kiegyenlítőpiaci árak mellett a piacra vitt mennyiséget. Azonban alacsony DA piaci árakon az átlagárat p_e magasra

emeli, így p alacsonyabb volta ellenére is nőhet a kínált mennyiség. Ez azonban nincs mindig így, lásd 7-2 ábrán $\epsilon = 0.1$ és $\epsilon = 0.4$ eseteket.

Érdemes megvizsgálni a piaci egyensúlyt a korábban rögzített egyenletek alapján a következő módosítással: a fogyasztó a teljes DA piaci kínálattal szembesül, az az a $T + \bar{T}$ termelők által kínálattal (ahol w^* a $\bar{T}$ által DA piacra vitt egyensúlyi mennyiség):

$$f(p^*) = g(p^*) + w^*$$

Az egyenletek összevonásával kapjuk, hogy:

$$p^* = f^{-1}(q^* + w^*) = g^{-1}(q^*) = \frac{1}{w^*}(w^* + \epsilon) \cdot \bar{g}^{-1}(w^* + \epsilon) - \frac{\epsilon}{w^*} \cdot p_e \quad (7-4)$$

A fenti egyenletet elnevezem **kiegyenlített egyensúly egyenletnek**.

A kiegyenlített egyensúly egyenlet az ár szempontjából közelíti meg a piaci egyensúlyt. Hasonlóan bevezethető a mennyiségi oldaláról is az egyensúly leírása, azonban úgy már ezen egyszerű modell kifejtése is rendkívül összetetté válik analitikus megközelítésben. Mindazonáltal fontos hangsúlyozni, hogy a dolgozatban nem célom analitikus levezetések tenni, csak és kizárólag addig, ameddig azt még a modellváltozat könnyedén megengedi. Ez éppen a jelen pont, hiszen a második modellől kezdve még lineáris alap termelési és fogyasztási függvényekkel is rendkívül komplex összefüggésrendszer adódik, amelyek vizsgálatát inkább nehezíti az analitikus megközelítés, mintsem könnyíti azon összefüggések felszínre hozását, amelyeket éppen feltárni és megérteni szeretnék.

A modell zárásaként 1-1 példán keresztül megvizsgálom, hogy mi történik pontosan a kiegyenlítő termelő ϵ menetrendtől vett eltérésre válaszul, illetve hogyan alakítja az egyensúlyt a bizonytalanság, amennyiben arra valóban adható egzakt válasz.

Példa. Legyen $\bar{g}(p) = \alpha p$, ekkor $\bar{T}$ termelő átlagár egyenletéből fakadóan:

$$w + \epsilon = \alpha \left(\frac{wp + \epsilon p_e}{w + \epsilon} \right)$$

$$(w + \epsilon)^2 = \alpha(wp + \epsilon p_e)$$

$$w^2 + 2w\epsilon + \epsilon^2 = \alpha wp + \alpha \epsilon p_e$$

$$w^2 + w(2\epsilon - \alpha p) + \epsilon^2 - \alpha \epsilon p_e = 0$$

A kiegyenlítő termelő DA piacra vitt mennyisége másodfokú egyenletként fejezhető ki a több paraméter függvényében, azaz a ϵ menetrendezési eltérés, a p DA piaci ár, valamint a p_e kiegyenlítő piaci ár függvényében:

$$w_{1,2} = \frac{-(2\epsilon - \alpha p) \pm \sqrt{(2\epsilon - \alpha p)^2 - 4(\epsilon^2 - \alpha \epsilon p_e)}}{2}$$

A zárójelek felbontásával egyszerűsítések után kapjuk, hogy:

$$w_{1,2} = \frac{-(2\epsilon - \alpha p) \pm \sqrt{a^2 p^2 + 4\epsilon \alpha (p_e - p)}}{2}$$

A formális leírás nehezen redukálható egyszerűbb esetre, ϵ és w kapcsolatát így p, p_e függvényeként a fenti alakban adom meg.

Ezen példából látható, hogy analitikus módon még egy leegyszerűsített villamosenergia-piaci modellben is összetett egy DA és kiegyenlítő piacon is megjelenő termelő leírása és döntési mechanizmusának feltárása, miközben lineáris termelési függvénnyel rendelkezik. Éppen ezért érdemes a numerikus leíráshoz fordulni. A későbbiek során és a további modellekben csak az alapvető összefüggéseket definiálom és formalizálom, éppen annyira, hogy az már numerikus optimalizációval, illetve ágens alapú szimulációval megoldhatóvá váljanak.

Mielőtt azonban továbbmennék a következő összetettebb modellre, szemléltetésként bemutatok egy másik példát is, amelyben igyekszem az egyensúlyi árakról és mennyiségekről analitikusan feltárni összefüggést.

Példa. Legyen inverz fogyasztási függvény $f^{-1}(q) = 1 - bq$. Hasonlóan $g^{-1}(q) = aq$ és $\bar{g}^{-1}(q) = \bar{a}q$. Ekkor a kiegyenlített egyensúly egyenlet 1. része alapján:

$$1 - b(q^* + w^*) = aq^*$$

$$w^* = \frac{(a+b)q^* - 1}{-b}$$

$$q^* = \frac{1 - bw^*}{a + b}$$

A kiegyenlített egyensúly egyenlet 2. része alapján:

$$g^{-1}(q^*) = \frac{1}{w^*} (w^* + \epsilon) \cdot \bar{g}^{-1}(w^* + \epsilon) - \frac{\epsilon}{w^*} \cdot p_e$$

$$\frac{a(1-bw^*)}{a+b} = \frac{1}{w^*}(w^* + \epsilon) \cdot \bar{a}(w^* + \epsilon) - \frac{\epsilon}{w^*} \cdot p_e$$

Vezessük be: $C_1 := \frac{a}{a+b}$, $C_2 := -\frac{ab}{a+b}$

$$C_1 + C_2 w^* = \frac{1}{w^*}(w^* + \epsilon) \cdot \bar{a}(w^* + \epsilon) - \frac{\epsilon}{w^*} \cdot p_e$$

$$C_1 + C_2 w^* = \frac{1}{w^*} \bar{a}(w^* + \epsilon)^2 - \frac{\epsilon}{w^*} \cdot p_e$$

$$C_1 w^* + C_2 w^{*2} = \bar{a}(w^* + \epsilon)^2 - \epsilon p_e$$

$$(C_1 - 2a\epsilon)w^* + (C_2 - \bar{a})w^{*2} + \epsilon p_e - \bar{a}\epsilon^2 = 0$$

Legyen: $C_3 := -\frac{ab}{a+b} - \bar{a}$

$$C_3 w^{*2} + (C_1 - 2a\epsilon)w^* + \epsilon p_e - \bar{a}\epsilon^2 = 0$$

$$w_{1,2}^* = \frac{-(C_1 - 2a\epsilon) \pm \sqrt{(C_1 - 2a\epsilon)^2 - 4C_3(\epsilon p_e - \bar{a}\epsilon^2)}}{2C_3}$$

A korábbi példához hasonlóan itt is az látható, hogy az egyensúlyi összefüggés ϵ, w, p vonatkozásában fenti egyenlet nehezen redukálható egyszerűbb alakra, így az összefüggés rendszer is összetett marad a paraméterek vonatkozásában.

A fejezet során megmutattam, hogy egy piaci egyensúlyi modell hogyan egészíthető ki úgy, hogy a markáns villamosenergia-piaci jellemzők és szabályok elemi részeit tartalmazza. Ugyanakkor azt is igazoltam, hogy ezen egyszerű leírás – noha minél általánosabb formalizmust igyekeztem bevezetni – már lineáris alapfüggvények esetén is a numerikus optimalizációt és szimulációt teszik indokolttá, hiszen analitikus módon az összefüggés rendszer túlzóan komplex a vizsgálatokhoz. Éppen ezért a következőkben ezek mentén kilépek a naiv modell kereteiből, és bevezetem a fogyasztó információját a menetrendtől vett eltérésére, de már csak numerikus modellek segítségével.

7.2 modell - Tudatos fogyasztó

A megelőző modell megközelítésben három szereplőt vizsgáltam: F fogyasztót, T termelőt és $\bar{T}$ kiegyenlítő termelőt. Minden szereplő egyszerre két, időben elváló piacon jelent meg – valójában a piacok időbeliségének nem volt szerepe. Az első, a DA piacnak nevezett $t = 0$ időpontban a fogyasztó $f(p)$ termék mennyiséget keresett, míg a termelő $g(p)$, a kiegyenlítő termelő pedig $w(p)$ mennyiséget vitt piacra adott p árszint mellett. Ugyanakkor a második, a kiegyenlítő piacon $t = 1$ időben F fogyasztó ϵ mennyiséget keresett (árszinttől függetlenül), miközben csak és kizárólag kiegyenlítő piaci termelő lépett erre a piacra éppen ezen ϵ kínálati mennyiséggel. A kiegyenlítő piacon éppen ezen oknál fogva nem is várható el ár-egyensúly, külső adottságként p_e ként volt definiált $t = 1$ -ben a piaci ár.

A vizsgálat ott vált megkülönböztethetővé egy általános kereslet-kínálati egyensúlyi modelltől (Gintis, 2007), amikor rögzítésre került: a kiegyenlítő termelő az egyetlen szereplő, aki tisztában van a két piac létezésével, így ezen információt fel is használja az első piacra vitt mennyiségének kialakításakor adott DA piaci p árszint mellett. A $\bar{g}(\cdot)$ kiegyenlítő termelő termelési függvénye során bemutatásra került, hogy valójában két árral szembesül, és a kínáltat ezen két ár súlyozott átlaga fogja alakítani: p és p_e .

Jelen modellünkben azt a torzulást igyekszem feloldani, hogy a kiegyenlítő piaci eltérésről, és annak létezéséről csak és kizárólag a kiegyenlítő termelőnek van információja. A valóságban a villamosenergia-piaci szereplők tisztában vannak, hogy lesz menetrendeltérésük, azaz a $t = 0$ és $t = 1$ -ben eltérő lesz a fogyasztásuk/termelésük, vagy ami hasonló, elfogadják, hogy az árazásban megjelenik ez az eltérés, és hajlandóak magasabb árat fizetni. Gyakorlatban általában utóbbi jelenik meg: a fogyasztók elfogadják a magasabb összeget, amit a kereskedők kockázati felárként, illetve jutalékként áraznak. Természetesen elosztói oldalon még számos más költséggel találkozunk, de ezek vizsgálatától most eltekintek.

A fogyasztó és a kiegyenlítő termelő ϵ eltérésre vonatkozó informáltságát tehát másképpen kell megragadni a modell formalizálása során. Addig, míg $\bar{T}$ a kiegyenlítő piaci árakat is figyelembe veszi, azaz p_e és p árakat is, addig a F fogyasztó döntése úgy írható le, hogy tudása szerint mindent p áron fogyaszt akár $t = 0$ -ban, akár $t = 1$ -ben. Ez egy fontos torzulása a modellnek, és bár a jelen leírás a tudatos fogyasztó bevezetéséről

szól, mégsem rögzítem az informáltság teljességét; csak részben teszünk felé lépéseket. Ennek gyakorlati jelentősége és oka van.

A fogyasztók a kiegyenlítő villamosenergia-piacon elsősorban passzív szereplők: Az árakkal kereskedőkön keresztül találkoznak, és ahogy korábban megfogalmazásra került, nem közvetlenül jelennek meg a kiegyenlítő piacon. Döntéseikben, akár lakossági, akár vállalati oldalon elsősorban rögzített, vagy indexált összpiaci árakkal szembesülnek. Negyedéves/éves szerződéskötések során előre meghatározott fogyasztási profilok – azaz jellemző negyedórás/órás fogyasztási görbe, szezonális korrekciókkal – jelennek meg, és az attól való eltérést a kereskedők a profil szerinti fogyasztással együttesen árazzák. A fogyasztók önmagukban csak elvétve jelennek meg a kiegyenlítő piaci aukciókon, a szekunder vagy a tercier szabályozási piacon. Nincs is közvetlen menetrendtartási kötelezettségük, mint például a KÁT piaci szereplőknek (Agnétis et al., 2013).

Jelenleg a modell során nincs kereskedő, de az információs torzulás már kezelhető: A fogyasztók bár tudatában is lehetnek a kiegyenlítő piacnak, mégis, sokkal realisabb az a feltételezés, hogy a DA piaci árban kívánják az ϵ fogyasztásukat is figyelembe venni. Legyen ezért a T fogyasztó f fogyasztási függvénye az alábbiak szerint: $\hat{q} + \epsilon = f(p)$, ahol $\hat{q} = q + w$. Az inverz fogyasztási függvénnyel operálva tehát:

$$f^{-1}(q + w + \epsilon) = p$$

A korábbi **1-A. Feltétel**-t így a következőképpen fogalmazom újra:

2-A. Feltétel. Legyen F fogyasztó fogyasztási függvénye $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Tegyük fel f inverze f^{-1} létezik és függvény, valamint f szigorúan monoton csökken. Fogyasztó tényfogyasztása ϵ mennyiséggel eltér a DA piaci fogyasztásától, erről a fogyasztónak van tudomása, azonban DA piaci áron veszi azt figyelembe.

A naiv modell T termelőjére szintén bevezethető a kiegyenlítő piaci informáltság részben vagy egészben. Ezt mégsem teszem meg, és a későbbiek során is tartózkodom ettől. A valóság egy leegyszerűsítésének tűnhet, mégsem kritikus a döntés: amennyiben T termelő teljes informáltságú szereplőként jelenik meg, és mind p_e , mind p árak alakítják a döntését, úgy valójában T csak a már definiált kiegyenlítő piaci $\bar{T}$ szereplő egy másik címkézése lenne, ami pedig a modell eredményeit sem numerikus, sem analitikus értelemben nem viszik előre. Hasonlóan, amennyiben T termelőnek szintén megjelenik egy γ eltérése a termelésétől $t = 0$ és $t = 1$ időpontok között, akkor a $\bar{T}$ kiegyenlítő

termelő problémája átírható $\epsilon + \gamma$ esetre. Ezáltal a kiegyenlítő piaci szereplő problémája a saját szempontjából sem változik meg. A fogyasztási f és termelési g függvények az egyensúly újradefiniálhatók, azaz, ha

$$p^* = f(q^* + w + \epsilon) = g(q^* + \gamma)$$

akkor létezik ugyanezen paraméterekre olyan f' és g' , amelyekre:

$$p^* = f'(q^* + w + \delta) = g'(q^*)$$

ahol $\delta = \epsilon + \gamma$, így újra visszavezethető a modell a korábbi vizsgálatokra. T termelőre tehát a korábbi modell feltétele helyben hagyható:

2-B. Feltétel. Legyen T termelő termelési függvénye $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Tegyük fel g inverze g^{-1} létezik és függvény, valamint g szigorúan monoton nő. Termelő ténytermelése nem tér el a DA piaci termelésétől, és erről így is van tudomása.

A T termelő és F fogyasztó mellett a $\bar{T}$ kiegyenlítő piaci termelő döntési függvényét és informáltsága is helyben hagyható, azaz:

2-C. Feltétel. Legyen $\bar{T}$ kiegyenlítő termelő termelési függvénye $\bar{g}: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Tegyük fel $\bar{g}$ inverze $\bar{g}^{-1}$ létezik és függvény. Termelését jelölje w mennyiség $t = 0$ -ban, és jelölje ϵ pedig $t = 1$ -ben. Mindezekről $\bar{T}$ -nek tudomása van.

Mindezek mentén továbbra is igaz, hogy $\bar{T}$ -re:

$$w + \epsilon = \bar{g}\left(\frac{w \cdot p + \epsilon \cdot p_e}{w + \epsilon}\right)$$

Az új modell új kiegyenlített egyensúly egyenlete kiegészítve már F új informáltsági szintjével tehát:

$$p^* = f^{-1}(q^* + w^* + \epsilon) = g^{-1}(q^*) = \frac{1}{w^*}(w^* + \epsilon) \cdot \bar{g}^{-1}(w^* + \epsilon) - \frac{\epsilon}{w^*} \cdot p_e$$

(7-5)

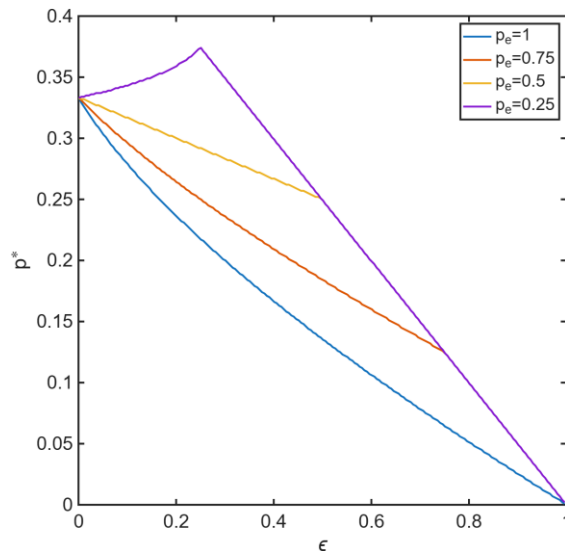
F fogyasztó már a saját menetrendezési hibájának tudatában jelenik meg a DA piacon, azonban p_e helyett p^* áron árazza be az eltérését. A modellben mindez természetesen torzulást is okoz: $p^* \cdot (q^* + w) + \epsilon \cdot p_e$ helyett $p^* \cdot (q^* + w) + \epsilon \cdot p^*$ költséggel szembesül F és így a piac is. A különbséget, azaz $\epsilon(p^* - p_e)$ -t valakinek meg kell fizetnie a modell zártságához. A következő lehetőségeink adódnak:

1. bevezetésre kerül egy új szereplőt, aki viseli a költségkülönbséget,
2. a fogyasztó fizetési kötelezettségének rója fel a piac az eltérést, amiről tud $t = 0$ -ban
3. a fogyasztó mentesíthető, és $\bar{T}$ kiegyenlítő termelőnél sem kerül érvényesítésre a különbség

A fenti esetek mindegyikében a jelen modell lényeges módosítása szükséges. A 2. és a 3. feltétel nem konzisztens az eddigi feltétel rendszerrel, hiszen korábban éppen F fogyasztó részleges informáltsága mellett érveltem, valamint a kiegyenlítő termelő egyensúlyi alapegyenletei is újradefiniálásra kell, hogy kerüljenek a 4. esetben. Egy új, független szereplő definiálható, aki a p_e ár meghatározója is lehet: a gyakorlatban látható, hogy a MAVIR, mint a kiegyenlítő piac szervezője (leegyszerűsítve p_e alakítója) számíthat pénzügyi kitettségre a piaci szereplők által, azonban a kitettsége fundamentális lényegét tekintve likviditási. A villamosenergia-piaci szereplők/mérlegkör felelősök a kiegyenlítettlenségük ellentételezését időben elnyújtva fizetik meg, letéti kötelezettségüknek nem tesznek eleget minden időpillanatban, így pénzügyi likviditási rés merül fel a TSO-nál, azaz a MAVIR-nál. A modell szempontjából azonban ez nem releváns irány, ezért egy 4. feltétel szerint járok el a modell zártságát illetően (ahogyan a korábbi Naiv modellben is):

4. a fogyasztó fizetési kötelezettségének rója fel a piac az eltérést, amiről nem tud $t = 0$ -ban

A modell minden részletében összeállt tehát, megvizsgálható a két egyensúlyi ár egymásra hatása a szereplők menetredezésről alkotott percepciója alapján.



7-3. ábra Egyensúlyi ár tudatos fogyasztó esetén.
A kiegyenlítő piaci ár különböző becsült menetrend eltérés esetén megjelenik a DA piacon is. A menetrendtől való eltérés összetett függvényalakot képez az egyensúlyi árak vonatkozásában.

$$\bar{g}(p) = p; f(p) = 1 - p; g(p) = p$$

Forrás: saját illusztráció, MATLAB

Jelen vizsgálatomban fontos implicit feltevással éltem, hogy F valamint $\bar{T}$ kiegyenlítő piaci szereplő ugyanarról az ϵ mennyiségről tud, és eszerint is dönt.

Az **7-3. ábra** eredményéhez már elvettem az analitikus levezetést és az egyensúly egyenletet numerikus számítással közelítettem. Az alapfüggvények folytonossági és monotonitási feltételeiből fakadóan az eredmények a numerikus eljárás felosztási finomságra kvázi-invariánsak, a következtetések levonhatók: $\bar{g}(p) = \alpha_1 p + \beta_1$; $g(p) = \alpha_2 p + \beta_2$ és $f(p) = \alpha_3 p + \beta_3$ függvényalakokra az $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, p_e \in (0; 1]$ felülről zárt intervallumból egyenletesen eloszlással választva 1.000 futás eredményeként megfigyelhető a következő állítás: A modell kiértékelésében a menetrendezési hiba markáns hatása jelenik meg. A kiegyenlítő piaci p_e árszintje töréspontként jelenik meg a DA piaci egyensúlyi árban az eltérés növekedésével. Ugyanakkor nagyon alacsony kiegyenlítő piaci p_e ár mellett, a DA ár a menetrendezési hiba növekedésével szintén növekszik. Ez egy kiemelt megállapításom is:

2. Állítás. *Alacsony kiegyenlítő piaci ár mellett a DA piaci egyensúlyi ár tudatos fogyasztók esetén növekszik, ahogy a menetrendezési hiba nő.*

A megállapítás úgy interpretálható, hogy bár a kiegyenlítő termelő számára jobban megéri a DA piacra termelni és ott magasabb kínálatot létrehozni, a fogyasztók mégis azt érzékelik, hogy magas áron jutnak hozzá a menetrend eltéréshez, ezért csökkentik a fogyasztásukat.

A következőkben megvizsgálom, mi történik abban az esetben, ha a fogyasztók és a kiegyenlítő termelő menetrend eltérési percepciója különböző. Ugyanazt a világot látják, csak más feltételezésben, azaz a menetrendezési hiba percepciója is hibás lehet.

7.3 modell - Percepció eltérés

A megelőző modellekben a formalizálás során feltételeztem: a fogyasztó és a kiegyenlítő piaci termelő ugyanúgy becsüli a menetrendezési eltérést, és ezen becslésük időben nem változik, valamint nem téves. Mindez meglehetősen erős feltételrendszernek tűnik, hiszen a gyakorlatban nem ezt tapasztaljuk. A villamosenergia-piac szereplői a szállítási időpontot megelőzően, vagyis mielőtt a fogyasztás/termelés ténylegesen történik, jellemzően menetrendezési hibát vétenek. De a hiba nem szándékolt: a szereplők tudják, hogy menetrendezési hibát fognak vétetni, ezzel kalkulálnak, azonban a pontos hibát nem tudják meghatározni. Ellenkező esetben a TSO-nak nem is lenne szerepe, hiszen önmagában már a menetrendezési hiba előzetes pontos ismerete elegendő lenne a piac tisztulásához és a $t = 0$ és $t = 1$ időpontbeli mennyiségi egyensúly létrehozásához.

A modell leírásakor így az eltérési hibát meg kell ragadni. Ahhoz, hogy hirtelen ne egy túlzóan komplex vizsgálati rendszert építsek (már így is kizárólag numerikus analízist lehetséges végrehajtani), a következő egyszerűsítést teszem: F fogyasztó ϵ menetrendezési eltérését ϵ_A értékben becsüli, miközben $\bar{T}$ kiegyenlítő termelő ugyanezen többletet vagy hiányt ϵ_B értékben határozza meg. A modellünk zártágához tételezzük fel, hogy ϵ_B a valós menetrend eltérés, azaz a $t = 0$ és $t = 1$ időpont közötti fogyasztási különbség.

Mindez elegendő ahhoz, hogy megmutassam: a piac szereplői eltérő módon becsülik a hibájukat, és ez végül egy jelentősen eltérő egyensúlyi megoldáshoz vezet. Formálisan a modell tehát:

3-A. Feltétel. Legyen F fogyasztó fogyasztási függvénye $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Tegyük fel f inverze f^{-1} létezik és függvény, valamint f szigorúan monoton csökken. Fogyasztó tényfogyasztása ϵ_B mennyiséggel eltér a DA piaci fogyasztásától, azonban a fogyasztónak ϵ_A eltérésről van tudomása és azt DA piaci áron veszi azt figyelembe.

3-B. Feltétel. Legyen T termelő termelési függvénye $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Tegyük fel g inverze g^{-1} létezik és függvény, valamint g szigorúan monoton nő. Termelő ténytermelése nem tér el a DA piaci termelésétől, és erről így is van tudomása.

3-C. Feltétel. Legyen $\bar{T}$ kiegyenlítő termelő termelési függvénye $\bar{g}: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Tegyük fel $\bar{g}$ inverze $\bar{g}^{-1}$ létezik és függvény, valamint $\bar{g}$ szigorúan monoton nő. Termelését jelölje w mennyiség $t = 0$ -ban, és jelölje ϵ_B pedig $t = 1$ -ben. Mindezekről $\bar{T}$ -nek tudomása van.

A három kiinduló feltétel mentén a kiegyenlített egyensúly egyenlet:

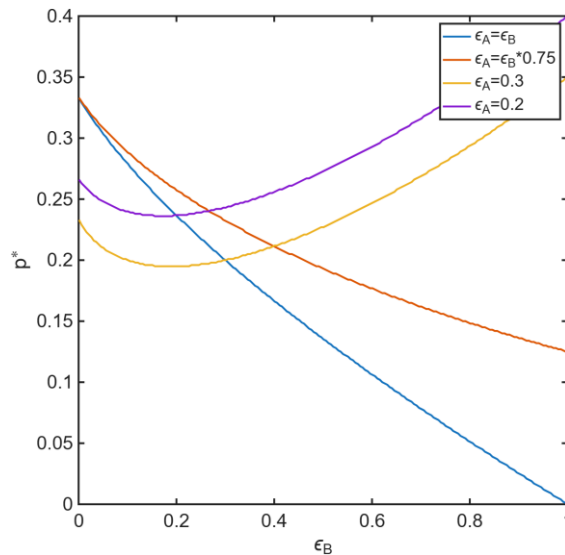
$$p^* = f^{-1}(q^* + w^* + \epsilon_A) = g^{-1}(q^*) = \frac{1}{w^*}(w^* + \epsilon_B) \cdot \bar{g}^{-1}(w^* + \epsilon_B) - \frac{\epsilon_B}{w^*} \cdot p_e$$

(7-6)

Látszólag igen apró változtatás történt, miközben a fenti egyenletben a korábbi egyensúly $\epsilon_A = \epsilon_B$ menetrendezési percepció speciális változata. Az általánosítás felé tett lépésben fontos hangsúlyozni:

- $\epsilon_A = \epsilon_B$ esetén a piac tökéletes információval rendelkezik a menetrendezési hiba kilétéről, vagy ami ugyanaz a döntéseik szempontjából: ugyanúgy azt tudják róla a $t = 1$ időpont végéig.
- $\epsilon_A > \epsilon_B$ esetén F fogyasztó felül becsüli saját menetrendezési hibáját $\bar{T}$ kiegyenlítő termelőhöz képest, ezáltal F fogyasztó magasabb fogyasztási egyensúlyra számít, így mindez ár csökkentő hatású. Ugyanakkor kiegyenlítő termelő $p < p_e$ árszint mellett magasabb átlagáron több kiegyenlítő mennyiséggel kalkulál, ami csökkenti a DA piacra vitt mennyiséget így végül p ár emelkedéséhez vezet. A kettő ellentétes irányú hatás eredője nem triviális.
- $\epsilon_A < \epsilon_B$ esetén az előző pont megfordítása jelenik meg. Fogyasztó ár emelkedést idéz elő a saját percepciója révén, miközben kiegyenlítő termelő a DA piaci árat lefelé nyomja.

A modell numerikus egyensúlykeresés mentén elvégzett példánkat a következő ábra szemlélteti:



7-4. ábra. DA egyensúlyi ár változása menetrendezési percepció eltérése esetén.
A percepcióban való eltérés jelentősen alakítja a DA piacot, miközben a kiegyenlítő piaci egyensúlyi ár változatlan. $\bar{g}(p) = p, p_e = 1; f(p) = 1 - p; g(p) = p$
Forrás: saját illusztráció, MATLAB

Az eredmények alapján jól látható, hogy az $\epsilon_A = \epsilon_B$ egyenlőségre valóban a korábbi modell kapható vissza. Ugyanakkor a DA piaci egyensúlyi ár $t = 0$ -ban összetetten alakul az ϵ_A és ϵ_B percepciók függvényében.

3. Állítás. *A fogyasztó alacsonyabb menetrend eltérési percepciója a kiegyenlítő szereplőhöz képest a DA piaci árak emelkedésére hat.*

A fenti állítást ellenőriztem több scenárióval: $\bar{g}(p) = \alpha_1 p + \beta_1; g(p) = \alpha_2 p + \beta_2$ és $f(p) = \alpha_3 p + \beta_3$ függvényalakokra az $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, p_e \in (0; 1]$ felülről zárt intervallumból egyenletesen eloszlással választva 1.000 futás eredményeként validáltam.

A 3. Állítást kaptam minden ϵ_A szinten, azonban a percepció egyensúlyi árfelhajtó szerepe változó. Fontos látni ugyanakkor: Most kizárólag FEL szabályozási eseteket vizsgálom implicit módon. Nem zártam ki a modellezés során, hogy ne lehessen LE szabályozás – $\bar{T}$ kiegyenlítő termelőnél tettem részleges utalást, de a modellezés során történt értelmezési tartomány megszorítást LE irány vonatkozásában. Ennek értelmében most ϵ_A a vizsgálati szempontból FEL szabályozási kapacitást jelent, hiszen a $\epsilon_A > 0$ eseteket tekintjük. Hasonlóan igaz ez ϵ_B -re is, ahogyan $\epsilon_B > 0$ a szimulációk során. A későbbiekben tekintek példát LE szabályozási esetre is, azonban most a modell formális leírása történik meg, amelyet folyamatosan szimulációs környezetbe helyezek és numerikusan oldok meg.

FEL irányú szabályozás esetén a megállapítás egy megfelelő interpretációt tesz lehetővé, ami összeeseng a valós intuitív folyamatokkal: a fogyasztó mentrendezési hibájának alacsony vélelme a kiegyenlítő piac rögzítettsége miatt visszahat a DA piacra. Valóban azt tapasztaljuk, hogy a kiegyenlítő piaci szereplők a DA és ID piacokon is igyekeznek felkészülni a menetrendezési hibákra, és gyorsabban reagálnak, mint a fogyasztók, ezáltal magasabb DA piaci árak jönnek létre.

A modell során egy kiemelt villamosenergia-piaci szereplő jelenléte még nem került szóba: a fogyasztók, termelők, kiegyenlítő piaci szereplők mellett a hazai villamosenergia-piac markáns szereplői a kereskedők. A kereskedők közvetítői szerepe alapján úgy is lehetne érvelni, hogy nem igazán vannak hatással a piaci mechanizmusra, hiszen csak a saját jutalékkal torzítják a piacot. Ugyanakkor a következőkben be fogom mutatni, hogy ez a folyamatok csak egyik aspektusa.

7.4 modell - Mérlegkör

A villamosenergia-piac fizikai szállítását rendkívüli felkészülés előzi meg. Adott időpillanatban a tényleges villamosenergia-termelés és -fogyasztás meg kell, hogy egyezzen az egész hálózatban. Előzetesen ezért minden szereplő becsüli saját termelését/fogyasztását és megegyezik a várható villamosenergia-mennyiségről. Később a szállítási pillanatban a tényleges eltérést a TSO kezeli a kiegyenlítő piacon, végül a szereplők a menetrendtől vett eltérést elszámolják egymás között (Müsgens et al, 2014).

Az elszámolás megkönnyítésére a szabályzó a piaci szereplőket mérlegkörökbe szervezi, és mérlegkör felelősöket jelöl ki. A TSO, a kiegyenlítő piac szervezője adott mérlegkörbe tartozó szereplők együttes menetrend eltérését tekinti, és feljűk a mérlegkör felelősön keresztül együttesen számol el. Egy mérlegkör tehát formálisan például $M = \{F, T, \bar{T}\}$. Az M mérlegkör $t = 1$ -beli eltérése szereplőként a korábbi jelölés rendszerrel az előjeles ϵ_A, ϵ_B , akkor az M mérlegkör eltérése $\epsilon_A + \epsilon_B$ lesz, vagy általánosan:

$$\mathbf{E}_M = \sum_{i \in M} \epsilon_i$$

Amennyiben $\mathbf{E} = 0$, úgy TSO nem ír elő kiegyenlítő piaci fizetési kötelmet, egyéb esetben a LE és FEL szabályozás díját a mérlegkörrel azaz a mérlegkör felelőssel számolja el. Fontos látni, hogy attól, hogy egy M mérlegkörnek nem keletkezik kiegyenlítési költsége összességében, még nem biztos, hogy nem volt szükség kiegyenlítésre az egyes szereplőinek. A halmazon belüli belső elosztást a mérlegkör felelőse végzi, aki ilyen értelemben egy speciális szereplő.

Mielőtt ennek a kiemelt szereplőnek a bevezetésére térek, a mérlegkör eltérését magyarázni szükséges. Bevezetem az $\mathbf{E} = 0$ esetet, illetve FEL és LE szabályozásként értelmezhető, amikor rendre $\mathbf{E} > 0$ és $\mathbf{E} < 0$. Ugyanakkor az eltérés adott irányban nem feltétlen jár díjfizetési kötelemmel. Éppen ellenkezőleg. Amennyiben rendszer teljes eltérése, azaz minden M mérlegkör összesített eltérése adott irányú:

$$\tilde{\mathbf{E}} = \text{sgn}(\sum_j \sum_{i \in M_j} \epsilon_i)$$

úgy azok a mérlegkörök, amelyekre $\text{sgn}(\mathbf{E}_M) \neq \tilde{\mathbf{E}}$, a rendszer segítőiként kerülnek elszámolásra, és pozitív juttatást kapnak menetrend eltérés esetén is. A segítő mérlegkörök valójában csökkentették a rendszer irányt, segítették alacsonyan tartani a

menetrendtől való eltérést az egész hálózatban, így a TSO feléjük addicionális ösztönző juttatást számol el – amelyet pedig az úgynevezett okozók kötelesek megfizetni.

A villamosenergia-piac összetett elszámolási rendszere olyan különleges szereplőket is életre hívott, mint az üres mérlegkörök, ahol $M = \{\}$. Ezen mérlegköröknek – ahogyan bármely más mérlegkörnek is – fogyasztás és termelés nélkül is lehet LE és FEL irányú menetrend eltérése is kereskedelem révén - van mérlegkör felelőse, aki a kereskedelmet lebonyolítja: valamely piacon, például HUPX-en villamosenergiát vásárol, ugyanakkor mivel nem fogyasztja el, ezért menetrend eltérése pozitív lesz, LE szabályozásra van szüksége. Ha a rendszer FEL irányú szabályozást igényel teljes egészében, akkor ezen M mérlegkör a beszerezett villamosenergia ellenére pozitív többletet képes realizálni. Hasonlóan, amennyiben villamosenergiát ad el DA piacon, úgy LE irányú szabályozási igénye jelenik meg, hiánya keletkezik, hiszen az eladott mennyiséget nem termeli meg (nincs termelője). Amennyiben a rendszer irány FEL, úgy szintén pozitív többletet képes realizálni a mérlegkör, illetve a mérlegkör felelős a TSO elszámolás révén. Ezen speciális eset a villamosenergia-szektor összetettségére is kiemelt példa, hiszen látható a rendszer teljes eltéréseinek megfelelő becslése, illetve a gyors piaci reakció jelentős üzleti előnyt jelent a szereplők számára. A piaci percepcióknak kiemelt szerepe van.

Jelen dokumentumban spekulatív szereplőket, illetve spekulatív irányú információs elemeket nem vontam be a modellbe, de a mérlegkörökkel és a mérlegkör felelős viselkedésével kifejezetten szükséges foglalkozni.

Egy mérlegkör felelős elsődleges célja a mérlegkör menetrendjének rendszerirányhoz vett eltéréseinek kezelése központosított szereplőként. Ugyanakkor a mérlegkör felelős kereskedő is, aki képes a piaci árakat alakítani $t = 0$ -ban úgy, hogy a $t = 1$ -beli eltérések kockázatát árazza a naiv fogyasztók és termelők számára. Úgy is értelmezhető, segít abban, hogy a szereplőknek ne kelljen $t = 1$ piaccal foglalkozni. Átvállalja a menetrendezési kockázatot részben vagy egészben, de ezért a villamosenergia vételi és eladási ára már a DA piacon is eltérő lesz. A kettő közötti úgynevezett spread, azaz rés a kereskedő profitja (levonva a kiegyenlítőpiaci költségeket).

Mindezek mentén formálisan is bevezethető K kereskedő a modellbe, aki mérlegkör felelős. Egyetlen mérlegkör létezik jelenleg: $M = \{F, T, \bar{T}\}$. A mérlegkör egyszerűsítéseként feltételezem, nincs menetrendeltérése a teljes mérlegkörnek, azaz ϵ

eltérést a kiegyenlítő termelő kezeli mennyiségi értelemben, ahogyan a korábbi modellekben is.

Legyen adott a naiv modellhez hasonló kiinduló feltételrendszer, a fogyasztóra értelmezve kis torzítással:

4-A. Feltétel. Legyen F fogyasztó fogyasztási függvénye $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Tegyük fel f inverze f^{-1} létezik és függvény, valamint szigorúan monoton csökken. Fogyasztó tényfogyasztása ϵ_B mennyiséggel eltér a DA piaci fogyasztásától, azonban erről a fogyasztónak nincs tudomása.

A többi feltétel helyben hagyható a korábbi modell alapján:

4-B. Feltétel. Legyen T termelő termelési függvénye $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Tegyük fel g inverze g^{-1} létezik és függvény, valamint g szigorúan monoton nő. Termelő ténytermelése nem tér el a DA piaci termelésétől, és erről így is van tudomása.

4-C. Feltétel. Legyen $\bar{T}$ kiegyenlítő termelő termelési függvénye $\bar{g}: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$. Tegyük fel $\bar{g}$ inverze $\bar{g}^{-1}$ létezik és függvény, valamint $\bar{g}$ szigorúan monoton nő. Termelését jelölje w mennyiség $t = 0$ -ban, és jelölje ϵ_B pedig $t = 1$ -ben. Mindezekről $\bar{T}$ -nek tudomása van.

Ekkor K kereskedő viselkedését három tényező szerint kell megragadni, ahogyan $t = 1$ -ben a kereslet és kínálat közé ékelődik harmadik szereplőként:

1. Fogyasztók számára K kereskedő p_S áron értékesít. A fogyasztó tehát ezzel az árra szembesül a DA piacon. Legyen ez a továbbiakban az eladási ár.
2. Termelőktől K kereskedő p_D áron vásárol. A továbbiakban legyen ez a vételi ár (kereskedő szempontjából definiálva)
3. A fogyasztó a feltétel szerint nem foglalkozik $t = 1$ -ben vett ϵ eltéréssel, ezért a kereskedőnek kell, és ő is viseli a menetrend eltérés hatását. Legyen kereskedő F fogyasztó menetrendtől vett eltéréseinek prognosztizált hibája ϵ_K . Ekkor K a már korábban bevezetett $\epsilon_B p_e$ árat fizeti $t = 1$ -et követően, de $t = 0$ -ban csak $\epsilon_K p_e$ költségről van tudomása.
4. Kereskedő profit elvárását jelölje $\pi \in \mathbb{R}_{0+}$. A profitelvárás valójában megtérülési elvárás a kereskedő részéről, de mindenképpen magyarázatot igényel. Három eset lehetséges: (i) profit elvárása nem teljesül negatív irányban. Ekkor feltételezhető, hogy nem éri meg számára a piacon maradni, így a modellben sem tartható a jelenléte. (ii) Profit elvárását meghaladó profitja keletkezik, ekkor azonban létezik

olyan π' profitelvárás, amellyel viszont egyensúlyban kereskedőnek éppen π' profitja keletkezik. (iii) profit elvárása egyenlőségre teljesül, amely pedig az előző eset része.

K kereskedőnek tehát nincs implicit „hasznosságfüggvénye”. Nincs f és g -hez hasonló piaci jelenléte, kizárólag a fenti 4 pont szerint alakítja piaci jelenlétét. Összességében tehát K kereskedő feltétele:

4-D. Feltétel. Legyen K kereskedő $t = 0$ időpontban a fogyasztók felé adott kínálati ára p_S , a termelők felé adott vételi ára p_D , profit elvárása π . Az ϵ_B menetrend eltérést ϵ_K értéként becsüli $t = 1$ -ben p_e áron.

Ekkor az egyensúly egyenlet az alábbi alakra írható fel mennyiségi oldalról:

$$f(p_S^*) = g(p_D^*) + w^*$$

és

$$w^* + \epsilon_B = \bar{g}\left(\frac{w^* \cdot p_D^* + \epsilon_B \cdot p_e}{w^* + \epsilon_B}\right)$$

és

$$f(p_S^*) \cdot p_S^* - g(p_D^*)p_D - w^*p_D - \epsilon_K p_e - \pi > 0$$

Az egyenletrendszer első eleme kimondja: egyensúlyban a fogyasztó kereslete egyenlő a termelő által kínált mennyiség és a kiegyenlítő termelő DA piacra vitt mennyiségével. A második egyenlet a már ismert kiegyenlítő termelő átlagár egyenlete, míg a harmadik egyenlőtlenség interpretációja, hogy a kereskedő által fogyasztóknak eladott mennyiség a p_S kínálati áron ($f(p_S^*) \cdot p_S^*$), mint bevétel legyen annyira pozitív, hogy abból a költségként levont díjak és az elvárt π profit még mindig pozitív legyen. Költségként hivatkozom itt a termelők számára fizetett díjra ($g(p_D^*)p_D$), a kiegyenlítő termelőnek fizetett DA piacra szállított termelésének díjára (w^*p_D), valamint a kiegyenlítő piaci eltérés díjára ($\epsilon_K p_e$). Ezáltal definiáltuk az utolsó egyenlettel a **kereskedő nyereség függvényét**. Megjegyzendő, hogy a későbbi számítások során egyenlőségként kerül hivatkozásra a nyereségfüggvény, noha a numerikus optimalizáció során ennek nem lesz jelentősége, hiszen ott a keresési eljárásban szélsőértékként ragadom meg az egyenletek megoldását.

A kiegyenlített egyensúly egyenlet inverz függvényekkel is felírható, rendre:

$$p_S^* = f^{-1}(q^* + w^*)$$

és

$$\frac{1}{w^*}(w^* + \epsilon_B) \cdot \bar{g}^{-1}(w^* + \epsilon_B) - \frac{\epsilon_B}{w^*} \cdot p_e = p_D^* = g^{-1}(q^*)$$

és

$$f^{-1}(q^* + w^*)(q^* + w^*) - g^{-1}(q^*)q^* - w^*g^{-1}(q^*) - \epsilon_K p_e - \pi = 0$$

A fenti egyenleteket egyszerűsítve és összevonva adódik, hogy:

$$\frac{1}{w^*}(w^* + \epsilon_B) \cdot \bar{g}^{-1}(w^* + \epsilon_B) - \frac{\epsilon_B}{w^*} \cdot p_e = g^{-1}(q^*)$$

$$f^{-1}(q^* + w^*)(q^* + w^*) - g^{-1}(q^*)q^* - w^*g^{-1}(q^*) - \epsilon_K p_e - \pi = 0$$

míg

$$p_S^* = f^{-1}(q^* + w^*)$$

$$p_D^* = g^{-1}(q^*)$$

Profit elvárás K kereskedőnél π pontosan teljesül, így:

$$\begin{aligned} \frac{1}{w^*}(w^* + \epsilon_B) \cdot \bar{g}^{-1}(w^* + \epsilon_B) - \frac{\epsilon_B}{w^*} \cdot p_e - g^{-1}(q^*) &= 0 \\ &= f^{-1}(q^* + w^*)(q^* + w^*) - g^{-1}(q^*)q^* - w^*g^{-1}(q^*) - \epsilon_K p_e - \pi \end{aligned}$$

Ez utóbbi:

$$f^{-1}(q^* + w^*)(q^* + w^*) - g^{-1}(q^*)q^* - w^*g^{-1}(q^*) - \epsilon_K p_e - \pi = 0$$

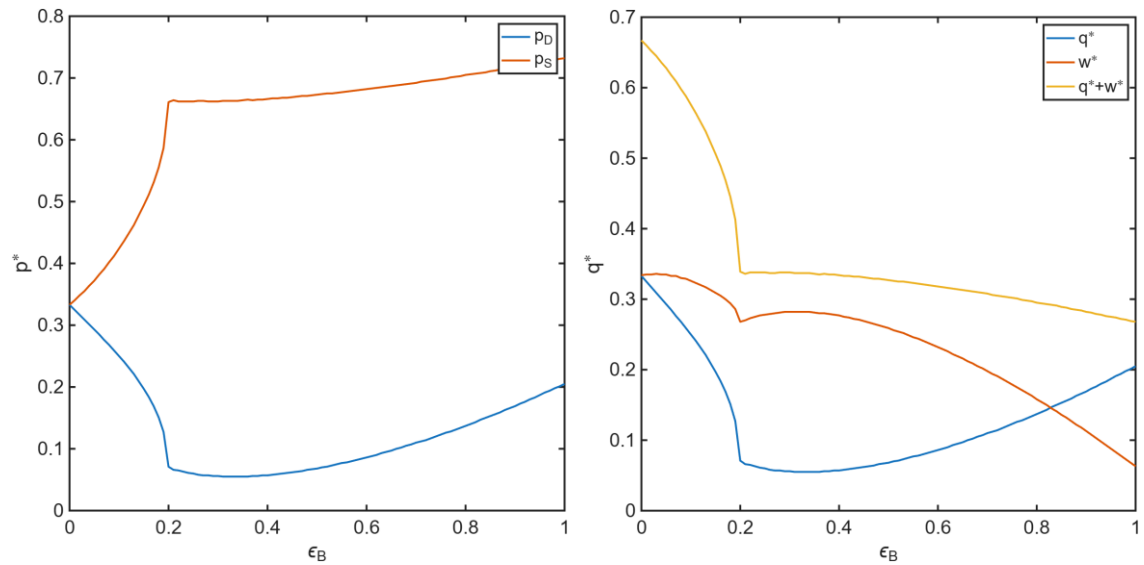
$$f^{-1}(q^* + w^*)(q^* + w^*) - g^{-1}(q^*)(q^* + w^*) - \epsilon_K p_e - \pi = 0$$

$$f^{-1}(q^* + w^*) - g^{-1}(q^*) = \frac{\epsilon_K p_e + \pi}{(q^* + w^*)}$$

A kereskedő nyereségfüggvénye még lineáris inverz függvények esetén is belátható, hogy az összefüggés ϵ_K percepcióra rendezve nem lineáris. Mindez különösen azért releváns, mert a korábbi egyensúly megközelítés a DA piacon alapvetően igyekezett minél egyszerűbb lenni és miközben már a legelső modell során is belátható volt, hogy a fundamentálisan leegyszerűsített villamosenergia-piaci megközelítés is összetett rendszer, így most az látható, hogy a közvetítő megjelenése további interpretációs kihívásokat tartogat az egyszerű, tendenciózus összefüggések levonásához.

Vizsgáljuk meg numerikus optimalizációval a kereskedő viselkedését és árazását egyensúlyban egy olyan egyszerű fogyasztó függvény esetén, mint az $f(p) = 1 - bp$, ahol $b \in \mathbb{R}_+$, $g(p) = p$, $\bar{g}(p) = p$.

Fontos kiemelni, hogy most a kereskedővel kiegészített kiegyenlített egyensúly egyenletben a fogyasztó informáltságát látszólag a kereskedő veszi át, ezáltal intuitív módon az várható, hogy a percepció eltérési modell eredményei köszönnek vissza, illetve ahhoz nagyon közel eső eredmény.



7-5. ábra. Kereskedő válasza a bizonytalanság emelkedésére.

Az egyensúlyi vételi és eladási ár egymástól eltartanak, valamint kereskedett mennyiségek csökkenő tendenciát mutatnak.

$$\pi = 0, p_e = 1, \epsilon_B = \epsilon_K; f(p) = 1 - p; g(p) = p; \bar{g}(p) = p$$

Forrás: saját illusztráció, MATLAB

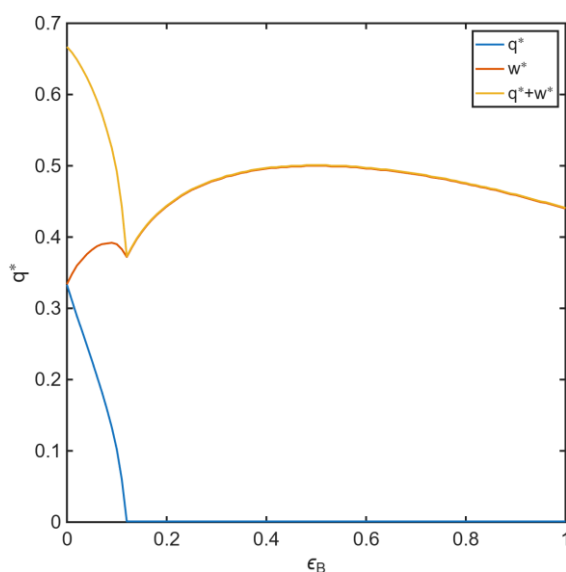
A fenti ábrán azonban nagyon távoli, strukturálisan teljesen eltérő eredmény tér látható a percepció eltérési modellhez képest. Az értelmezéshez vissza kell kanyarodni f értelmezéséhez. A kiegyenlítő termelőnél megmutattam, hogy bár $\bar{g}$ akár egyszerű lineáris függvény is lehet paraméterében, az ár definíció, amely átlagárként jelent meg mégis összetett függvénné teszi az egyensúly egyenletet. Itt is hasonlóan: f -ből ϵ kiemelése és K kereskedőre bízása nem ugyanaz a hatás, még f linearitása esetén sem. Úgy lehet legszemléletesebben interpretálni talán, hogy kereskedő számára ϵ nem hordoz semmilyen hasznosságot. Egy puszta költségelem a maga linearitásával, és teljesen identikus bármely szint mellett – hiszen nem került bevezetésre semmilyen pénzhasznosság rendelkezés (Lelkes, 2003). Ezzel szemben fogyasztó valóban elfogyasztja ϵ eltérést, és kalkulációjában f ezt a fogyasztás hasznosságot hordozza és hat az eredeti piacon keresett q mennyiségre.

Ez a kettősség egészen új megvilágításba helyezi a kereskedő szerepét. Nemcsak egy közbeékelts szereplő, hanem az ϵ menetrend eltérés értékét voltaképpen megváltoztatja. Ezáltal az egész piacon egy torzulást hoz létre még akkor is, ha $\pi = 0$ ahogyan a fenti példában is. Kereskedő lényegi szerepe tehát nem a jutalékrendszerében van, hanem a menetrendezési hiba piaci megjelenését alakítja át, és ez az átalakítás rendkívüli.

A fenti egyensúly alapegyenletei alapján kijelenthető:

4. Állítás. *A fogyasztó a kereskedő megjelenésével elveszíti a tudatosságát, ezt a szerepet kereskedő veszi át, azonban a profit cél önmagában nem adaptív, a fogyasztónál és a kereskedőnél a menetrendezési hiba fundamentálisan másképp jelenik meg. Előbbi hasznosságként, utóbbi lineáris költségelemként.*

Az alábbi ábrán a kereskedői jelenlét még markánsabb torzulást okoz: a differenciálhatósági töréspont a két egyensúlyi piac találkozási pontja $t = 0$ és $t = 1$ -ben, miközben $p_e = 2$ estén amikor nagyon hamar megéri a kiegyenlítő piacra vinni a kereskedett mennyiséget ez a töréspont hamarabb következik be és drámaibb a hatása is.



7-6. ábra. DA piaci egyensúly magas kiegyenlítő piaci árak esetén.

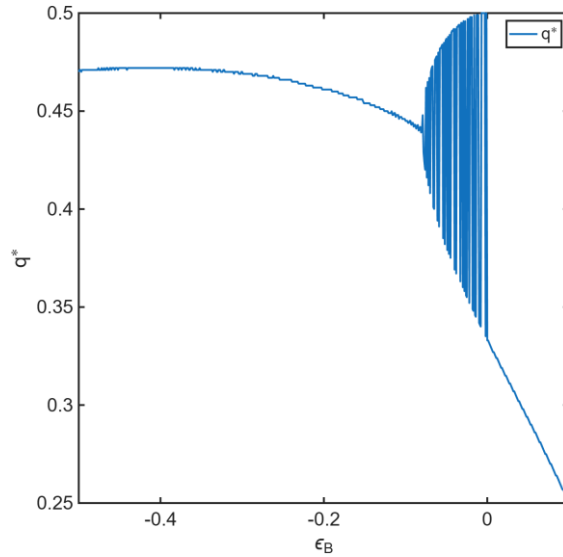
A percepció közvetített, nem adaptált. Nem a hasznosságon keresztül érvényesül, mint korábban, hanem a kereskedő profit függvényén keresztül.

$$\pi = 0, p_e = 2, \epsilon_B = \epsilon_K; f(p) = 1 - p; g(p) = p; \bar{g}(p) = p$$

Forrás: saját illusztráció, MATLAB

Eddig a pontig mindig a FEL irányú szabályozási teret vizsgáltam. Néha kitértem a modell kettősségre, hogy valójában mindvégig kezelhettem volna szimmetrikusan az eredményeket, azonban nem volt teljesen szándék nélküli a LE irány eltakarása, ugyanis a LE irányú szabályozás számos esetben összetettebb tér.

Az alábbi ábrán ugyanezen modell megközelítésénél maradván látható, hogy az egyensúlyi egyenletek megoldása (numerikus közelítése) több szélsőérték pontot is eredményül ad:



7-7. ábra. Választás az egyensúlyi megoldások közül.

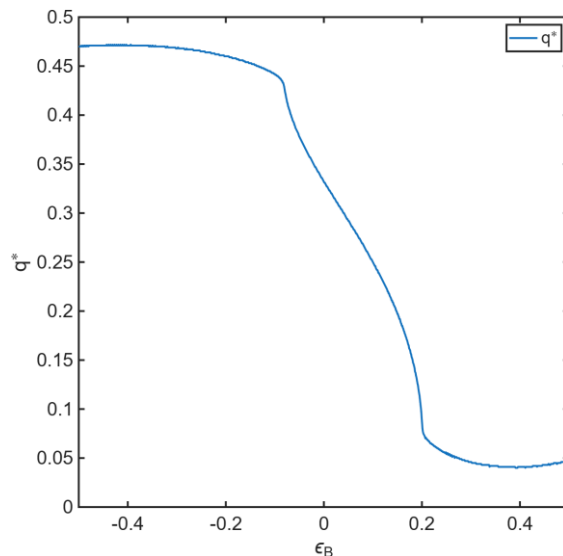
Korábbi paraméterekre LE irányú szabályozás esetén az egyensúlyi egyenletnek több megoldása van (az ábrázolás torzító, csak a terület szélein találhatók megoldások).

A folytonos és két töréspont kivételével differenciálható függvényalakot (lásd következő ábra) választjuk, ami értelmezhető piaci jelenséget teremt a szereplők számára is. Ellenkező esetben (jobbra) tetszőlegesen kis változás a percepciókban is markáns eltérést ad az egyensúlyi mennyiség és így árak kialakulásában.

$$\pi = 0, p_e = 1, \epsilon_B = \epsilon_K; f(p) = 1 - p; g(p) = p; \bar{g}(p) = p$$

Forrás: saját illusztráció, MATLAB

A LE és FEL szabályozási eltérésre együttesen a folytonossági egyensúlyi megoldással az alábbi ábrán látható (nem triviális a két megoldás kiválasztása numerikus értelemben):



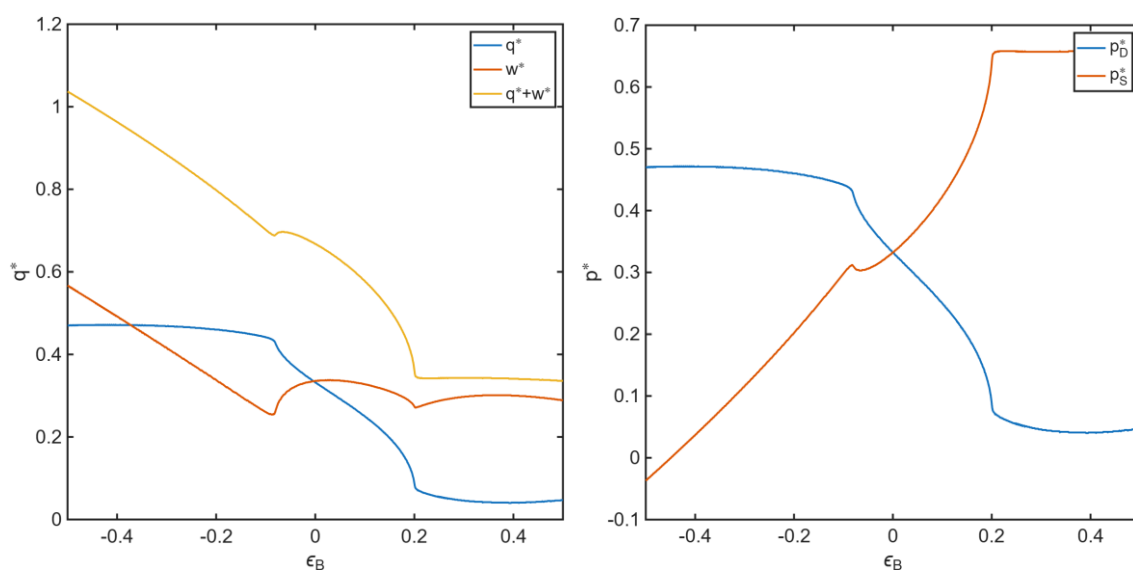
7-8. ábra. DA piaci egyensúlyi mennyiség FEL és LE irányban.

A percepció közvetített, nem adaptált.

$$\pi = 0, p_e = 1, \epsilon_B = \epsilon_K; f(p) = 1 - p; g(p) = p; \bar{g}(p) = p$$

Forrás: saját illusztráció, MATLAB

A kereskedő révén beékelődő kiegyenlítő piac hatása jól látható ahogyan LE és FEL irányban is az egyensúlyi mennyiség töréspontokat hoz létre, amelyek azonban folytonosak.



7-9. ábra. DA piac egyensúlyi árai és mennyiségei FEL és LE irányú kiegyenlítésre.

A percepció közvetített, nem adaptált.

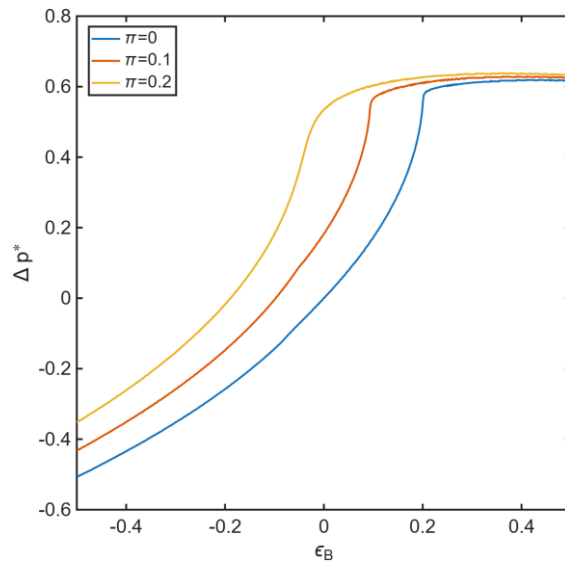
$$\pi = 0, p_e = 1, \epsilon_B = \epsilon_K$$

$$f(p) = 1 - p; g(p) = p; \bar{g}(p) = p$$

Forrás: saját illusztráció, MATLAB

A beékelődő torzulás jól látható a piaci egyensúly minden elemén, az árazási réstől kezdve egészen a DA és kiegyenlítő piacokon át. A kereskedő megjelenése tagadhatatlan, eddig nem prezentált hatásokat indukál.

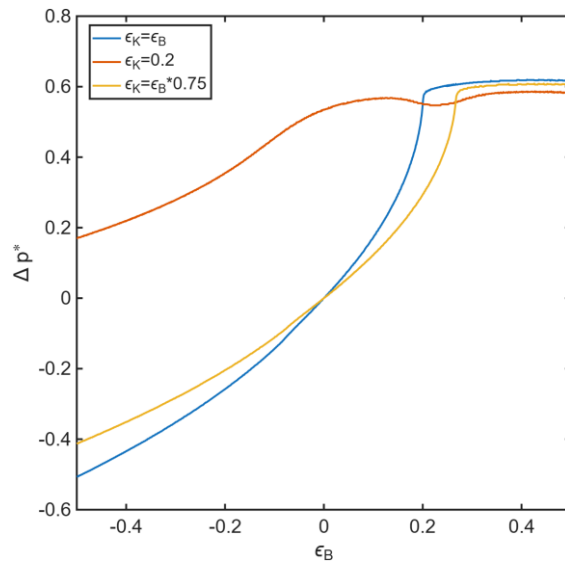
Vizsgálható a kereskedő piaci árrésre vonatkozó hatása, ahogyan változik a π profit elvárása.



7-10. ábra. Kereskedő profit várakozásának hatása a DA egyensúlyi ár ollóra.

$$p_e = 1, \epsilon_B = \epsilon_K; f(p) = 1 - p; g(p) = p; \bar{g}(p) = p$$

Forrás: saját illusztráció, MATLAB



7-11. ábra. Kereskedő percepciójának eltérése a kiegyenlítőpiactól.

A DA piacon az ár olló összetetten változik LE és FEL irányban, ahogy a percepció magasabb/alacsonyabb a kiegyenlítő piachoz képest. Az árazási olló az eltérés irányába változik. $p_e = 1$

$$f(p) = 1 - p; g(p) = p; \bar{g}(p) = p$$

Forrás: saját illusztráció, MATLAB

A kutatásban ismételten hangsúlyoznom kell, hogy a kereskedő szerepvállalása mennyivel másabb jelenséget hordoz a piacon, függetlenül a profit elvárásától, illetve percepcióitól. A numerikus analízis eredményei bármely paraméter együttesre különböző és markánsan különböző piaci egyensúlyra futnak ki, mint a korábbi tudatos, de percepciójában eltérő fogyasztói modell. Mindez a percepció-alapú csoportosítások létjogosultságát is érinti:

5. Állítás. *A pénzhasznosság szerinti optimalizálás nem azonosítható a termék hasznosság alapú optimalizálással.*

6. Állítás. *A kereskedő termék hasznosság helyett pénz hasznosság alapú egyenlettel rendelkezik, ami markánsan eltérő megközelítést jelent a piaci egyensúly szempontjából.*

Az elemzés ezen pontján tovább lépek. A villamosenergia-piac ennél jelentősen komplexebb megközelítést diktál, így a következőkben további elemekkel és modellezési megközelítéssel vizsgálom azt.

7.5 modell - Termelési korlátok

A szűkös erőforrások alapvető elemei a kiterjedt gazdaságelemzési rendszereknek. A szűkösség alakítója a piacoknak, egyben implicit módon már egy egyszerű keresleti függvénynek is a része. Egyéb esetben a hasznossági értelmezés is szétesne.

A korábbi modellek során nem vezettem be praktikus rendszerszintű erőforráskorlátokat. A piaci mechanizmusból voltak közvetetten deriváltak, de feltételeztem, hogy mindig van az az ellentételezés, amely felett megéri még egy egységnyi villamos energiával többet termelni. Két megoldási lehetőség adódik:

1. Torzítással kerül bevezetésre be a szűkösség.
2. Kifejezett korlátként definiált a maximális termelés.

Mindkét megközelítés reális és valós lehet, noha az 1. eset inkább egy matematikai absztrakciónak tűnhet, ahogyan például a termelési függvény transzformálása történik a $h(x) = \beta - 1/x$ leképezéssel, azaz $g'(p) = h \circ g(p) = \beta - 1/g(p)$, ahol $\beta \in \mathbb{R}_+$. Ekkor a termelési kapacitás maximuma éppen β valós szám. A bevezetés elegáns abban az értelemben, hogy a korábbi egyenletekre ráültethető, és az eredményeket rendezés tartó módon adja vissza, hiszen g' szigorúan monoton. Ezáltal a korábbi következtetések érdemben nem változnak, csak arányaiban tolódnak el az egyensúlyi pontok. Belátható, hogy nem történik más, mint a h leképezés valójában a vizsgálati teret transzformálja. Fontos azonban megjegyezni, hogy ez csak és kizárólag azért tehető meg, mert a termelési g függvény egyébként is úgy lett definiálva, hogy implicit tartalmazott valamiféle korlátot a termelésre: ha nem is erős korlátot, de pénzügyi korlátot igen. Minél több terméket kíván a termelő piacra vinni, azt egyre nagyobb marginális költséggel képes csak megtenni. Innen a g szigorúan monoton növekedése, valamint $g(p)$ értelmezésében p egységárat/átlagárat jelent.

A klasszikus megközelítést is szükséges megvizsgálni, amikor egy H korlátot a termelési kapacitás maximumaként értelmezünk. Nem életidegen ez a modellezési aspektus sem, hiszen a villamosenergia-piacon az egyes erőművek úgynevezett csúskapacitással rendelkeznek, amely felett nem képesek több villamos energiát előállítani. A korábbi megközelítéssel szemben ez egy pénztől/ellentételezéstől független felső kapacitáskorlát. Tekintsünk el attól az esettől, amelyben az OPEX megfelelő volumen mellett CAPEX

jellegű beruházássá is konvertálható, azaz megfelelő marginális bevétel mellett már kapacitásbővítő beruházás is eszközölhető.

Legyen tehát $H \in \mathbb{R}$ a $\bar{T}$ termelő kapacitás korlátja, azaz bármely q termelési mennyiség mellett:

$$h(q, H) = \min(q, H)$$

Ekkor a mérlegköri modell kiegyenlítő termelő egyenletei az alábbiak szerint alakulnak p piaci ár és p_e egyensúlytartási ár mellett:

$$h(w^* + \epsilon_B, H) = \bar{g} \left(\frac{h(w^*, H - \epsilon_B) \cdot p^* + h(\epsilon_B, H - w^*) \cdot p_e}{h(w^* + \epsilon_B, H)} \right)$$

A kapacitás korlát bevezetése érinti a kereskedő egyenleteit is az alábbiak szerint:

$$f^{-1}(q^* + h(w^*, H - \epsilon_B)) - g^{-1}(q^*) = \frac{\epsilon_K p_e + \pi}{(q^* + h(w^*, H - \epsilon_B))}$$

valamint

$$f(p_S^*) = g(p_D^*) + h(w^*, H - \epsilon_B)$$

Az egyenletekből kifejezhető h függvény külön esetekre bontással, azonban numerikusan értelemben mivel a folytonosság nem sérül, ezért a korábbi kutatási módszerrel megoldható az új egyensúly rendszer is.

Kapacitás korlátot tehát a kiegyenlítő piacon, és a DA piacon is bevezethető. Ugyanakkor ezen piacok a gyakorlatban nem ilyen módon limitáltak. Most 1 termelő és 1 kiegyenlítő termelő létezik, azonban ezek piaci szereplők összességét reprezentálják, összetett kínálati függvényként. Valóban, az empiria is erre enged következtetni: a DA piac kínálata nem egy-egy kiemelt szereplő jelenlétét reprezentálja, hanem amint egy szereplő határköltség függvénye kapacitás korlátba ütközik, ott belép egy új termelő. A g függvény a valóságban lépcsős, nem folytonos, de praktikus határa nincs, hiszen a villamosenergia rendszer beruházásai a várható fogyasztáshoz igazodnak, illetve a fogyasztás hálózati szempontból éppen ezek mentén limitált.

A fenti modell szerinti kapacitás bevezetése ezek mentén inkább egy gyakorlat, mint valódi piaci modellezés, ami a következtetéseinket teljesen új megvilágításba helyezné.

Van egy olyan aspektus ugyanakkor, ami relevánsan jelenik meg a villamosenergia-hálózatban: ez különböző feszültség szintek lokális korlátjai, azaz a KIF és KÖF

csatlakozó vezetékek maximális kapacitása. A félreértést azonban itt jellemzően az okozza, hogy az elszámolási rétegben történik egy-egy kapacitás korlát bevezetése, miközben a fizikai korlátok már beállítottak és jelen lévőek. A lokális korlátok bármely elszámolási modellben is vannak, éppen így rendezettek, nem írhatók felül. A fogyasztó és termelők kínálatában megjelenhetnek lokális korlátok, de ettől nem változik meg a döntési területük, hiszen az már a korlát meglétekor kialakult. Praktikusan, ha egy családi ház villamosenergia-hálózata nem „bírná el” egy villamos alapú hőszivattyú addicionális fogyasztását, akkor ez a DA piacon sem jelenik meg addicionális keresletként, és a fogyasztói profilban sem adaptálódik. A kapacitáskorlát feloldása hozza el a villamosenergia-piacon a kereslet bővülését. A kereslet csak azután jelenik meg, miután az lehetővé vált.

7. Állítás. *A kapacitáskorlátok figyelembevétele már a fogyasztási/termelési függvények leírásánál implicit módon megtörténik, modellszintű kezelésük csak kiemelt esetben indokolt.*

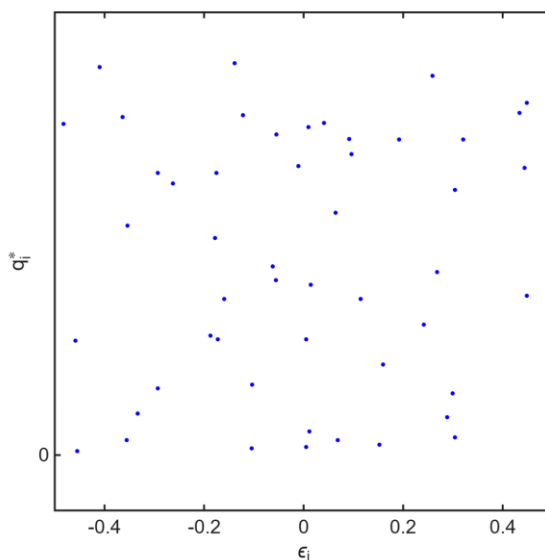
Hasonlóan a termelés esetében is, a DSO-i szabályzat szerint csak akkor vihető be egy új termelő a hálózatba, ha ott a kapacitáskorlát ezt megengedi. Tehát a termelés oldalán sem fogunk látni érdemi korlátot, és a fogyasztás/termelés villamosenergia-szempontról szimmetrikussága miatt az egyensúly éppen úgy jön létre, hogy az nem terminál kapacitáskorlátba. Mindez a későbbi vizsgálatainkban fontos szemléletet hordoz: a villamos energia elszámolásnak nem kell a kapacitás korlátokat feltétlen figyelembe venni, kivéve, ha ad-hoc kiesést, meghibásodásokat, karbantartási eseményeket szeretnénk vizsgálni.

7.6 modell – Követő tanulás

A megelőző fejezetek az egyensúlyi modellek széles terét definiálták, miközben a numerikus szimulációk eredményei rendre azt mutatták, hogy az egyensúly alakításában talán legmarkánsabban a fogyasztó(k) menetrend eltéréseinek percepciója játszik kulcsfontosságú szerepet. A bevezetett ϵ menetrend eltérést úgy került rögzítésre, hogy ϵ éppen az a mennyiség, amellyel fogyasztó többet fogyaszt végül $t = 1$ időpontban a $t = 0$ -kor kinyilatkoztatotthoz képest.

A fogyasztó percepciója a modellek során eltért a tényektől, hibázhatott, illetve bemutattam annak a torzulását is, amikor a kereskedő veszi át a menetrend eltérés becslését. Jelen megközelítésben másképpen járok el. Azt vizsgálom, hogy a fogyasztó menetrendjének becslésekor képes-e más fogyasztóktól tanulni, illetve maga a tanulás/megfigyelés milyen folyamatokat indukál a piacon. A tanulási folyamathoz egy követési eljárást vezetünk be.

Definiálja most F_i az i . fogyasztót az N véges számú fogyasztó között. Tegyük fel, hogy minden F_i egy q_i^* egyensúlyi fogyasztással és ϵ_i menetrendeltérési percepcióval rendelkezik. Ekkor a fogyasztók kétdimenziós térbe rendezhetők q és ϵ mentén, ahogyan azt a 7-12. ábra mutatja egy véletlenszerű $N = 50$, azaz 50 fogyasztót tartalmazó térben.



7-12. ábra. Véletlen kezdeti egyensúlyi mennyiség és percepció.

50 fogyasztó, különböző fogyasztási függvénnyel.

A pontok kiindulása egyenletes eloszlással választott a $(q_i^*, \epsilon_i) \in (0,1) \times (-0.5, +0.5)$ intervallumból

$f(p)=1-p$;

Forrás: saját illusztráció, MATLAB

A tanulás során legyen $d: (\mathbb{R} \times \mathbb{R}) \times (\mathbb{R} \times \mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ távolságfüggvény folytonos leképezés, valamint $\alpha \in [0,1]$ tetszőleges paraméter. Ekkor a tanulást a következő eljárás szerint definiálom:

- 1> Minden i -re:
- 2> $\vec{d}(i) = d([q_i, \epsilon_i], [q_j, \epsilon_j]) \rightarrow \argmin_j$
- 3> $\epsilon'_i := \alpha(\epsilon_{\vec{d}(i)} - \epsilon_i) + \epsilon_i$
- 4> $q'_i := \alpha(q_{\vec{d}(i)} - q_i) + q_i$

A tanulás során tehát az eljárás megkeresi minden F_i fogyasztóra a hozzá legközelebb eső másik F_j fogyasztót a d távolságfüggvény alapján, majd ezen j fogyasztó felé egy α távolság arányos lépést tesz. Ezen lépés is definiálható új d -hez hasonló leképezéssel, de az egyszerűség kedvéért egyszerű lineáris közelítést alkalmazok mindkét dimenzió mentén. Legyen a továbbiakban ez a közelítő lépés kifejezése, hogy az F_i fogyasztó követi F_j -t, jelöléssel: $F_i \rightarrow F_j$.

A rendkívül egyszerű követési modell lehetővé teszi, hogy a fogyasztók egymáshoz egyre közelebb kerüljenek, amely úgy interpretálható, hogy a szereplők saját és hozzájuk közel eső, hasonló fogyasztók percepcióját keverik, ezáltal módosítva a sajátjukat. Ezáltal a közösség egésze egyre közelebb kerül egymáshoz, mint egyfajta kollektív tudat.

Fontos látni ugyanakkor az egyszerű megközelítés hiányosságait is:

Szükséges definiálni az időt. A fenti pseudokód egy iterációs lépést ír le. De hány iteráció szükséges? Mit jelent 1 iteráció? Eddigiek során $t = 0$ és $t = 1$ időpillanatok voltak, amelyek határozott jelentést kaptak: $t = 0$ az előzetes és szándékolt villamosenergia-fogyasztás/termelés kinyilatkoztatásának pillanata, amikor a szereplők az árakról/mennyiségekről egyeztetnek, egyensúlyt formálnak, $t = 1$ pedig a szállítási időpont amikor a fizikai termék gazdát cserél. A korábbi megfogalmazásban tehát $t = 1$ -ben lehet eltérés a $t = 0$ -ban megegyezettektől, de ezt a piac szereplői utólag elszámolják. Éppen ezért a gyakorlathoz hasonlóan a $t = 0$ időpont DA piacként azonosítható, a $t = 1$ pedig kiegyenlítő piacként. Legyen most t a $[0,1]$ zárt intervallumon belüli valós szám. Ekkor $t \in [0,1]$ idő folytonos, ugyanakkor a korábbi definíciókkal is konzisztens: $t = 0$ továbbra is a DA piacnak feleltethető meg, $t \in (0,1)$ az ID, azaz az Intraday piacnak, a napon belüli kereskedés piacát reprezentálja, míg $t = 1$ továbbra is a kiegyenlítő piacot. Az Intraday piac a DA piachoz hasonlóan az egyeztetések tere, ahol a gyakorlathoz

hasonlóan ugyanazon szállítási időpillanatra ($t = 1$ -re) módosíthatók a percepciók, úgy egyensúlyi ár/mennyiség alakulhat ki. A t időfogalom tehát folytonos, konzisztens az eddig bevezetett definícióinkkal. Ugyanakkor a pszeudokód értelmezéséhez az időt diszkrét egységekké szükséges tenni: legyen az iterációk száma $M \in \mathbb{N}$, és egy iteráció hossza így $1/(M + 1)$. Az idő tehát az alábbiak szerint telik a leírt világban:

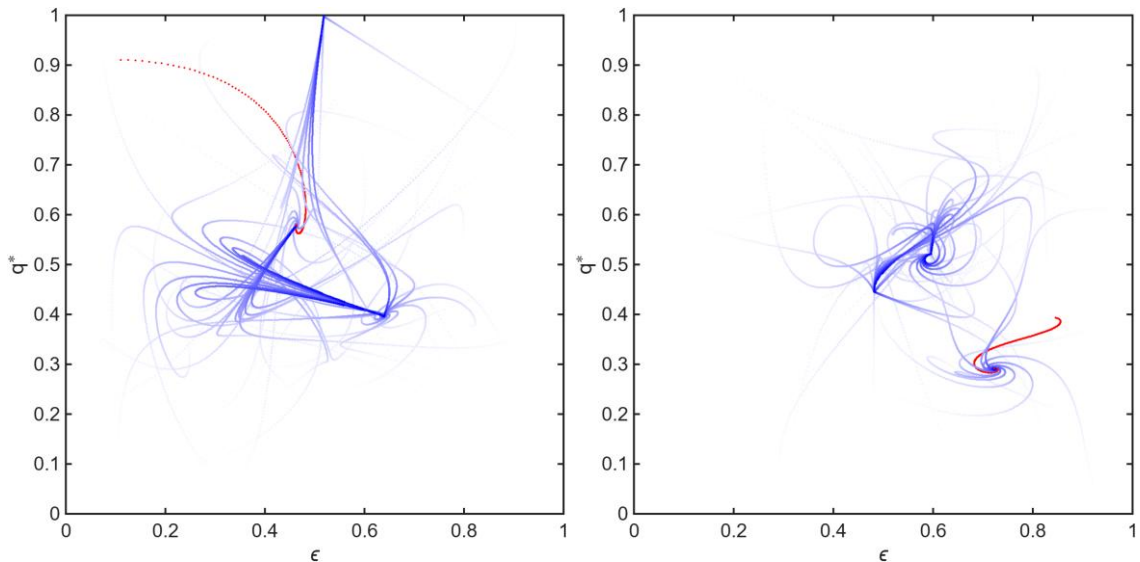
$$t_0 = 0 \text{ (DA piac)}$$

$$t_1 = \frac{1}{M+1}, t_2 = \frac{2}{M+1}, t_3 = \frac{3}{M+1}, \dots, t_M = \frac{M}{M+1} \text{ (ID piac)}$$

$$t_{M+1} = \frac{M+1}{M+1} = 1 \text{ (Kiegyenlítő piac)}$$

További implicit hiányossága a modellnek, amelyet eddig látens módon jelent meg, hogy a fogyasztóink valójában nem tudják önkényesen megváltoztatni saját q^* , azaz egyensúlyi mennyiségi fogyasztásukat. Van ráhatásuk, de valójában egy piaci mechanizmus eredménye annak alakulása. Mindezt a következő fejezetben részletesen célzom. Most egy pillanatra ettől eltekintek, és a létrehozott követési rendszer dinamikai tulajdonságaira összpontosítok.

A követési modellben legyen $M = 200$, azaz 200 iteráción át vizsgálom meg 50 fogyasztó követési rendszerét. Ennek eredményét szemlélteti a **7-13. ábra**.



7-13. ábra. Konvergencia véletlen követési mátrixra.

50 fogyasztó, különböző fogyasztási függvénnyel. 2 különböző futtatás eredménye. Pirossal jelöltem egy kiválasztott pont útját.

d euklideszi távolságfüggvény, de még nem történik egyensúly számítás

Forrás: saját illusztráció, MATLAB

A követés dinamikája több, rendkívül fontos tulajdonságot hordoz, miközben ki kell emelni, hogy d bármely i paraméter együttesre egy véletlenszerű, de a teljes időszakon állandó j -t választ. A véletlenszerű követésre az tapasztaljuk:

- Bármely véletlen dinamikai rendszer összeesik néhány pontba: A követésből fakadóan legalább felére, követési láncok kialakulásakor pedig annak tört részére. Két fogyasztó egymás követésével szükségszerűen egy pontba zuhan össze, illetve a korábbi $\alpha \in [0,1]$ mértéket változtatva ennek sebessége változtatható. Magasabb, $\alpha \rightarrow 1$ körüli értékekre gyorsabban, $\alpha \rightarrow 0$ körüli értékekre lassabban. $\alpha = 0$ -ra a pontok statikusak, $\alpha = 1$ -re a követés abszolút nagyságú, azaz a percepciók és mennyiségek nem adaptív tanuláson mennek át, hanem kicserélődnek.
- Amennyiben a fogyasztók láncba szerveződnek, például $F_4 \rightarrow F_{10} \rightarrow F_2$, úgy bármely $\alpha \in (0,1]$ -re a pontok szükségképpen F_2 paramétereiben terminálnak, hiszen F_2 nem mozdul, és a többiek távolsága hozzá közelít minden iterációban.
- Amennyiben a követési lánc zárttá tehető, azaz $F_i \rightarrow F_j \rightarrow F_k \rightarrow \dots \rightarrow F_i$, és ez a csoport minden követőjét tartalmazza, úgy vagy egyetlen pontba esnek össze a szereplők, vagy pulzálnak, vagy stabil pályán mozognak. Az egy pontba összeesés valószínűsége magas, hiszen pontosan az történik, hogy $\alpha > 0$ hatására a pontok közötti együttes távolság csökken, ahogyan mindenhol csökken a távolság. Nagyon nehéz úgy megválasztani α paramétert, hogy a távolságok éppen helyben maradjanak, illetve, hogy a dinamikai rendszer bővüljön. Ennek oka a két dimenziós tér sajátosságában van, azaz, bármely három pont, amely egymást követi, azaz például $F_i \rightarrow F_j \rightarrow F_k$, úgy F_i és F_j között, F_j és F_k között szükségszerűen csökken a távolság $\alpha > 0$ miatt, de az i, j -hez képest ugyanazon, vagy alacsonyabb sebességgel haladó F_k bármely elmozdulására a $\overrightarrow{F_j - F_i}$ vektor iránytól szükségképpen F_i és F_k közötti távolság is csökken minden iterációval.
- Mivel α , azaz a lépésköz multiplikátorként jelenik meg a dinamikai rendszerben, ezért a rendszer az iterációk során csökkenő sebességű tendenciát mutat, ahogy a pontok a térben konvertálódnak egymáshoz.

Összességében tehát a dinamikai struktúra adott és definiált, a tanulás azon tulajdonságát hordozza, hogy valószínűségi értelemben konvergens, képes csoport kialakításra, ezáltal a percepciók közelítése és az egyensúly kialakítása ebben a keretben vizsgálhatóvá válik.

Ezt fogom megtenni a következő fejezetben, de már megoldva azt a hiányosságot, hogy a fogyasztók szabadon választhatják meg q^* fogyasztásukat.

8 Numerikus szimuláció

A megelőző értekezés során néhány reprezentatív szereplő viselkedését, döntési terét, információit és korlátait vettem górcső alá. Ezek alapján a villamosenergia-piac különböző archetípusait kívántam megragadni, amelyek szerepe markánsan eltér.

Bevezettem a fogyasztót, aki egy adott mennyiségű villamosenergiát meghatározott áron fogyasztana, azonban az árak rögzítését követően végső fogyasztása ettől a kinyilvánított mennyiségtől eltérhet. Mindez úgy értelmezhető, hogy menetrendeltérése van. Formálisan F fogyasztó q mennyiséget fogyasztana p áron, ahol q és p közötti összefüggést az $q = f(p)$ függvény írja le. Ezen q -tól rögzített ár mellett is később eltér ϵ mértékben. Különböző vizsgálatokat végeztem, mi történik, ha fogyasztó erről a tévedéséről/menetrend eltéréséről nem tud, tud, de nem pontosak az ismeretei, és ha pontosan tudja eltérését, azaz hibáját.

Kiemelt szereplő volt a termelő, aki egy adott mennyiségű villamosenergiát meghatározott áron adna el. Feltételeztem végig minden modellben, hogy később sem változik ez a mennyiség, azaz nincs menetrendeltérés, nem hibázik. Formálisan T termelő p áron $g(p)$ mennyiséget termelne, ahol g folytonos, monoton növekvő leképezés. A termelő menetrendeltérését azért nem volt tárgya a vizsgálatnak, mert a piac szempontjából visszavezettük ezt az esetet arra, amikor a fogyasztó menetrendje tér el. Végig a vizsgálatok során irányokat kívántam megragadni a piaci mechanizmusok megértésére, nem törődve a mennyiségi mértékegységekkel, vagy az egyensúly pontos, abszolút értelemben vett helyével.

Bevezettem a kiegyenlítő termelőt is, aki a fogyasztó hibáját, menetrendtől vett eltérését kezeli úgy, hogy a termelésének egy részét a fogyasztónak ígéri, de kapacitásainak másik részét fenntartja a fogyasztó eltérésének kezelésére a későbbiekre. Formálisan $\bar{T}$ kiegyenlítő termelő w termelést biztosít F fogyasztó számára p áron, és ϵ termelést később az eltérésére p_e áron. Bármely átlagár mellett úgy érveltem, hogy g folytonos, monoton növekvő függvény írja le a kiegyenlítő termelő kínálatát.

A modell rendelkezett az idő dimenzióról is, mégpedig akként, hogy az idő folytonos, 0 és 1 között telik. 0 és 1 között a piaci szereplők egyeztetnek egymással, áraznak és meghatározzák az 1 időpontbeli döntéseiket. Az 1 időpillanatban a szereplők ténylegesen fogyasztanak, eltérhetnek korábbi megállapodásuktól, azonban ezen eltérést is rendezik

egymás között. Formálisan $t \in [0,1]$ az idő változónk, $t = 0$ a másnapi piac (DA piac), $t \in (0,1)$ a napon belüli piac (ID piac), illetve $t = 1$ a kiegyenlítő piac.

A fentiekén kívül a vizsgálat tárgya volt egy további szereplő piac torzító hatása, a kereskedő is. Feltételeztem, hogy a kereskedő az, aki a fogyasztó menetrendezési hibájának következményeit viseli, ennek ellentételezésére a fogyasztó számára magasabb eladási árat határoz meg, mint amennyiért ugyanazt a mennyiséget a piacról megtudja venni. Formálisan K kereskedő π profit elvárás mellett p_s áron értékesít q mennyiséget fogyasztónak és p_D áron vesz a termelőktől q mennyiséget, valamint a fogyasztó menetrendezési hibájáért p_e egységárat fizet.

A piac leírásához két megközelítést követtem: minden esetben formális igényesség és pontosság mellett az egyensúly meghatározásakor analitikusan jártam el mindaddig, amíg az összefüggésrendszer erre teret adott, majd numerikus analitikai módszerekkel kerestem az összetett rendszer megoldását.

Összesen hat formális modellt vizsgáltam:

1. Naiv fogyasztó: nem tud a menetrend eltéréséről, de annak kiléte sem ismert számára
2. Tudatos fogyasztó: tökéletesen ismeri a saját menetrendjének eltérését
3. Percepció eltérés: a fogyasztó tudja, hogy lesz menetrend eltérése, de hibázik annak becslésében
4. Mérlegkör: kereskedő, mérlegkör felelős megjelenése
5. Termelési korlátok: a termelésnek van kapacitásmaximuma
6. Követő tanulás: fogyasztók egymástól tanulják saját menetrendezési percepciójukat

Ezen modellek közül a következőkben a 3. és 6. megközelítéseket viszem tovább elsősorban, de a többi rendszer eredményeit is felhasználom.

A megközelítés annyiban változik, hogy bár építkez az előző eredményekre, a számítási módszerben szimulációt alkalmazok: a szereplők döntési terét egymástól függetlenül implementálok, így akár több száz szereplő együttes viselkedése is leírható hosszabb idősoron.

8.1 Független szereplők

Jelen fejezetben a korábbi követő tanulási modellben már leírt több fogyasztót vezetek be és vizsgálók. A korábbi levezetésekben ezt azért nem tettem meg, mert ha a független szereplők nincsenek egymásra hatással, azaz például bármely két fogyasztó interakciója nem áll fent, úgy csak a keresleti függvényük adódik össze. Ennek hatására azonban egy olyan új keresleti függvénnyel rendelkező összetett szereplő definiálható, aki tömöríti a fogyasztók mindegyikének döntését. A piaci mechanizmus pusztán attól nem változik meg, ha több fogyasztónak van.

Hasonlóan, a több független, egymással nem interaktáló termelő és/vagy kiegyenlítő termelő szintén helyettesíthető egy összetett termelő és kiegyenlítő termelővel, ezáltal a fogyasztók/termelők redukálhatók 1-1 szereplővé. A 6. Követő tanulási modell volt az első, ahol a fogyasztók indexelésének szerepe lett. A szereplők a saját eltérési percepciójukat a környezetükben lévő szereplők múltbéli eltérésével súlyozták, és a keresletüket ezek alapján határozzák meg. Addig azonban amíg a 6. modellben az egyensúlyi fogyasztás egy egzakt választott mennyiség volt, most ez kerül helyettesítésre a tényleges egyensúlyi fogyasztással minden szereplőnél.

Egy pillanatra a formalizmushoz térek vissza és alkalmazom a 3. modell tudatos, de hibázó fogyasztóit a 6. követési modellre: jelölje az i . fogyasztót F_i , saját fogyasztási függvényét $q_i = f_i(p)$ bármely p -re, valamint ϵ_i a menetrend eltérésének saját percepcióját, amely vagy helyes, vagy nem $t = 1$ -ben. Definiáljuk f függvényt az alábbiak szerint:

$$f(p) = \sum_{i=1}^N f_i(p)$$

Mivel minden f_i fogyasztási függvénynek már a legelső modellnél is feltételként szerepelt, létezik inverze, ezért ennek az összetett f függvénynek is létezik:

$$f^{-1}(\hat{q})$$

ahol $\hat{q}$ a piac összes fogyasztójának együttes kinyilvánított fogyasztása, percepciókat is beleértve. Mivel a tudatos fogyasztóink $\sum \epsilon_i$ percepcióval is kalkulálnak összességében, ezért a piac többi szereplőjének szempontjából:

$$f^{-1}(\hat{q}) = f^{-1}\left(\sum_{i=1}^N (q_i + \epsilon_i)\right)$$

Ugyanakkor jelölje a percepciók nélküli teljes fogyasztást q , így

$$f^{-1}(\hat{q}) = f^{-1}\left(q + \sum_{i=1}^N \epsilon_i\right)$$

A 3. modell kiegyenlített egyensúly egyenletét minden i -re felírva:

$$p^* = f_i^{-1}(q_i^* + \epsilon_i) = g^{-1}\left(\left(\sum_{i=1}^N q_i^*\right) + w^*\right) = \frac{1}{w^*}(w^* + \epsilon_B) \cdot \bar{g}^{-1}(w^* + \epsilon_B) - \frac{\epsilon_B}{w^*} \cdot p_e$$

Vagy ami ugyanaz

$$p^* = f^{-1}(q^* + \sum_{i=1}^N \epsilon_i) = g^{-1}(q^* + w^*) = \frac{1}{w^*}(w^* + \epsilon_B) \cdot \bar{g}^{-1}(w^* + \epsilon_B) - \frac{\epsilon_B}{w^*} \cdot p_e$$

Ez az egyensúly egyenlet a piac szempontjából már alkalmas arra, hogy az egyéni percepciókat és egyéni keresleti függvények változásával is piaci egyensúlyt számoljon, miközben az egyensúlyból az egyéni fogyasztási mennyiségek visszakaphatók.

Példa. Legyen $f_i(p) = b_i - a_i p$ minden i -re, ahol $b_i, a_i \in \mathbb{R}_+$. Ekkor

$$f(p) = \sum f_i(p) = \hat{q} = \sum b_i - \sum a_i p$$

valamint az inverz függvény:

$$p = f^{-1}(\hat{q}) = \frac{(\sum b_i) - \hat{q}}{\sum a_i}$$

Ebből pedig minden egyensúlyi mennyiség és egyensúlyi árra visszaszámítható az egyéni egyensúlyi q_i^* :

$$q_i^* = f_i(p^*) - \epsilon_i = b_i - a_i p^* - \epsilon_i$$

Q.E.D.

A tanulási algoritmus legyen a már megismert 6. követési modell szerinti, ugyanakkor a következő változtatással:

1> $t = 0$ -tól $t = 1 - 1/(M + 1)$ -ig, $1/(M + 1)$ lépésben:

2> Minden i -re:

3> $\vec{d}(i) = d([q_i, \epsilon_i], [q_j, \epsilon_j]) \rightarrow \argmin_j$

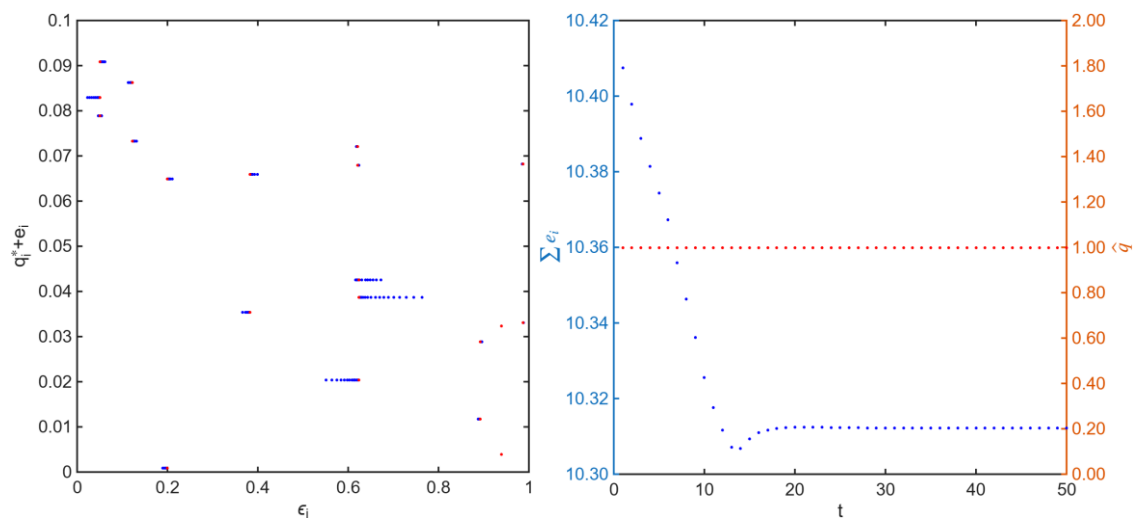
$$4> \quad \epsilon_i^{t+1} := \alpha(\epsilon_{d(i)}^t - \epsilon_i^t) + \epsilon_i^t$$

5> Minden i -re:

$$6> \quad q_i^{t+1} := \text{egyensúly szerinti } q_i^* \text{ a } \epsilon^{t+1} \text{ figyelembevételével}$$

Vagyis a fenti pszeudokód szerint csak és kizárólag a percepciók adaptálódnak a fogyasztók között, de maguk az egyensúlyi fogyasztások a percepciók kiszámítása után egyben kerülnek rendezésre a piac többi szereplőjével. Fontos megjegyezni, hogy az egyensúly kialakulásának csak és kizárólag $\sum \epsilon_i$ aggregátumnak van jelentősége a piac szempontjából. Tehát ha egy követési algoritmus mellett a $\sum \epsilon_i$, az aggregált menetrendezési eltérés vélelme nem változik, akkor az egyensúlyi aggregált mennyiség sem fog.

Legyen a vizsgálatban d euklideszi távolság függvény. Ekkor az egyéni egyensúlyi fogyasztás az alábbiak szerint alakul $M = 50$ iterációt követően:



8-1. ábra. Lineáris fogyasztási függvények melletti konvergencia.
20 fogyasztó, különböző fogyasztási függvénnyel.
Forrás: saját illusztráció, MATLAB

Az 50 iteráció során a 20 fogyasztó 8 csoporttá alakul, akik egyensúlyi aggregált fogyasztása konvergens. A 8 csoport tagjainak percepciója egymáshoz idomul, azaz a jövőbeli eltérésükről ugyanazt gondolják. Az eredmény több szempont szerinti is rendkívül fontos:

- Sikerült megmutatni egy példa iteráción keresztül, hogy létezik a teljes piac szempontjából konvergens csoportosulás, amelyre egyszerre létezik egyensúlyi percepció és egyensúlyi fogyasztási mennyiség.

- Az aggregált egyensúlyi fogyasztási mennyiség a teljes iteráció alatt sem változik, és az egyensúlyi ár sem, vagyis a csoportosulás invariáns a többi szereplőre nézve.
- A csoport-tagok egymáshoz tartanak, és noha az egyensúlyi fogyasztásuk nem változik, kialakulnak olyan stabil párosítások, amelyek együtt kezelhetők: a menetrendtől vett eltérési percepciójuk megegyezik.
- Ezen csoportokra alkotható olyan aggregált fogyasztási függvény, amely a piac szempontjából tökéletesen reprezentálja őket, ugyanakkor a saját fogyasztási függvényük szerinti hasznossággal értékeli a menetrendezési hibájukat.

Kijelenthető:

8. Állítás. *A szimuláció segítségével megmutattam, hogy egy véletlenszerű fogyasztói halmazban létezik olyan konvergens csoportosítási eljárás, amely konstruktív, és amellyel a csoport szereplői kereskedő közbeiktatása nélkül együttesen képesek megjelenni, és fogyasztói többletet elérni.*

Az iterációt 100 esetre ismételt meg, a csoportosulások számossága 4 és 9 között változott, de az eredmények és az abból levonható következtetések identikusak.

A kutatás tartalmában az energiapiaci szereplők csoportosulási lehetőségeit és vizsgálatát tűztem ki célul a menetrend eltérési percepcióik alapján, de a csoportokra nem mint energiaközösségek hivatkoztam. Ennek kettős oka van. Most először foglalkozom kiterjedtebben több elkülönült fogyasztóval. Korábban legfeljebb önkényes energiaközösségi fogalmakat lehetett volna definiálni, de ez messze nem cél. Sőt, éppen a mostani eredményekig akartam elérni lépésenként: létezhet-e olyan csoportosulási rendszer, amely előremutató egy pusztán kereskedelmi konstrukcióhoz képest. Az energiaközösségeket valójában most, ezek alapján érdemes definiálni: nevezzük azon fogyasztók együttesét a jelen modell keretben energiaközösségnek, amelyek bár különböző fogyasztási függvénnyel rendelkeznek, a menetrendtől vett percepciójuk hasonló, sőt megegyezik. Ezáltal a piac többi szereplője felé egységesen tudnak fellépni és megegyezni, de saját belső értékelésükben a percepció adta hasznosságot megtudják osztani saját hasznosságuk szerint. Mindez egy rendkívül szép konstrukció, amely túlmutat azon, hogy az energiaközösségek a többi piaci szereplő rovására kötelező, szabályozói konstrukcióként jönnek létre.

Mielőtt azonban messzemenő következtetéseket kerülnének levonásra egy egyszerű (bár a maga nemében komplex) lineáris fogyasztási függvényeket tartalmazó szimulációról,

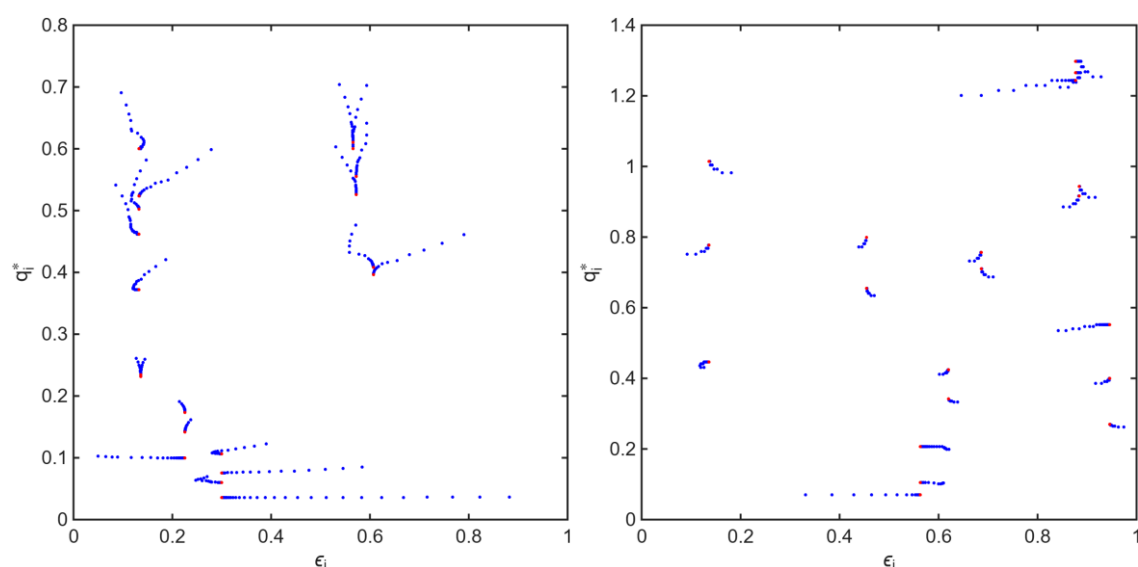
joggal merülhet fel a kérdés, vajon hasonlóan alakulnak-e az egyensúlyi és emergencia feltételei, ha az f függvényeink alakja megváltozik. Legyen tehát:

$$f_i(p) = \frac{a_i}{p} + b_i$$

$$f(p) = \sum f_i(p) = \hat{q} = \frac{\sum a_i}{p} + \sum b_i$$

$$f^{-1}(\hat{q}) = \left(\frac{\sum a_i}{\hat{q} - \sum b_i} \right)$$

Az eredményeket két példa iterációra az alábbiakban szemléltetjük:



8-2. ábra. Konvergencia a fogyasztás-percepció szerint legközelebb eső szereplőhöz
20 fogyasztó, különböző fogyasztási függvénnyel.
Forrás: saját illusztráció, MATLAB

A csoportok kialakulása és a konvergencia feltételei láthatóan ugyanúgy rendelkezésre állnak: a fogyasztók nagyobb utat járnak be az egyensúlyi megoldás megtalálásáig, valamint az egyensúlyi aggregált fogyasztási mennyiség is hiperbolikus f függvényalakra konvergens.

A konvergencia nem triviális jelenség:

- Addig, amíg a 6. számú modellben az egyes szereplők egyensúlyi fogyasztása követett és változtatható volt, addig most a piac egészére nézve egyensúlyi pontként számított. Előfordulhatna az összetett egyensúlyrendszerben oszcilláció, illetve teljesen véletlenszerű mozgás is.

- A d euklideszi távolság függvény, amely a követési sorrendet definiálja folyamatos változást képes előidézni, abban, hogy mely csoportok közelítenek és melyek távolodnak.
- Sem $\sum \epsilon_i$, sem pedig $\hat{q}$ konvergálása nem egyértelmű és nem következik egyenesen a feltételrendszerből.

9. Állítás. *A szimuláció segítségével igazolható, hogy különböző fogyasztási függvényformák esetén is a piac egésze szempontjából konvergens csoportosulások képesek létrejönni a megalkotott konstruktív eljárással, amely csoportok tagjai együtt tudnak megjelenni a piac egésze felé.*

A vizsgálat során még számos iterációt és paraméter együttest teszteltem, de a következtetések α követési sebesség, b_i és a_i függvényparaméterek, valamint ϵ_B kiegyenlítő termelői paraméter mellett is robusztusok maradtak.

A d függvény újradefiniálására is hasonló jelenség figyelhető meg. Legyen most

$$d([q_i, \epsilon_i], [q_j, \epsilon_j]) = f_i^{-1}(q_j + \epsilon_j) - f_i(q_i + \epsilon_i)$$

valamint:

1> $t = 0$ -tól $t = 1 - 1/(M + 1)$ -ig, $1/(M + 1)$ lépésben:

2> Minden i -re:

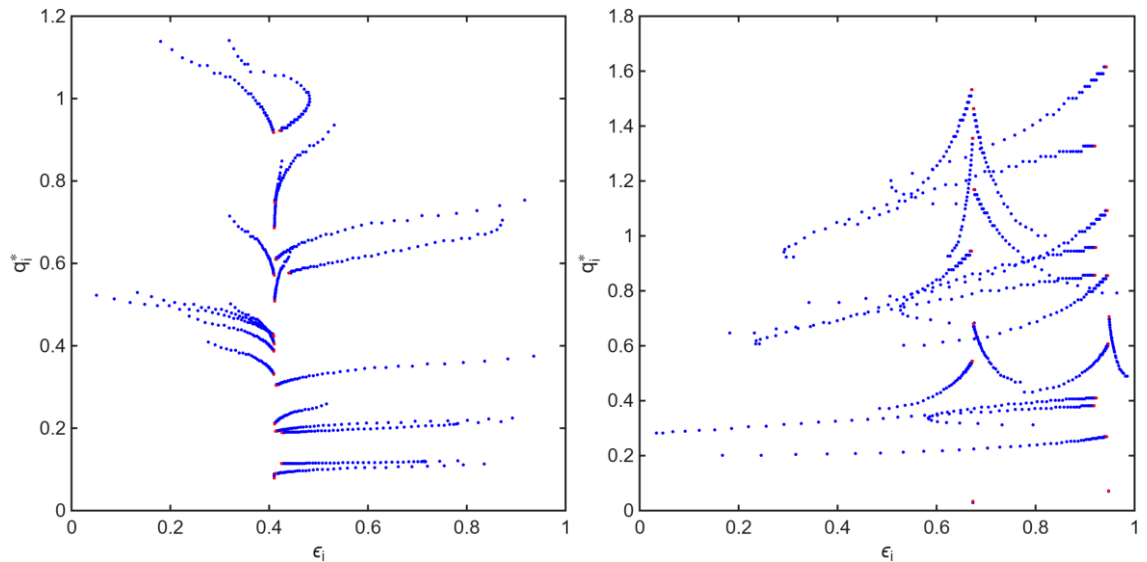
3> $\vec{d}(i) = d([q_i, \epsilon_i], [q_j, \epsilon_j]) \rightarrow \operatorname{argmax}_j$

4> $\epsilon_i^{t+1} := \alpha(\epsilon_{\vec{d}(i)}^t - \epsilon_i^t) + \epsilon_i^t$

5> Minden i -re:

6> $q_i^{t+1} :=$ egyensúly szerinti q_i^* a ϵ^{t+1} figyelembevételével

Ennek hatására minden fogyasztó azt a másik szereplőt kezdi el követni és menetrend eltérését adaptálni, akinek a fogyasztását és percepcióját leginkább elfogadná: adott piaci ár mellett az $f_i^{-1}(q_j + \epsilon_j)$ maximuma éppen a maximális fogyasztói többlet fogyasztott mennyiség egységenként.



8-3. ábra. Konvergencia a fogyasztás-percepció szerinti legjobb szereplőhöz.
 20 fogyasztó, különböző fogyasztási függvényekkel, két különböző futtatás eredménye.
 $\epsilon_B = 0.5$

Forrás: saját illusztráció, MATLAB

A fenti ábra két szemléletes iterációt mutat, ahol a konvergencia annyira erős, hogy a fogyasztók mindössze 1 illetve 2 csoportba rendeződnek.

A létrehozott követési eljárás alapvető sajátossága tehát a konvergencia, amelyet a piaci mechanizmus nem felborít, hanem segít és a két egyensúly felé törekvő rendszer közös pontba terminál. A megmaradó csoportosítással redukálható a piaci szereplők száma, vagy ami ugyanaz, az egyes tagok saját információik és gazdasági hasznaik szerint közösen tudnak fellépni az összes többi szereplő felé.

Ezzel megmutattam, hogy a fogyasztói csoportosulások, amelyeket energiaközösségeként definiáltunk valóban megalapozott létjogosultsággal rendelkeznek a modellezett villamosenergia-piaci rendszerben. A következőkben ezen megközelítés és szimuláció mentén újabb egy lépést teszek a valós folyamatok felé: a tényleges menetrend eltérés eddig fix ϵ_B értéke helyett bevezetem, hogy ϵ_B sztochasztikus folyamat.

8.2 RQ1: Piaci szereplők csoportosítása

A megelőző fejezetekben az energiapiaci szereplők csoportosulását azok együttműködéséből, érderendszeréből és a villamosenergia alapvető szabályozási tulajdonságaiból levezetve szimulációs eszközrendszer segítségével értékeltem. Jelen fejezetben azt vizsgálom, hogy a leírt, piaci mechanizmusból következő kialakulása a fogyasztói csoportoknak mennyire stabil, ha maga a rendszerszintű kiegyenlítetlenség nem az: egy valószínűségi változó, pontosabban az idő előrehaladtával sztochasztikus folyamatként leírt.

Egyszerűsítést kell tenni a vizsgálatban. Ahhoz, hogy egészen pontosan megragadható legyen a valóság, szükséges lenne bevezetni az idő fogalmom kiterjesztését. Mindaddig úgy érveltem, hogy adott 1 és csak 1 szállítási időpont, és előtte a fogyasztók, kereskedők, termelők kinyilvánítják preferenciáikat, rezervációs áraikat, és ezek mentén egy egyensúlyi modellként írtam le a villamosenergia-piac működését. Ebben a szállítási időpontban lévő menetrendezési hiba nem képes sztochasztikus folyamat lenni, mert egyetlen időpillanatban létező eltérésként értelmezhető csak. Ahhoz, hogy kiterjesztésként vizsgálhassuk a menetrendezési hibát, szükséges lenne bevezetni különböző szállítási időpillanatokat, amelyeket mind-mind megelőz akár átfedő módon ezekre az időpontokra vonatkozó egyensúlyi piacok, piaci mechanizmusok.

Mégsem eszerint járok el. Az új bevezetés túlzóan összetetté tenné a modellezést, miközben a cél továbbra sem a pontos mennyiségek, árak leírása. Azt kell látni és vizsgálni, hogy az egyes döntések és informáltsági szintek hogyan járulnak hozzá a piaci jelenségek kialakulásához: csoportosuláshoz, egyensúly stabilitáshoz. Ugyanakkor a különböző szállítási időpontok bevezetése ugyanazon kereslet/termelési függvények mellett ugyanazokat a piaci egyensúlyokat hozná csak létre. Ezek változatlansága mellett tehát egyetlen szállítási időpontra esedékes megelőző DA és ID piaci folyamatokkal leképezhető egy olyan időszak, amelyben a tényleges menetrend eltérés folyamatosan változik. Identikus, hogy az ID piac egy adott szeletének érzékelése változik meg, és adaptálódik a percepciója, vagy ID piacok sorozatának, ha a mögöttes kereslet/kínálati függvények nem változnak.

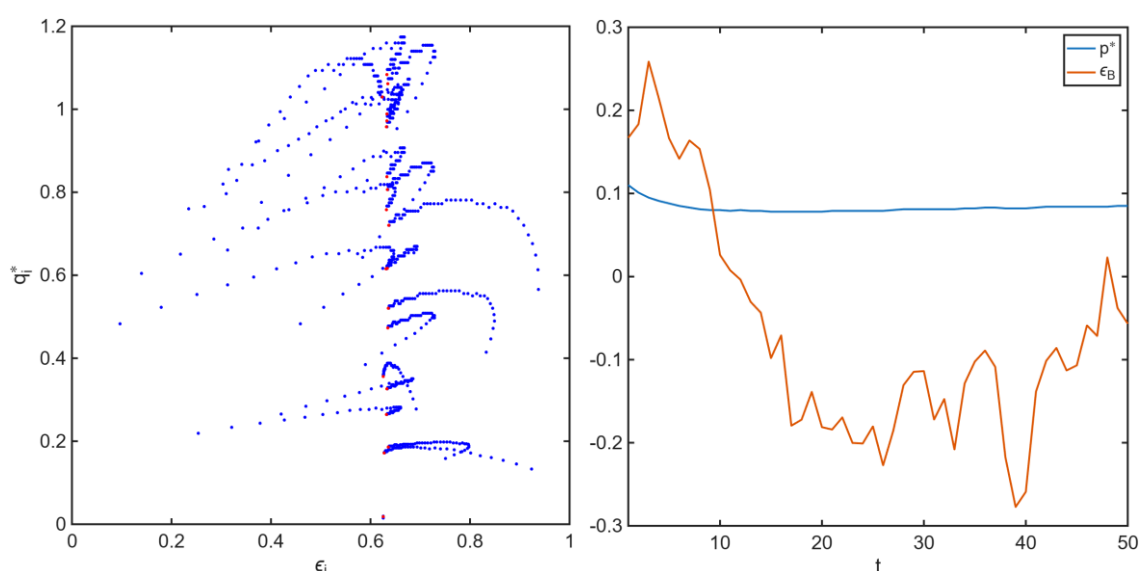
Legyen tehát a korábbi jelölésrendszerünkkel: $\epsilon_B^t \sim \text{Wiener folyamat}$, azaz

$$\epsilon_B^0 = 0, \epsilon_B^t - \epsilon_B^s \sim \mathcal{N}(0, t - s)$$

Vagyis minden időpillanatban a menetrendezési hiba egy normális eloszlású véletlen valószínűségi változó mértékével tolódik el. Jelenleg kevésbé érdekes a mértékegység nélküli térben a szórás volumene, de nem szükséges megkövetelni semmi olyan feltételes valószínűségi eloszlást sem, amely a valóságban esetleg tapasztalható. A vizsgálat szempontjából a menetrendezési hiba változási képességének van csak és kizárólag relevanciája.

Az előző fejezetben definiált követési és szereplő modell adaptálható hiperbolikus fogyasztási függvények esetére: legyen most ϵ_B a fentiek szerint definiált sztochasztikus folyamat:

$$f_i(p) = \frac{a_i}{p} + b_i$$



8-4. ábra. Konvergencia időben sztochasztikus kiegyenlítő percepcióra
20 fogyasztó, különböző fogyasztási függvényekkel.
Forrás: saját illusztráció, MATLAB

20 fős fogyasztói térben 300 véletlen szimulált futtatást végezve 50 iteráción keresztül véletlenszerű $a_i, b_i \in (0, 1)$ paraméterekre, $f_i(p) = a_i/p + b_i$ alakú függvényre: A korábban tapasztalt egyensúlyi ár kialakulása a tényleges menetrend eltérés változására közel invariáns. **Az egyensúlyi ár szórás és a menetrend változás szórás hányadosának mediánja 0,0173.** Az látható, hogy a konvergencia az egyensúlyi árak és a percepciók vonatkozásában akkor is fenntartható, ha a tényleges menetrend eltérés változik. A kiegyenlítő piaci termelő folyamatosan adaptálja a termelését a két piac között. A fogyasztók egyensúlyi válaszfüggvénye elsősorban követésre optimalizál,

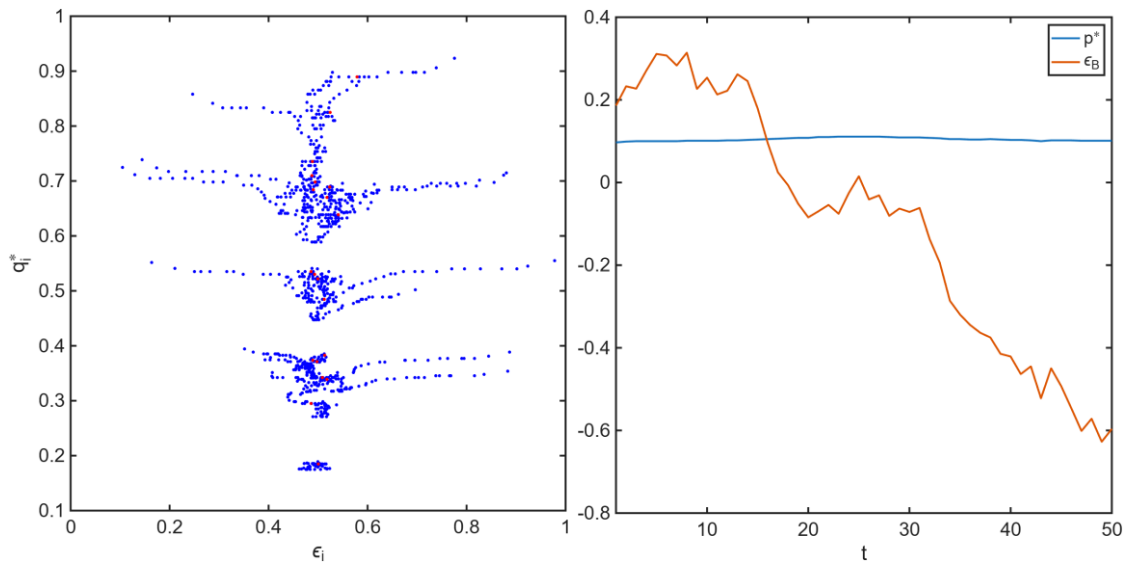
vagyis a percepciók egységesítésére, amely erősebb piaci stabilitás formáló, mint a menetrend eltérés változása.

10. Állítás. *Ha az egyes szereplők a percepciójában közelítenek egymáshoz, az a kialakuló piaci egyensúlyt stabilizálásában egy erősebb tényező, mint az a tény, hogy a percepciójuk tévedése folyamatosan változik.*

Az egyensúlyi árak instabilitását vizsgálata releváns abban az esetben is, amikor a fogyasztók a saját percepcióikat ugyan egymáshoz adaptálják, de véletlenszerűen elmozdítják minden iterációban, azaz:

$$4> \quad \epsilon_i^{t+1} := \alpha(\epsilon_{d(i)}^t - \epsilon_i^t) + \epsilon_i^t + (u_t \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2))$$

minden lépésben a korábbi pszeudokódban.



8-5. ábra. Sztochasztikus konvergencia válasz sztochasztikus percepcióra.
20 fogyasztó, különböző fogyasztási függvényvel.
Forrás: saját illusztráció, MATLAB

Ebben a példa futtatásban tehát a percepció is sztochasztikus folyamat minden fogyasztóra, azonban a véletlenszerű mozgás az egyensúlyi mennyiségek mentén stabil egyensúlyi árakat eredményez, miközben a tény menetrendezés eltérés folyamatos, de véletlenszerű módon csökken.

A szimulációt megismételve 20 fogyasztóra, a korábbiakhoz hasonlóan 300 véletlen futtatásra, 50 iterációban az eredmények robusztusok: **Az egyensúlyi ár szórás és a menetrend változás szórás hányadosának mediánja 0,0083. Stabilitást tapasztalunk a teljes piac szintjén.**

Meg kell azonban jegyezni ezen a ponton, hogy a szimulációnknak egy fontos korlátja a 3. formális modell adaptálása. Jelenleg a leginkább zárt modell a kereskedővel kombinált piaci vizsgálat volt, ott azonban a kereskedő a fogyasztókat naiv-vá tette, azaz a teljes menetrendezési percepció kérdéskört átvállalta a fogyasztóktól. Ahhoz, hogy vizsgálni lehessen a fogyasztói viselkedést és tanulást ezt fel kellett oldani. Egy másik lehetséges modellezési megközelítés lehetne, ha több kereskedő kerül bevezetésre a modellbe, azonban ezen kereskedők nem rendelkeznek a fogyasztókhoz hasonló hasznosság függvénnyel.

A több száz szimulációs futtatás eredményeinek értékelését szakértői konzultációkkal egészítettem ki. A modellben feltárt összefüggéseket megvitattam az Energiaközösségek Szövetségének vezetőségével, valamint az MTVSZ energiaközösségeket bemutató konferenciáján tartott saját előadásomat (Jegyzetek: Pocsarovszky K., 2023. december 7.) követő szakmai egyeztetéseken. A konzultációk során azt vizsgáltam, hogy a modellezett mechanizmusok mennyiben kapcsolódnak az energiaközösségek gyakorlati céljaihoz és működési szempontjaihoz.

Fontos visszacsatolást jelentett, hogy a megkérdezett szakértők az energiaközösségek egyik céljaként emelték ki a menetrendi eltérésekről alkotott várakozások közös információs alapra helyezését. Ez összhangban áll a modell azon megközelítésével, amelyben a szereplők kiegyenlítési percepciói és azok egymáshoz igazodása szerepet kapnak a csoportosulásban. A szakértői visszajelzések e mechanizmus gyakorlati relevanciáját támasztják alá, de önmagukban nem igazolják a szimulált csoportképződés tényleges megvalósulását vagy a közös fellépés tagonkénti gazdasági előnyét.

A menetrendi eltérések közös kezelésének gyakorlati jelentőségére utal az is, hogy a bejegyzett energiaközösségek 72%-a energiatároló beszerzését tervezi vagy már megvalósította azt a menetrendi eltérések központosított kezelésére. Ez a működés lehetőséget teremt arra, hogy a közösség egy központi szereplőre bízsa a várható menetrendi eltérés becslését, és az így kialakított várakozást közös információként ossza meg a tagokkal. Amennyiben a tagok ezt saját döntéseikben is figyelembe veszik, a központosított kezelés a kiegyenlítési percepciók egymáshoz igazodását is elősegítheti.

8.3 RQ2: Támogatások hatása

Az energiaközösségek piaci helyének kialakításában az állami elsősorban pénzügyi ösztönzőket vezet be. Ezek célja, hogy maguk a szereplők találják meg azt az utat, amely fenntartható együttműködések hoz létre, azonban a bevezetéshez szükséges pénzügyi forrásokat támogatás formájában kiegészíti.

Ezen támogatások két fő csoportra oszthatók:

- CAPEX jellegű támogatások: beruházásösztönzők. Elsősorban olyan megoldásokat hív életre, amelyek lokális termelési kapacitást, egyedi, belső elszámolásra alkalmas szoftvermegoldások kifejlesztését, mérési rendszerek bevezetését támogatják. Ezek egyösszegű támogatások, amelyek révén a villamosenergia-beszerzések költségei csökkenthetők, de nem ez a fő céljuk. Sokkal inkább annak a feltétel rendszernek a megteremtése, amelyben egy adott közösség a létrehozásához szükséges technológiai feltételeket képes megteremteni.
- OPEX jellegű támogatások: közvetlen villamosenergia-piaci díj engedmény. OPEX támogatásra egyelőre néhány kezdeti javaslat került csak megfogalmazásra, nincs aktív hazai példa. Leggyakrabban a rendszerhasználati díj (RHD) elengedése jelenik meg az energiaközösségek számára potenciális célként, ezáltal ár ösztönzőként épül be a közösség tagjainak fogyasztásába a díj engedmény.

A felépített modellrendszer alkalmas mindkét támogatás hatásának vizsgálatára. A CAPEX támogatást beruházásként, kapacitásbővítésként vezethető be. Ugyanakkor a korábbi érvelésben ezt az irányt annyiban vettem el, hogy a piacra nincs közvetlen hatással ez a bővítés, mert nem is érzékeli a kapacitáskorlátot a fogyasztás és termelés érdemben a rövid távú döntéseiben. Azért, hogy a megközelítésben mégis vizsgálni lehessen a CAPEX jellegű dotációk megjelenését, úgy szükséges interpretálni, mint amely mentén egy fogyasztó képes/hajlandó bármely piaci ár mellett konstans nagyobb mennyiséget fogyasztani, azaz:

$$\hat{f}(p) = f(p) + C_A$$

Ahol $C_A \in \mathbb{R}_+$ a CAPEX támogatás fogyasztást kiegészítő volumene. Hasonlóan, az OPEX díj engedmény úgy definiálható jelen keretben, mint amely mellett a fogyasztó

ugyanazon ár mellett arányosan nagyobb fogyasztási volument hajlandó keresni a piacon, azaz:

$$\hat{f}(p) = C_B f(p) + C_A$$

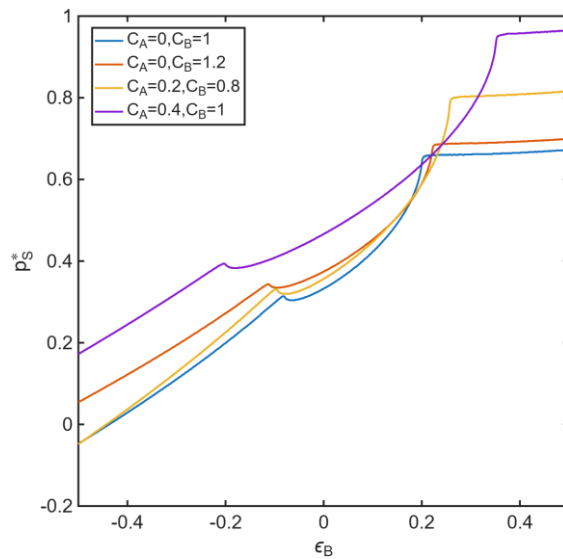
Legyen most a keresleti függvény az alábbi alakú:

$$f(p) = 1 - bp$$

$$\hat{f}(p) = q = C_B - bC_B p + C_A$$

$$\hat{f}^{-1}(q) = p = (C_B + C_A - q)/(bC_B)$$

Vizsgálat tárgyát képezze most a támogatások hatása egy kereskedelmi modellben, ahol a mérlegköri megközelítés alapján 1 fogyasztó, 1 termelő, 1 kiegyenlítő termelő és 1 kereskedő található. A kínálati ár vonatkozásában a szimuláció futtatásakor az alábbi egyensúlyi állapot adódik eredményül:



8-6. ábra. OPEX és CAPEX jellegű támogatás hatása az egyensúlyi kínálati árra.
Forrás: saját illusztráció, MATLAB

A szimuláció eredmény alapján megállapítható: a menetrendezési eltérések széles tere olyan, amely mellett a fogyasztók végül magasabb árat fizetnek, mint aktív CAPEX és OPEX támogatás nélkül. A CAPEX támogatás határozottan olyan piaci folyamatokat indít el, amely mellett ugyanazon menetrendezési eltéréssel a fogyasztók végül magasabb beszerzési árat fizetnek. Hasonlóan az OPEX támogatás pozitív hatása gyorsan szerte foszlik a menetrendezési hiba extrém FEL vagy LE irányú értékei esetén.

A beruházás élénkítése és villamosenergia-díj támogatása önmagában a szimulációnk alapján gyorsan beépül a piaci folyamatokba, ezért egy ennyire likvid, buborékmentesen árazó egyensúlyi esetén a támogatások hatása nagyon hamar képes a negatív torzulást hozni, és éppen visszájára fordulni.

11. Állítás. *Pénzügyi ösztönzők révén elért addicionális villamosenergia-fogyasztás a menetrendezési hiba függvényében drágulást, a piaci árak emelkedését képes okozni. Önmagában az RHD beavatkozás, de a CAPEX jellegű beruházás ösztönző sem minden esetben segítség a villamosenergia-piac szereplőinek.*

Itt kell kiemelni, hogy önmagában az RHD, azaz a rendszerhasználati díj a hálózat összesített fenntartási, üzemeltetési és amortizációs költségeinek egységsúlyú villamosenergia-felhasználásra leosztott díja. Ha néhány szereplő ennek megfizetése alól mentesül, akkor az összes többi szereplőre ró nagyobb terhet.

A szimulált környezetből látható, az állami támogatás nagyon röviden képes fenntartani a hatását, így körültekintően alkalmazandó a kapacitás bővítéssel nemcsak a termelést, de a fogyasztás addicionális bővítését, valamint fordítva, a fogyasztási lehetőségek bővítésével a termelési kapacitást is bővíteni szükséges. Ennek egy példája lehet a HMKE programok mellé gázkazán hőszivattyúra történő cseréjét támogató program. Kizárólag a termelés, vagy kizárólag a fogyasztás támogatása piac torzulást idéz elő, és a piac egy adott szereplőjénél végül többletköltségként csapódik le.

Az eredmények gyakorlati értelmezését az NFFKÜ Zrt. szakértőivel folytatott konzultációval egészítettem ki az ÉMI-MA-21 támogatási konstrukció kapcsán. A megbeszélés során a konstrukció megvalósításának tapasztalatait és az energiaközösségek működésének elindítását nehezítő tényezőket tekintettük át. A szakértők megerősítették az RHD-kedvezmények iránti piaci igényt, ugyanakkor kiemelték, hogy a beruházások ösztönzése önmagában nem biztosítja az energiaközösségek eredményes működését. Ehhez a résztvevők kezdeményező szerepére, együttműködésére és a közös piaci fellépés megszervezésére is szükség van.

A szakértői visszacsatolás összhangban áll a kutatás azon megközelítésével, hogy a pénzügyi ösztönzők hatása nem ítéhető meg kizárólag a nyújtott támogatás alapján: a szereplők döntéseit és a piaci működés feltételeit is figyelembe kell venni. A konzultáció a vizsgált probléma gyakorlati jelentőségét és a támogatások önmagukban vett értékelésének korlátait támasztotta alá.

8.4 RQ3: Célfüggvény rendszer vizsgálata

A kutatásom kezdetén azzal az előfeltételezéssel éltem, mint a villamosenergia-szektor egy jelentős része: Az energiaközösségek nem mások, mint a mérlegkörökhöz hasonló rendeződése a szereplőknek. A mérlegkörök éppen úgy tagokat tömörítenek, ahogyan az energiaközösséget ideális felépíteni, illetve ahogyan azt a jogalkotó definiálta. Hasonló képességekkel is ruházta fel őket, ezért úgy tűnik, mintha még szabályozási szempontból is kétszer lenne ugyanaz a fogalom definiálva: az energiaközösségek csak külön címkézett almérlegkörök. Néhány különleges jogosultságot kaptak ugyan, de érdemben semmivel nem többet, és nem kevesebbet, mint amit egy almérlegkör, vagy amelyet kiegészített kereskedelmi jogok alapján egy mérlegkör elérne.

Ugyanakkor éppen a szimulációs megközelítés világított rá: a döntési mechanizmus, a célfüggvényrendszer az, ami markánsan eltér, és ami már nem jogszabályi definíció. Nem is lehet az. Egyetlen szuverén szereplő számára sem adható olyan keret, amely magát a döntési mechanizmusát határozza meg. A kutatás alapján kijelenthető:

12. Állítás. *Az energiaközösségek definiálhatók az előző modellek alapján jól körvonalmazott, szükséges és endogén módon kibontható szereplőkként is, amelyek nincsenek átfedésben korábban már létező entitásokkal: A célfüggvényrendszere nem egyezik meg egyik másik korábban definiált szereplő célfüggvényével sem. Jelenléte segíti a piaci egyensúly stabilitásának kialakulását.*

Az energiaközösség érdekrendszerbeli különbségei az alábbiak szerint foglalható össze:

- Kereskedő vs. energiaközösség: A kereskedő nem ugyanúgy viselkedik, mint az energiaközösség. A fogyasztó és termelő hasznossága szerint optimalizál, a kereskedő pénzben. A pénzügyi optimalizáció lokálisan kis környezetben (pénzhasznosságtól eltekintve) lineáris. Ezzel szemben kis kivételtől eltekintve a termelők és fogyasztók viselkedése valójában sosem lineáris. A termelés határkölsége folyamatosan nő. A fogyasztás határhaszna folyamatosan csökken. $f(p) \cdot p$ és $g(p) \cdot p$ nem lineáris p -ben.
- Kiegyenlítő termelő vs. energiaközösség: információs aszimmetriaként írható le az a jelenség, amelyet a szakirodalom portfólióhatásként ismer. Ennek ellenére egy energiaközösség a saját profiljának és szabályozási képességének ismeretében képes lehet csökkenteni a saját kiegyenlítetlenségét, saját menetrendezési eltéréseinek becslési hibáját a kiegyenlítő termelőnél hatékonyabban. Az

energiaközösség ugyanakkor sosem létezhet ugyanazzal a célrendszerrel, mint egy kiegyenlítő termelő. A fogyasztás addicionális figyelembevétele fogyasztói többletet képes létrehozni a kiegyenlítő szereplő önmagában vett piaci jelenlétéhez képest.

- DSO vs. Energiaközösség: Az elosztó látszólag passzív szereplője a villamosenergia-piacnak, ugyanakkor a hálózati hiba része az elosztó menetrendezési eltérése is, valamint likviditási kérdés DSO számára a kereskedőkkel történő elszámolás miatt a menetrendezés: a negyedórás mérés hiányában az elszámolás időben eltérhet a tényektől. Amennyiben egy energiaközösség képes a saját menetrend eltérését csökkenteni, hibáját hatékonyabban becsülni, úgy az elosztó számára is csökkenthető a likviditási rés, valamint a hálózat egésze számára a hálózati veszteség.

A szimulációs vizsgálat mentén valóban látható, hogy az energiaközösségek nem a többi, meglévő piaci szereplő döntési teréből hasít ki egy szeletet, ezáltal magához ragadva azok többleteit. Az energiaközösség valóban létrehozhat olyan új értéket a teljes piac számára, amely nem okoz érdek-torzulást mások számára, de saját tagjainak pozícióját segíti.

Az eredmények gyakorlati értelmezését az MVM Partner kereskedői szakértőivel, valamint a MEKSZ képviselőivel folytatott konzultációkkal egészítettem ki. A visszajelzések szerint az energiaközösségek szabályozása még nem kellően kiforrott ahhoz, hogy azok a mérlegkörök szerepét és a hozzájuk kapcsolódó jogosultságokat, illetve kötelezettségeket átvegyék. A szakértők ezért az energiaközösségek és a mérlegkörök szerepének, felelősségének és működési kereteinek egyértelmű elhatárolását szorgalmazták.

A konzultációk során külön hangsúlyt kapott a szabályozási kivételek körültekintő kialakítása. A szakértők kockázatként azonosították, ha az energiaközösségi működés lehetőséget teremtene a kereskedőkkel szemben támasztott tőke- és letéti követelmények megkerülésére. Értékelésük szerint egy jelentős taglétszámú és energiaforgalmú közösség megfelelő pénzügyi biztosítékok nélkül olyan elszámolási és kiegyenlítési kitettséget halmozhatna fel, amelynek következményei a közösségen túl a villamosenergia-rendszer működésének biztonságát is érinthetnék.

A szakértői visszacsatolás megerősítette az RQ3-ban vizsgált elhatárolás gyakorlati jelentőségét. A konzultációk elsősorban a szabályozási és felelősségi különbségekre

mutattak rá, míg a modellben a tagok egyéni érdekeiből levezetett csoportcélfüggvény és a mérlegkört szervező kereskedő célfüggvényének viszonyát vizsgáltam. A két megközelítés egymást kiegészítve indokolja az energiaközösségek és a mérlegkörök megkülönböztetését, ugyanakkor a szakértői vélemények önmagukban nem bizonyítják a célfüggvények matematikai eltérését.

9 Konklúzió

A kutatás célja annak feltárása volt, hogy a villamosenergia-piaci szereplők saját menetrendi eltéréseikről alkotott percepciói hogyan alakítják a szállítást megelőző döntéseiket, és e percepciók mentén milyen csoportosulások alakulhatnak ki. A vizsgálatot nem egy előzetesen meghatározott energiaközösség működéséből indítottam ki. A szereplők egyéni döntéseiből és a piac összefüggéseiből kerestem olyan együttműködési lehetőségeket, amelyek gazdasági alapot adhatnak a közös piaci fellépéshez.

Ehhez saját, egymásra épülő egyensúlyi modellekből álló modellrendszerrel dolgoztam ki. A kereslet, a kínálat és a piaci egyensúly alapösszefüggéseiből indultam ki, a kiinduló modellben tökéletesen versenyző piacot feltételezve. A másnapi piac mellett már ebben a keretben megjelent a kiegyenlítő piac, amelyet a szereplők döntéseinek és elszámolásain keresztül kapcsoltam a szállítást megelőző kereskedéshez. A modellváltozatokban fokozatosan vezettem be a fogyasztói tudatosságot, az eltérő percepciókat, a kereskedő közvetítő szerepét, a termelési korlátokat és a szereplők egymáshoz igazodását.

A formális leírást saját fejlesztésű MATLAB-környezetben numerikus számításokkal és ágensalapú szimulációval kapcsoltam össze. Ebben a megközelítésben a szereplők percepcióinak változása és az ezek alapján újraszámított piaci egyensúly együttesen vizsgálható. A módszertani hozzájárulás így nem pusztán a szereplők számának bővítése, hanem az egyéni alkalmazkodás és a piaci következmények közös modellkeretben történő kezelése.

A kutatás egyik lényegi eredménye a menetrendi eltérések és az azokról alkotott percepciók döntési szerepének elkülönítése. A később megvalósuló eltérés az elszámolást alakítja, míg az arra vonatkozó várakozás már a szállítást megelőző keresleti és kínálati döntésekben megjelenhet. A modellváltozatok megmutatták, hogy a kiegyenlítetlenség gazdasági hatása nem ítéhető meg kizárólag a tényleges eltérés alapján: annak is jelentősége van, hogy a szereplők mit feltételeznek az eltérésről, és annak következményeit milyen döntési és szerződéses keretek között viselik. A kutatás újdonságát ezért nem önmagában a másnapi és a kiegyenlítő piac összekapcsolása, hanem a szereplői percepciók döntési és árképzési szerepének e keretben történő formalizálása adja.

A kutatás eredményeinek részletes állításait az alábbiakban foglalom össze:

- 1. Állítás.** *Alacsony DA piaci áron nőhet és csökkenthet is a kiegyenlítő termelő által a DA piacra vitt mennyiség. A menetrendezési eltérés növekedése és a DA piac összefüggése nem írható le tendenciózus relációként.*
- 2. Állítás.** *Alacsony kiegyenlítő piaci ár mellett a DA piaci egyensúlyi ár tudatos fogyasztók esetén növekszik, ahogy a menetrendezési hiba nő.*
- 3. Állítás.** *A fogyasztó alacsonyabb menetrend eltérési percepciója a kiegyenlítő szereplőhöz képest a DA piaci árak emelkedésére hat.*
- 4. Állítás.** *A fogyasztó a kereskedő megjelenésével elveszíti a tudatosságát, ezt a szerepet kereskedő veszi át, azonban a profit cél önmagában nem adaptív, a fogyasztónál és a kereskedőnél a menetrendezési hiba fundamentálisan másképp jelenik meg. Előbbi hasznosságként, utóbbi lineáris költségelemként.*
- 13. Állítás.** *A pénzhasznosság szerinti optimalizálás nem azonosítható a termék hasznosság alapú optimalizálással.*
- 14. Állítás.** *A kereskedő termék hasznosság helyett pénz hasznosság alapú egyenlettel rendelkezik, ami markánsan eltérő megközelítést jelent az piaci egyensúly szempontjából.*
- 7. Állítás.** *A kapacitás korlátok figyelembevétele már a fogyasztási/termelési függvények leírásánál implicit módon megtörténik, modell szintű kezelésük csak kiemelt esetben indokolt.*
- 8. Állítás.** *A szimuláció segítségével megmutattam, hogy egy véletlenszerű fogyasztói halmazban létezik olyan konvergens csoportosítási eljárás, amely konstruktív, és amellyel a csoport szereplői kereskedő közbeiktatása nélkül együttesen képesek megjelenni, és fogyasztói többletet elérni.*
- 9. Állítás.** *A szimuláció segítségével igazolható, hogy különböző fogyasztási függvényformák esetén is a piac egésze szempontjából konvergens csoportosulások képesek létrejönni a megalkotott konstruktív eljárással, amely csoportok tagjai együtt tudnak megjelenni a piac egésze felé.*
- 10. Állítás.** *Ha az egyes szereplők a percepciójában közelítenek egymáshoz, az a kialakuló piaci egyensúlyt stabilizálásában egy erősebb tényező, mint az a tény, hogy a percepciójuk tévedése folyamatosan változik.*

11. Állítás. *Pénzügyi ösztönzők révén elért addicionális villamosenergia-fogyasztás a menetredezési hiba függvényében drágulást, a piaci árak emelkedését képes okozni. Önmagában az RHD beavatkozás, de a CAPEX jellegű beruházás ösztönző sem minden esetben segítség a villamosenergia piac szereplőinek.*

15. Állítás. *Az energiaközösségek definiálhatók az előző modellek alapján jól körvonalazott, szükséges és endogén módon kibontható szereplőkként is, amelyek nincsenek átfedésben korábban már létező entitásokkal: A célfüggvényrendszere nem egyezik meg egyik másik korábban definiált szereplő célfüggvényével sem. Jelenléte segíti a piaci egyensúly stabilitásának kialakulását.*

Az első kutatási kérdés mentén azt vizsgáltam, hogy a szereplők saját kiegyenlítési percepciói alapján kialakíthatók-e közös piaci fellépésre alkalmas csoportok. Ehhez olyan követési eljárást vezettem be, amelyben a szereplők egymáshoz igazítják a várható menetrendi eltérésükről alkotott vélekedésüket. A szimulációkban különböző keresleti függvények mellett is létrejöttek olyan csoportosulások, amelyek együttes keresleti függvénnyel jeleníthetők meg a piac többi szereplője felé. A vizsgált esetekben a percepciók közeledése és az egyensúlyi árak viszonylagos stabilitása akkor is fennmaradt, amikor maga a menetrendi eltérés változott. Sikertelt tehát olyan csoportképzést bemutatni, amely nem előzetes szervezeti lehatárolásból, hanem a szereplők alkalmazkodásából következik. Ugyanakkor attól, hogy egy csoport kialakul és közösen képes megjelenni, még külön vizsgálándó, hogy ez az egyes tagok számára mekkora előnyt jelent az önálló fellépéshez képest, és az előny milyen belső elszámolás mellett érvényesül.

A második kutatási kérdésben a pénzügyi ösztönzők hatását vizsgáltam. A támogatásokat a keresleti függvények módosításán keresztül vezettem be, majd az így megváltozott döntések mellett számítottam ki a piaci egyensúlyt. A szimulációk megmutatták, hogy az ösztönzők hatása nem független a menetrendi eltérésektől és azok figyelembevételétől: bizonyos feltételek mellett a támogatás révén bővülő kereslet magasabb beszerzési árat eredményezett. Éppen ezért a nyújtott kedvezmény önmagában nem mutatja meg a támogatás gazdasági következményét. A fogyasztók megváltozó döntéseit és az ezekből kialakuló árakat együtt szükséges értékelni. Ez nem azt jelenti, hogy a támogatások általában eredménytelenek, hanem azt, hogy a hatásuk megítélésében a piac alkalmazkodása nem hagyható figyelmen kívül.

A harmadik kutatási kérdés mentén a tagok saját érdekeiből kiinduló csoportosulást vettem össze a mérlegkört szervező kereskedő döntési rendszerével. A kereskedőt tartalmazó modellben a menetrendi eltérés pénzügyi következményét a kereskedő kezeli, és annak várható költségét az árképzésében veszi figyelembe. A csoportképzés során ugyanakkor a tagok saját keresleti függvényei és kiegyenlítési percepcióik maradnak a döntések alapjai. A különbség tehát nem pusztán abban keresendő, hogy ki szervezi a közös piaci megjelenést, hanem abban is, hogy milyen érdekek és döntési összefüggések mentén teszi azt. Attól, hogy a mérlegkör és a csoport egyaránt szereplőket tömörít, még nem következik a célfüggvényeik egyenértékűsége. A kutatás során sikerült rámutatni a célfüggvények modell szerinti eltérésére, ahogyan a kereskedő az egyensúlyban profit alapú egyenlettel jelent meg a kínálat felé, amely redukálta a keresletből eredő hasznosság alapú megközelítés hatását a teljes piacra nézve. Ez a torzulás a piaci árak és a többletek átrendeződése nyomán volt tetten érhető.

A kutatás során a gazdasági összefüggések megértése volt a cél, ehhez pedig a valóság egyszerűsítése szükséges. A keresleti és kínálati függvények megválasztása, a követési szabályok, valamint a kiegyenlítő piaci ár exogén kezelése olyan modellezési döntések, amelyek mentén az eredmények is értelmezhetők. Nem konkrét piaci árakat vagy egy adott energiaközösség várható eredményét kívántam előre jelezni, hanem a szereplők döntései és a piaci egyensúly közötti összefüggéseket feltárni. Ugyanakkor különbséget kell tenni a percepciók közeledése és az előrejelzés pontossága között: attól, hogy a szereplők ugyanazt gondolják a várható eltérésükről, még tévedhetnek. Hasonlóan, a támogatások hatása sem ítélni meg pusztán abból, hogy az egyensúlyi beszerzési ár növekszik vagy csökken.

A létrehozott modellrendszer több irányban továbbfejleszthető. Fontos kiterjesztése lehet a percepciók valós szereplői adatokkal történő összevetése, valamint a memória beépítése, amely révén a szereplők saját korábbi eltéréseikből is tanulhatnak. Hasonlóan érdemes tovább bontani a közös fellépés gazdasági következményeit: melyik tag számára mekkora előny keletkezik, és milyen belső elszámolás mellett érdemes fenntartani az együttműködést. A több szállítási időpontra vonatkozó döntések összekapcsolása, a kereskedők közötti verseny bevezetése és a kiegyenlítő piaci ár endogén meghatározása újabb lépést jelenthet a valós piaci működés részletesebb leírása felé.

Össességében a kutatás olyan saját modellrendszert hozott létre, amelyben a menetrendi eltérések, a szereplői percepciók és a piaci egyensúly összefüggései együtt vizsgálhatók. A megközelítés lehetővé teszi, hogy a közös piaci fellépés kérdését ne kizárólag egy már létrehozott közösség működése felől értékeljük, hanem a szereplők döntéseiből kiindulva keressük annak gazdasági alapjait.

10 Irodalomjegyzék

2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról (VET) Elérhető: <https://njt.jog.gov.hu/jogszabaly/2007-86-00-00.117#NR> (letöltve: 2026.03.20)

2018/2001/EU Direktíva (RED II) Elérhető: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC (letöltve: 2026.03.20)

Abada, I., Ehrenmann, A., & Lambin, X. (2020). On the viability of energy communities. *The Energy Journal*, 41(1), 113-150.

Agnetis, A., De Pascale, G., Detti, P., & Vicino, A. (2013). Load scheduling for household energy consumption optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(4), 2364-2373.

Amir, R., & Grilo, I. (1999). Stackelberg versus Cournot equilibrium. *Games and Economic Behavior*, 26(1), 1-21.

Antelo, M., & Loureiro, M. L. (2009). Asymmetric information, signaling and environmental taxes in oligopoly. *Ecological Economics*, 68(5), 1430-1440.

Babulak, E., & Wang, M. (2010). Discrete event simulation. *Aitor Goti (Hg.): Discrete Event Simulations. Rijeka, Kroatien: Sciyo*, 1.

Belmar, F., Baptista, P., & Neves, D. (2023). Modelling renewable energy communities: assessing the impact of different configurations, technologies and types of participants. *Energy, Sustainability and Society*, 13(1), 18.

Berg, S. V., & Tschirhart, J. (1988). Natural monopoly regulation. *New York: Cambridge*.

Bolton, R. (2021). *Making energy markets: the origins of electricity liberalisation in Europe*. Palgrave Macmillan.

Botterud, A., Korpas, M., Vogstad, K., & Wangensteen, I. (2002, June). A dynamic simulation model for long-term analysis of the power market. In *Proceedings 14th Power Systems Computation Conference*.

Bowden, N., & Payne, J. E. (2008). Short term forecasting of electricity prices for MISO hubs: Evidence from ARIMA-EGARCH models. *Energy economics*, 30(6), 3186-3197.

- Bower, J., & Bunn, D. W. (2000). Model-based comparisons of pool and bilateral markets for electricity. *The energy journal*, 21(3), 1-29.
- Bukovszki, V., Magyari, Á., Braun, M. K., Párdi, K., & Reith, A. (2020). Energy modelling as a trigger for energy communities: A joint socio-technical perspective. *Energies*, 13(9), 2274.
- Cajna, B., Latimier, R. L. G., Ahmed, H. B., Bourmaud, J. Y., & Vignal, G. (2025, June). Impact of Multiple Energy Communities on the Day-Ahead Market. In *2025 IEEE Kiel PowerTech* (pp. 1-8). IEEE.
- Chassin, D. P., Fuller, J. C., & Djilali, N. (2014). GridLAB-D: an agent-based simulation framework for smart grids. *Journal of Applied Mathematics*, 2014(1), 492320.
- Conway, J. (1970). Conway's game of life. *Scientific American*, 223, 120-123.
- Cuisinier, E., Bourasseau, C., Ruby, A., Lemaire, P., & Penz, B. (2021). Techno-economic planning of local energy systems through optimization models: a survey of current methods. *International Journal of Energy Research*, 45(4), 4888-4931.
- Csanád, M. (2025). A valóság határain túl—a kvantumvilág felfedezése. *Magyar Tudomány*, 186(11), 2265-2283.
- Csekő, I. (1999). Az implementációelmélet alkalmazása a klasszikus gazdaságokban (*Doctoral dissertation, Budapesti Közgazdaságtudományi és Államigazgatási Egyetem*).
- Csekő, I. (2016). Közösségi döntések, gazdasági mechanizmus, általános egyensúly. *Budapesti Corvinus Egyetem*. ISBN 978-963-503-634-9
- Day, C. J., & Bunn, D. W. (2001). Divestiture of generation assets in the electricity pool of England and Wales: A computational approach to analyzing market power. *Journal of Regulatory Economics*, 19(2), 123-141.
- Dhawan, K. (2025). *Thermodynamics and Energy Conversion Principles*. Educohack Press.
- Farrell, M. J. (1952). Irreversible demand functions. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 171-186.

Felsmann, B. (2023, december 7.) *Az energiaközösségek szerepe az energiaátmenetben – Hogyan segíthetik a folyamatot a kereskedők?*. MEKSZ Konferencia, Budapest

Figueiredo, N. C., & da Silva, P. P. (2019). The “Merit-order effect” of wind and solar power: Volatility and determinants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 54-62.

Gintis, H. (2007). The dynamics of general equilibrium. *The Economic Journal*, 117(523), 1280-1309.

Graf, C. (2025). Simplified short-term electricity market designs: Evidence from Europe. *The Electricity Journal*, 107486.

Hämäläinen, R. P., Mäntysaari, J., Ruusunen, J., & Pineau, P. O. (2000). Cooperative consumers in a deregulated electricity market—dynamic consumption strategies and price coordination. *Energy*, 25(9), 857-875.

Hobbs, B. E. (2001). Linear complementarity models of Nash-Cournot competition in bilateral and POOLCO power markets. *IEEE Transactions on power systems*, 16(2), 194-202.

HUPX Szabályzat (2025). Link:

https://hupx.hu/sites/default/files/media/file/2025/07/hupx_market_rules_16.0_eng_clean_fin_0.pdf

Kahn, E. P. (1998). Numerical techniques for analyzing market power in electricity. *The Electricity Journal*, 11(6), 34-43.

Karakatsani, N. V., & Bunn, D. W. (2008). Forecasting electricity prices: The impact of fundamentals and time-varying coefficients. *International Journal of Forecasting*, 24(4), 764-785.

Kell, A. J., McGough, A. S., & Forshaw, M. (2022, December). A systematic literature review on machine learning for electricity market agent-based models. In *2022 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)* (pp. 4503-4512). IEEE.

Klæboe, G., Braathen, J., Eriksrud, A. L., & Fleten, S. E. (2022). Day-ahead market bidding taking the balancing power market into account. *Top*, 30(3), 683-703.

Kowalska-Pyzalska, A., Maciejowska, K., Suszczyński, K., Sznajd-Weron, K., & Weron, R. (2014). Turning green: Agent-based modeling of the adoption of dynamic electricity tariffs. *Energy Policy*, 72, 164-174.

Lelkes, O. (2003). A pénz boldogít? A jövedelem és hasznosság kapcsolatának empirikus elemzése [Can money buy happiness? An empirical analysis of the relation between income and utility]. *Közgazdasági Szemle (Economic Review-monthly of the Hungarian Academy of Sciences)*, 50(5), 383-405.

Macal, C. M., & North, M. J. (2009, December). Agent-based modeling and simulation. In *Proceedings of the 2009 winter simulation conference (WSC)* (pp. 86-98). IEEE.

MAVIR Kereskedelmi Szabályzat (2026). Link:

https://www.mavir.hu/documents/10258/343198479/KSZ_t%C3%B6rzssz%C3%B6veg_20260121_20260301_t%C5%911_korr0309_jav_clean.pdf/c7a75610-e423-dc91-84eb-5c0019c49c71?t=1777963286360

Mello, J., de Lorenzo, C., Campos, F. A., & Villar, J. (2023). Pricing and Simulating Energy Transactions in Energy Communities. *Energies*, 16(4), 1949.

Möst, D., & Keles, D. (2010). A survey of stochastic modelling approaches for liberalised electricity markets. *European Journal of Operational Research*, 207(2), 543-556.

Müsgens, F., Ockenfels, A., & Peek, M. (2014). Economics and design of balancing power markets in Germany. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 55, 392-401.

Otero-Novas, I., Meseguer, C., Batlle, C., & Alba, J. J. (2000). A simulation model for a competitive generation market. *IEEE transactions on power systems*, 15(1), 250-256.

Pál, L. (2010) Globális optimalizálási algoritmusok intervallum korlátos feladatokra. Doktori Értekezés tézisei.

Peeren, R., Dabhi, D., & Dalton, J. (2025). Levelling the playing field for smart renewable energy community in the electricity market through the high street electricity market model. *Applied Energy*, 377, 124660.

Petrichenko, L., Sauhats, A., Diahovchenko, I., & Segeda, I. (2022). Economic viability of energy communities versus distributed prosumers. *Sustainability*, 14(8), 4634.

- Pineda, S., & Morales, J. M. (2016). Capacity expansion of stochastic power generation under two-stage electricity markets. *Computers & Operations Research*, 70, 101-114.
- Pinto, T., Morais, H., Oliveira, P., Vale, Z., Praça, I., & Ramos, C. (2011). A new approach for multi-agent coalition formation and management in the scope of electricity markets. *Energy*, 36(8), 5004-5015.
- Qiu, L. D. (1997). On the dynamic efficiency of Bertrand and Cournot equilibria. *Journal of economic theory*, 75(1), 213-229.
- Randers, J. (1997). Elements of the system dynamics method. *Journal of the Operational Research Society*, 48(11), 1144-1145.
- Ringler, P., Keles, D., & Fichtner, W. (2016). Agent-based modelling and simulation of smart electricity grids and markets—a literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 205-215.
- Schmöller, H. K. (2005). *Modellierung von Unsicherheiten bei der mittelfristigen Stromerzeugungs-und Handelsplanung*. Klinkenberg.
- Shinde, P., & Amelin, M. (2019). *Agent-based models in electricity markets: A literature review* (pp. 3026-3031). IEEE.
- Snape, J. R., Irvine, K. N., & Rynikiewicz, C. (2011, June). Understanding energy behaviours and transitions through the lens of a smart grid agent based model. In *ECEEE 2011 Summer Study Conference*.
- Taitel, Y. (1994, August). Advances in two phase flow mechanistic modeling. In *SPE University of Tulsa Centennial Petroleum Engineering Symposium* (pp. SPE-27959). SPE.
- Tesfatsion, L. (2006). Agent-based computational economics: A constructive approach to economic theory. *Handbook of computational economics*, 2, 831-880.
- Teufel, F., Miller, M., Genoese, M., & Fichtner, W. (2013). Review of System Dynamics models for electricity market simulations.
- Ventosa, M., Baillo, A., Ramos, A., & Rivier, M. (2005). Electricity market modeling trends. *Energy policy*, 33(7), 897-913.

- Wang, S. Y. (1993). Existence of a Pareto equilibrium. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 79(2), 373-384.
- Wooldridge, M. (2009). *An introduction to multiagent systems*. John Wiley & sons.
- Wu, Z., Zhou, M., Li, G., Zhao, T., Zhang, Y., & Liu, X. (2020). Interaction between balancing market design and market behaviour of wind power producers in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110060.
- Zhang, T., & Nuttall, W. J. (2011). Evaluating government's policies on promoting smart metering diffusion in retail electricity markets via agent-based simulation. *Journal of Product Innovation Management*, 28(2), 169-186.
- Zhou, Z., Zhao, F., & Wang, J. (2011). Agent-based electricity market simulation with demand response from commercial buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(4), 580-588.

Jegyzetek

SZERZŐ TÉMÁBAN SZÜLETETT FOLYÓIRAT PUBLIKÁCIÓI:

Cavalcanti, J. H., Kovacs, T., Ko, A., & Pocsarovszky, K. (2024). Production system efficiency optimization through application of a hybrid artificial intelligence solution. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 37(6), 790-807.

Nick, G., Zeleny, K., Kovács, T., Járvas, T., Pocsarovszky, K., & Kő, A. (2024). Artificial intelligence enriched industry 4.0 readiness in manufacturing: the extended CCMS2.0e maturity model. *Production & Manufacturing Research*, 12(1), 2357683. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/21693277.2024.2357683>

SZERZŐ TÉMÁBAN VETT ELŐADÁSAI:

Pocsarovszky K.: Energiaközösségek a hazai gyakorlatban, Az energiaközösségek szerepe az energiaátmenetben - MTVSZ konferencia, 2023. december 7., Budapest

Pocsarovszky K.: Day-ahead scheduling models of renewable powerplants, OGIK Konferencia, 2022. november 11., Salgótarján

Pocsarovszky K.: Simulation-based optimization in warehouse problems, Conference of the Doctoral School of Economics, Business and Informatics, 2021. november 18., Budapest

Pocsarovszky K.: Improvement opportunities on The National Business Information System (SNIA), Chamber of Commerce and Industry of Romania (CCIR), 2021. október 19, Románia, Bukarest

Dr. Benedek G., Pocsarovszky K.: Szimulációs módszerek alkalmazása az üzleti döntéstámogatásban, IQSymposium, 2011. április 14., Budapest

Biró P., Pocsarovszky K.: The effects of EU climate legislation on business cycles, 30th CIRET Conference, 2010. október 13-16, USA, New York

Pocsarovszky K.: Business Cycle and Crisis in the Hungarian Industry, CIRET: „Workshop on Sentiment Indicators and the current Crisis”, 2009. november 9-10., Budapest