



REGIONÁLIS- ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA

Vezető: Prof. Dr. Dusek Tamás egyetemi tanár

Bakó Ferenc

okleveles közgazdász

A láthatósági gráf eljárás alkalmazása az európai országok áramtözsdei folyamatainak
vizsgálatára

Doktori értekezés

Témavezetők: Dr. habil. Csizmadia Zoltán PhD

Prof. Dr. Dusek Tamás PhD

Győr

2022. december

Széchenyi István Egyetem
Regionális- és Gazdaságtudományi Doktori Iskola

Bakó Ferenc

A láthatósági gráf eljárás alkalmazása az európai országok áramtőzsdei folyamatainak
vizsgálatára

Doktori értekezés

Győr, 2022

Tartalomjegyzék

| | |
|--|-----|
| Bevezetés..... | 8 |
| Az értekezés célja..... | 8 |
| Az értekezés felépítése és hipotézisei | 11 |
| 1. A villamos energia, mint termék | 16 |
| 2. Villamosenergia-ipari reformok hazánkban..... | 21 |
| 3. A regionális villamosenergia-piac szerkezete | 27 |
| 4. A megújuló energia piacának területi különbségei | 41 |
| 5. Területi politika a villamos energia piacán | 53 |
| 5.1. Oroszország hatása a regionális energiapolitikára..... | 59 |
| 5.2. Smart grid rendszerek | 61 |
| 5.3. Regionális kapcsolatok | 62 |
| 6. A villamosenergia tőzsdék (PX)..... | 65 |
| 6.1. Magyarország (HUPX)..... | 66 |
| 6.2. Szlovákia (OKTE) | 69 |
| 6.3. Lengyelország (POLPX) | 69 |
| 6.4. Csehország (PXE)..... | 72 |
| 6.5. Ausztria (EXAA)..... | 74 |
| 7. EU kibocsátáskereskedelmi rendszere (EU ETS) | 79 |
| 8. Az idősorelemzés módszertana és eredményei | 86 |
| 8.1. Az áramtőzsdék általános jellemzése | 87 |
| 8.2. Véletlen bolyongás (Brown-mozgás) és a Hurst-index..... | 91 |
| 9. Hálózatelméleti alapok | 98 |
| 9.1.1. A szomszédsági mátrix..... | 98 |
| 9.2. Topológiai mérőszámok | 99 |
| 9.2.1. Fokszám-mérőszámok és eloszlás..... | 99 |
| 9.2.2. Asszortativitás | 100 |
| 9.2.3. A hálózat átmérője (diameter)..... | 101 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 9.2.4. | Átlagos útvonalhossz (<i>average path length</i>)..... | 101 |
| 9.2.5. | Sűrűség (<i>density</i>)..... | 102 |
| 9.2.6. | Klaszterezettségi együttható (<i>clustering coefficient</i>) | 102 |
| 9.2.7. | Közelség (<i>Closeness Centrality</i>) | 103 |
| 9.2.8. | Közöttiség (<i>betweenness centrality</i>)..... | 103 |
| 9.2.9. | Modularitás (<i>modularity</i>)..... | 104 |
| 9.2.10. | Sajátvektor központiség (<i>eigenvector centrality</i>) | 104 |
| 9.3. | Alapvető gráfmodellek | 106 |
| 9.3.1. | Erdős-Rényi modell..... | 106 |
| 9.3.2. | Watts-Strogatz modell..... | 109 |
| 9.3.3. | Barabási-Albert modell | 110 |
| 10. | Az alap láthatósági (VG) és horizontális láthatósági gráf (HVG)..... | 114 |
| 10.1. | Alap láthatósági gráf..... | 114 |
| 10.1.1. | Adatmagasság, mint befolyásoló tényező | 118 |
| 10.2. | Modell idősorok és tesztelésük láthatósági gráfelemzéssel | 119 |
| 10.3. | Eredmények | 126 |
| 10.3.1. | Hálózati topológia és területi különbségek..... | 126 |
| 10.3.2. | Skálafüggetlenség..... | 129 |
| 10.3.3. | A hálózatok asszortativitása | 131 |
| 10.3.4. | Területi összehasonlítás a módosított Jaccard hasonlóság segítségével..... | 132 |
| 10.3.5. | Klaszterezettség | 136 |
| 10.4. | A magyarországi áramtőzsde vizsgálata a láthatósági gráf módszerrel..... | 139 |
| 10.4.1. | A 2019.01.01. és 2021.06.30. közötti időszak..... | 143 |
| 10.4.2. | A 2021.07.01. és 2022.03.03. közötti időszak..... | 153 |
| 10.5. | A klaszterekben mérhető topológiai mutatószámok statisztikai áttekintése..... | 157 |
| | Összefoglalás és következtetések..... | 163 |
| | Javaslatok | 168 |
| | Irodalomjegyzék..... | 170 |

Ábrák jegyzéke

| | |
|--|-----|
| 0-1. ábra: A láthatósági gráf alkalmazása az épületkörnyezet vizsgálatában | 9 |
| 0-2. ábra: Az idősorok gráffá alakításának folyamatábrája..... | 10 |
| 0-3. ábra: A grafikus elemzés nehézségei | 11 |
| 3-1. Ábra: Áramtermelés források szerint Ausztriában 1990-2019 között | 38 |
| 5-1. Ábra: Átlagos fizikai és kereskedelmi forgalom a Közép-Európai régióban a 2012. július és szeptember közötti időszakban | 55 |
| 5-2. Ábra: Gini-index a rendszerköltésekre, a foglalkoztatásra, az üvegházhatást okozó gázok kibocsátására, a részecske-kibocsátásra és a földhasználatra gyakorolt regionális hatások térbeli eloszlására | 57 |
| 5-3. Ábra: A villamosenergia regionális határon átnyúló áramlásai (fizikai áramlások) 2021 második negyedévében az ENTSO-E régiók alapján..... | 58 |
| 5-4. Ábra: Oroszország részesedése az EU-28-ba irányuló teljes villamosenergia-exportból. 60 | |
| 5-5. Ábra: A kereskedhető kapacitás (NTC) változásai Európában – 2019–2020 (MW)..... | 63 |
| 6-1. ábra: Másnapi piac villamosenergia árak a HUPX-en 2020-ban..... | 68 |
| 6-2. ábra: Kereskedés volumene a HUPX IDM-en 2020-ban..... | 68 |
| 6-3. ábra: Villamosenergia kereskedelem volumene a TGE-n..... | 71 |
| 6-4. ábra: Az áram árának (alapterhelés ára) változása a közép-európai régióban 2020-ban .. | 73 |
| 6-5. Ábra: A havi villamosenergia-tőzsdei kereskedés volumene és átlagos másnapi árak Közép-Kelet-Európában..... | 76 |
| 6-6. Ábra: A villamosenergia másnapi aukciós ára a közép-európai régióban 2020-ban..... | 78 |
| 7-1. Ábra: Fogyasztói villamosenergia árak az Európai Unióban 2020 második felében | 81 |
| 8-1. Ábra: Q-Q plot | 89 |
| 8-2. ábra: Brown-mozgás | 92 |
| 8-3. Ábra: Brown-mozgás 2. | 93 |
| 8-4. Ábra: Brown-mozgásból létrehozott idősor..... | 93 |
| 9-1. Ábra: Watts-Strogatz hálózat | 110 |
| 9-2. Ábra: Barabási-Albert hálózat | 112 |
| 9-3. Ábra: Barabási-Albert hálózat fokszámeloszlása | 112 |
| 10-1. Ábra: Az alap láthatósági gráf kialakításának lépései | 116 |
| 10-2. Ábra: Az idősor gráffá konvertálásának lépései | 116 |
| 10-3. Ábra: A horizontális láthatósági gráf..... | 117 |
| 10-4. Ábra: Elméleti idősorok..... | 119 |
| 10-5. Ábra: Az idősorok gráfalakjai..... | 120 |

| | |
|---|-----|
| 10-6. Ábra: Az ártüske gráfja és belső struktúrája | 121 |
| 10-7. Ábra: A klaszterek kialakulásának grafikus bemutatása | 123 |
| 10-8. Ábra: Átfedések és szakadások a klaszterek között..... | 123 |
| 10-9. Ábra: Az emelkedő ütemben növekvő idősor láthatósági gráfjának klaszterezettségi topológiája..... | 125 |
| 10-10. Ábra: Néhány vizsgált ország és a Brown mozgás (BW) láthatósági gráfja | 128 |
| 10-11. Ábra: A HUPX áramtözsde fokszámoszlása..... | 130 |
| 10-12. Ábra: Az el- és átfedés problémájának grafikus szemléltetése..... | 132 |
| 10-13. ábra: minimális rendszerösszekötő kapacitás az egyes országok beépített termelési kapacitásának százalékában | 134 |
| 10-14. ábra: Fejlődés alatt álló európai regionális árampiacok..... | 135 |
| 10-15. Ábra: A láthatósági gráf topológiája alapján szakaszolt eredeti idősor | 136 |
| 10-16. Ábra: A 2019.01.01 és 2020.06.30. közötti időszak vonaldiagramja | 140 |
| 10-17. Ábra: A 2020.07.01. és 2022.03.03. közötti időszak vonaldiagramja | 140 |
| 10-18. Ábra: A 2019.01.01 és 2020.06.30. közötti időszak láthatósági gráfja | 141 |
| 10-19. Ábra: Részgráf (2019.01.01-2019.01.15.) | 142 |
| 10-20. Ábra 2019. január 15. utáni időszak klaszterezettsége | 145 |
| 10-21. Ábra: 2019.08.28-2019.09.02. időszaki gráfja..... | 146 |
| 10-22. Ábra: 2019.09.03-2019.10.15. (246-288. nap) | 147 |
| 10-23. Ábra: A COVID 19 járvány korlátozásainak első időszaka | 148 |
| 10-24. Ábra: A teljes gráf rózsaszín klasztere és részalmazai | 149 |
| 10-25. Ábra: 717. nap: 2020. december 17. Az év legmagasabb mársnapi ára | 149 |
| 10-26. Ábra: Az európai piac üzemzavar okozta kettészakadása | 151 |
| 10-27. Ábra: A régió DAM árai 2021. április | 152 |
| 10-28. Ábra: A 2021.07.01. ÉS 2022.03.03 KÖZÖTTI IDŐSZAK láthatósági gráfja | 153 |
| 10-29. Ábra: a 2019.01.01 és 2021.06.30. közötti időszak klasztereinek átlagos fokszáma és szórása | 160 |
| Össz. 0-1. Ábra: Átfedési együtthatók értékei (viszonyítási alap Magyarország)..... | 167 |
| Össz. 0-2. Ábra: Átfedési együtthatók értékei (viszonyítási alap Németország | 167 |

Táblázatok jegyzéke

| | |
|---|-----|
| 1. táblázat: Az áramtőzsdék adatainak statisztikai mutatószámai | 88 |
| 2. táblázat: Normalitásvizsgálat, ferdeség és csúcsosság | 90 |
| 3. táblázat: Relatív szórás | 90 |
| 4. táblázat: Stacionaritás tesztelés eredményei | 96 |
| 5. táblázat: Hurst-kitevő | 96 |
| 6. táblázat: Az elméleti idősorok gráfjainak topológiai mérőszámai | 122 |
| 7. táblázat: Az áramtőzsde idősoraiból létrehozott gráfok topológiái | 126 |
| 8. táblázat: Az idősorok és azok láthatósági gráftopológiáinak korrelációs értékei | 127 |
| 9. táblázat: Fokszámeloszlások és azok statisztikai próbái | 130 |
| 10. táblázat: Asszortativitási együtthatók | 131 |
| 11. táblázat: Hasonlósági mátrix | 133 |
| 12. táblázat: A két vizsgált időszak láthatósági gráfjának topológiai mérőszámai | 143 |
| 13. táblázat: A 2019.01.01-2021.06.30. közötti időszak klasztereinek átlagos fokszáma, azok szórása, elemszáma és színe | 158 |
| 14. táblázat: A 2021.07.01-2022.03.03. közötti időszak klasztereinek átlagos fokszáma, azok szórása, elemszáma és színe | 159 |
| 15. táblázat: Az idősor szórásának és a gráf átlagos fokszámának kapcsolatát vizsgáló statisztikák eredményei | 161 |
| 16. táblázat: Az idősor szórásának és a gráf átlagos útvonalhosszúságának kapcsolatát vizsgáló statisztikák eredményei | 162 |

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az elmúlt évek során, mialatt doktori értekezésemen dolgoztam, számos személytől kaptam segítséget, az ő támogatásuk nélkül jelen doktori értekezés nem jöhetett volna létre.

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Dr. habil. Csizmadia Zoltánnak és Prof. Dr. Dusek Tamásnak a doktori tanulmányaim során nyújtott kiemelkedő szakmai támogatásukért, folyamatos segítőkészségükért és türelmükért. Hatalmas tudásuk és rengeteg tapasztalatuk bátorított tudományos kutatásom és mindennapi életem során.

Szeretnék köszönetet mondani Donkó Annának és Kovács Bálint Artúrnak a HUPX Zrt. munkatársainak a doktori értekezésem elkészítése során nyújtott szakmai támogatásukért.

Köszönöm továbbá Dr. Remsei Sándornak és elődjének Dr. Szigeti Cecíliának, valamint minden tanszéki kollégának, hogy bármilyen kéréssel fordultam is hozzájuk, minden támogatást megadtak az értekezésem megírásához, és mindig számíthattam rájuk oktatási kérdésekben is.

A legnagyobb hálával és köszönettel édesanyámnak és édesapámnak tartozom, valamint családom számos további tagjának a képzés alatt nyújtott, szívből jövő támogatásukért és bátorításukért, melyben éppúgy részesülhettem, akárcsak korábbi tanulmányaim során. Szeretnék köszönetet mondani Páromnak, aki az értekezésem írásának minden percében támogatott, és aki nélkül ma nem lehetnék az, aki.

Szívből jövő hálával gondolok családom azon tagjaira is, akik teljes odaadással támogattak eddigi életem során, de jelen értekezés elkészültét már nem élhették meg.

Doktori értekezésemet családomnak ajánlom!

Győr, 2022. 12. 04.

BEVEZETÉS

Az energiapiac, azon belül is az áramtőzsde egy dinamikusan fejlődő rendszer, amely egyre több tagot számláló befektetőből, kereskedőből áll. Mindezen belül a közvetlenül megjelenő fogyasztók száma is emelkedő tendenciát mutat az utóbbi néhány évben. A piacon bonyolult kölcsönhatások uralkodnak, hiszen az energia, legfőképp az elektromos áram olyan termék, melynek tárolása körülményes és költséges. A piacon tevékenykedő szereplők külső és belső információkat felhasználva alakítják az árakat, aminek sztochasztikus dinamikán alapuló elemzése még nem számottevő a tudományos világban, legfőképpen, ha mindezt például a pénzügyi piacokhoz és tőzsdékhez hasonlítjuk (Grau-Carles, 2001; Lo, 1991; Mantegna & Stanley, 1999).

Az árampiac mind technikai mind pedig érdemi deregulációt mutat, ami annyit jelent, hogy a kereskedelem platformja folyamatosan decentralizálttá válik, a dereguláció jogi értelemben pedig a jogi (túl)szabályozottság mértékének csökkenését jelenti. Ezek a folyamatok pedig szükségessé teszik, hogy az itt zajló piaci mechanizmusokat mélyebben megértsük, főképp, ha az üzleti világban jártas kereskedőkön és befektetőkön kívül folyamatosan jelennek meg rajta a háztartások, mint az itt értékesített termékek végső felhasználói. Habár a fogyasztók elkezdtek megjelenni az áramtőzsdén, az árak kialakítása, kialakulása még mindig a piaci üzleti befektetők közötti interakcióknak köszönhető. Így a piaci modellezéshez, melynek kulcstényezője az árazási mechanizmus jobb megértése szükséges ahhoz, hogy a jövőben nagyobb számban megjelenő háztartások számára is képet tudjunk alkotni az itt zajló folyamatokról, így kialakítva számukra egy olyan piaci helyzetképet, amely a valós idejű árazás melletti fogyasztási profiljuk kialakításához információt nyújthat. A sikeres stratégia kialakításához tehát elengedhetetlen e komplex rendszer viselkedésének megértése (Anderson, 1972; Bouchaud & Potters, 2000).

Mindezek értelmében az árampiac, mind a tőzsdei, mind pedig a nagykereskedelmi szegmensét ideértve, nem vizsgálhatók elszigetelt egységként. A jelenlegi áringadozásokat és azok kiváltó okait egy komplex hálózatban kell keresni, nem pedig kizárólag az ország árampiacán belül.

AZ ÉRTEKEZÉS CÉLJA

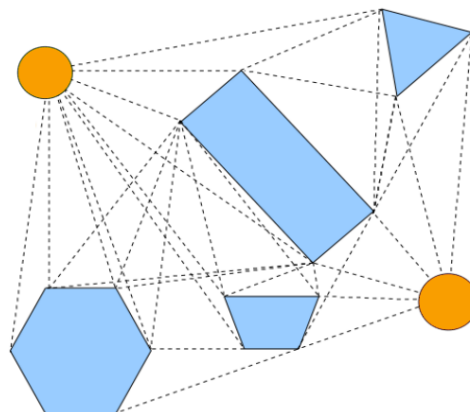
Mint minden piacon, az árak az energiaszektorban is változnak. Ezek a változások azonban lényegesen volatilisabbak, mint a hétköznapi fogyasztási cikkek piacán. Értekezésem célja egy újszerű módszertan bemutatása, mellyel idősorok alakíthatóak át

gráfokká¹. Mivel a láthatósági gráf módszertanának nemzetközi szakirodalma még nagyon hiányos, Magyarországon pedig egyetlen cikk sem foglalkozott érdemben a témával, az egyik legnagyobb potenciál ennek kidolgozásában és tesztelésében rejlik. Lehetőségem adódott arra, hogy különböző tulajdonságokkal rendelkező elméleti idősorokon vizsgáljam, hogy a gráffá alakított idősorok milyen eltérő tulajdonságokkal rendelkeznek, milyen gráfszerkezetbe rendeződnek a vizsgált idősorok globális és lokális maximumait reprezentáló csúcspontok, miként alkotnak közösségeket a gráfban a völgyidőszakok megfigyelt értékei és így tovább.

Vajon honnan jött a gondolata egy idősor gráfként történő leképezésének és hogyan is működik ez az eljárás?

Láthatósági gráfokat az építészetben, a robottechnológiában és még számos egyéb tudományterületen alkalmaznak. Az építészetben leggyakrabban az épületkörnyezeti tervezésnél találkozhatunk vele. Azokban a városokban, ahol nagy számban épülnek felhőkarcolók és más magas épületek, fontos a megfelelő fényáramlás biztosítása többek között a megfelelő komfortérzet biztosítása érdekében. Ennek feltérképezéséhez szükséges megvizsgálni, hogy a tervezett épület esetében merre, milyen távolságokba lehet majd ellátni az egyes szinteken, hány épület akadályozza majd a kilátást az ingatlanból. Ezt sokszor gráfszerkezetben ábrázolják, melyet az alábbi ábra szemléltet. A narancs színű alakzatok a tervezett, a kék alakzatok pedig a már megépült épületeket szimbolizálják.

0-1. ÁBRA: A LÁTHATÓSÁGI GRÁF ALKALMAZÁSA AZ ÉPÜLETKÖRNYEZET VIZSGÁLATÁBAN

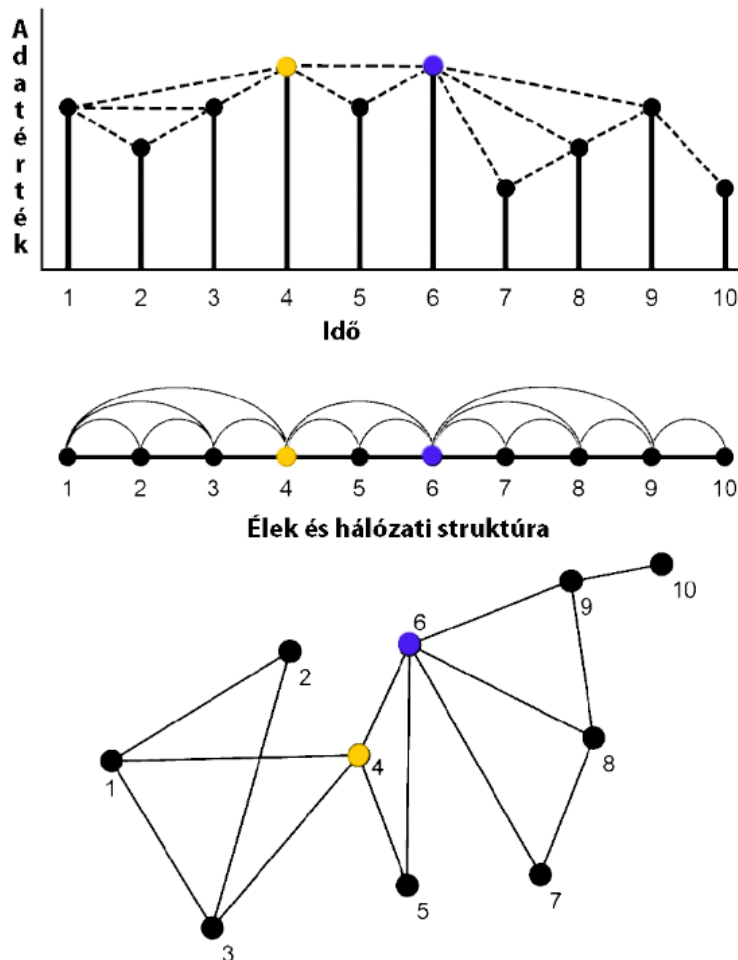


Forrás: saját szerkesztés

¹ Disszertációban a gráf és hálózat szó egymás szinonimái. A tudományos munkákban gráfként említik, ha a csúcspontok és élek rendszerét matematikai szempontok szerint, általánosan vizsgálják, hálózatként hivatkoznak rá, ha konkrét társadalmi, informatikai, biológiai hálózatokról van szó, az utóbbi időkben megjelent művekben viszont gyakran mindkét szóhasználat megjelenik.

Ezen analógia mentén egyszerűen fogalmazva, a láthatósági gráf eljárását úgy kell elképzelni, hogy az idősorok minden egyes megfigyelt értékét oszlopdiagramon ábrázoljuk, majd gondoljunk minden oszlopra egy-egy magas épületként. Amennyiben az egyik ilyen „épület” tetejére kiállunk, mely másik „épületeket” láthatjuk onnan egy kétdimenziós térben? Visszatérve az eredeti gondolatmenethez, ettől fogva azokat az időpontokat, melyek egymás számára láthatóak, tehát közük folytonos egyenes vonal húzható, összekapcsoljuk. Ők egy éllel összekapcsolt pontpárt alkotnak a létrejövő gráfban. A logikát grafikusán a 0-2-es ábra szemlélteti (mellyel a későbbiekben a módszertani részben még újra foglalkozom).

0-2. ÁBRA: AZ IDŐSOROK GRÁFFÁ ALAKÍTÁSÁNAK FOLYAMATÁBRÁJA

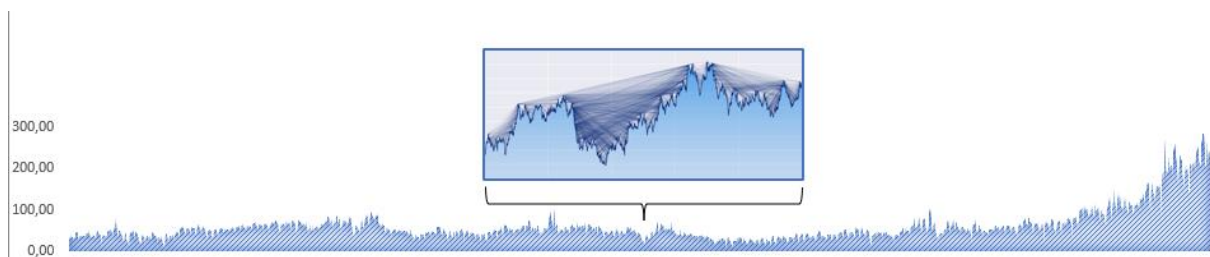


Forrás: (Lacasa et al., 2008) munkája alapján

Mint látni fogjuk, a hálózatokba az eredeti idősorok számos tulajdonsága átöröklődik. Segítségével könnyebben összehasonlíthatóvá válnak a különböző területeken (földrajzi terek, társadalmi terek, politikai terek stb.) gyűjtött adathalmazok. A láthatósági gráf algoritmusával a véletlen sorozatok, idősorok véletlenszerű gráfokká, a periodikus sorozatok pedig valamilyen

szabályos gráfokká alakulnak. A fő célkitűzésem annak tanulmányozása, hogy a gráfelmélet technikai miként használhatóak a térben eltérő helyen mért adatok idősorainak jellemzésére. Amint a doktori értekezés későbbi részeiben látható lesz, a hálózat számos, nem triviális információt tár fel magáról a sorozatról, illetve annak területi jellegéről. Az egyik legfontosabb motiváló tényezőm, hogy bemutassam, az összetett hálózatok értékesek az idősorokban történő információbányászat szempontjából. Ezért az idősorok hálózatokká való alakítása és elemzése egyedülálló, újszerű perspektívává válik az elemzések és előrejelzések készítéséhez. Ily módon a statisztikai jellemzők geometriai formában jelennek meg, így az idősorok több részletét lehet feltárni. Az eljárás valódi előnye pedig az olyan idősorok esetében mutatkozik meg igazán, melyek nagyon sok, gyakori megfigyelést tartalmaznak, így a hagyományos (grafikus) elemzéssel csak korlátozottan vagy komolyabb munkával elemezhetők. Így került a vizsgálatom fókuszába az áramtőzsde, amely a 2018.01.01-2022.03.03. közötti időszakban több mint 1 300 megfigyelést tartalmaz (0-3. ábra).

0-3. ÁBRA: A GRAFIKUS ELEMZÉS NEHÉZSÉGEI



Forrás: saját szerkesztés

A fenti ábrából már jól érzékelhető, hogy a nagyszámú megfigyelések miként nehezítik meg az elemző munkát. Az áramtőzsdei idősorok pedig rendre fraktál jelleggel rendelkeznek, ami tulajdonképpen azt jelenti, hogy az idősorra közelítve (nagyítva) további ciklusokat találunk. A 0-3-as ábrán, a kiemelt nagyításban a hálózatban kialakuló élek logikáját is láthatjuk.

AZ ÉRTEKEZÉS FELÉPÍTÉSE ÉS HIPOTÉZISEI

Értekezésem első felében arra keresem a választ, hogy miként épül fel az európai árampiac és *(K₁) milyen szerepet játszanak az árak alakításában az egyes területek áramtőzsdéi.* Ennek megválaszolásához tágabb áttekintést adok az árampiacról, annak működéséről, struktúrájáról. Külön fejezetben tárgyalom a megújuló energiaforrások piacát, valamint az Európai Unió széndioxid kibocsátás korlátozásra irányuló ún. EU ETS rendszerét. Ez utóbbi a dráguló nyersanyagárak mellett további árfelhajtó hatást gyakorol az energiaárra, mellyel az Unió célja a megújuló energiaforrások telepítésének ösztönzése és a klíma védelme. A megújuló termelők

egyik nagy előnye a közvetlen szén-dioxid kibocsátás csökkenése – nem szólva most a közvetett környezetterhelő hatásairól – ugyanakkor az áramtermelésben és a rendszerterhelés-szabályozásban, ezáltal az áringadozásban, mint azt látni fogjuk, nagy szerepet játszik. Külön nagy fejezetet szentelek a regionális áramtőzsdéknek, mivel a későbbiekben bemutatott új kutatási módszer tesztelésének alapjául szolgálnak.

Munkám következő nagy szakaszában első lépésként a hagyományos idősorelemzési technikákkal vizsgálom meg az áramtőzsdék idősorait. Ide az alábbi kutatási kérdést fogalmazom meg: (K_2) *milyen statisztikai tulajdonságokkal rendelkeznek az országok áramtőzsdéinek árai?* Ennek vizsgálata azért is fontos, mert még csak nagyon kevés támpontot nyújtó szakirodalom áll rendelkezésre arról, hogy az idősorok egyes tulajdonságai milyen hálózati topológiai tulajdonságokban mutatkoznak meg. A valós adathalmaz mellett egy mesterségesen létrehozott, véletlen bolyongású idősort is bevonok az elemzésbe, mint referenciapontot, melyet a hatékony piacok vizsgálatánál is gyakran alkalmaznak. Ez a véletlen folyamat az ún. *Brown-mozgás*. Itt alkotom meg első hipotézisemet, miszerint:

H₁: *Az egyes országok áramtőzsdéinek idősorai perzisztens jellemzővel bírnak.*

A hipotézis tehát arra a feltevésre utal, hogy az idősor megfigyelései pozitív korrelációban állnak egymással. Amennyiben a megfigyelt piacon áremelkedés indul meg, az a folyamat az időben egy bizonyos szakaszon folytatódni fog, mielőtt a piaci mechanizmusok korrigálnák a folyamatot. Az idősorok véletlenszerű vagy épp trendszerű alakulásának vizsgálatához szükséges a *Hurst-index* alkalmazása, mely megadja az idősor volatilitását és annak esetleges hosszútávú memóriáját. Az idősorok szakaszolása esetében arra is választ kaphatunk, hogy az adott piaci folyamat *önaffin jellemzővel* bír-e, tehát minden szakasz közel azonos Hurst-kitevővel rendelkezik. Ennek kapcsán a második hipotézisemet az alábbiak szerint fogalmaztam meg:

H₂: *Az országok áramtőzsdéinek ársorai önaffin jellemzővel bírnak.*

Az előbbi két hipotézisemet a tanulmányozott és a munkámban hivatkozott szakirodalmak alapján alkottam meg.

Miután alapvető szinten megvizsgáltam az áramtőzsdé árainak idősorait, bevezetem értekezésem újabb lényeges tématerületét, a *hálózatelméletet*. Ez a szakasz az elméleti alapokat biztosítja a később alkalmazott *innovatív elemzési módszer* alkalmazásához és értelmezéséhez, a *láthatósági gráf algoritmushoz*. Ehhez bemutatom a hálózatelméletben használt *topológiai mérőszámokat*, az *alapvető gráfmodelleket* a véletlen gráfoktól egészen a skálafüggetlen

hálózatokig. Ezt követően részletesen bemutatom az általam új elemzési eszközként használt láthatósági gráf elméleti vonatkozásait. A bevezetés után mesterségesen létrehozott sorozatokon mutatom be a láthatósági gráfok sajátos topológiáit, melyek viszonyítási alapként szolgálnak tényleges áramtőzsdéi vizsgálatokhoz. Számos esetben az elméleti leírás mellé *grafikus megjelenítést* is használok a könnyebb érthetőség érdekében. Ezt követően a valós áramtőzsdék adatait konvertálom gráfokká a bemutatott eljárással és vizsgálom meg azok topológiai tulajdonságait. Az ide vonatkozó kutatási kérdésem a következő: *(K₃) a láthatósági gráfok topológiája milyen többletinformációkkal szolgálhat a vizsgált területek adatairól?* A gráfok hasonlóságát is megvizsgálom, melyhez a gyakran alkalmazott *Jaccard-hasonlóság* mutatót alkalmazom, *módosításokkal* az elfedések elkerülése érdekében. Így csökkentve a hibalehetőségeket a mérés folyamán. A hálózatok hasonlósága vagy különbsége a térbeli különbségekről is információkat szolgáltat.

Kissé előre szaladva, a magyar áramtőzsde mozgása erős, pozitív korrelációban áll a többi regionális áramtőzsde mozgásával, ami az utóbbi évek területi integrációjának köszönhető. Az európai energiarendszer összetettebbé vált az elmúlt évtizedekben: a liberalizáció felbomlasztotta az integrált energiaszolgáltatókat, és nagyszámú energiapiaci szereplőhöz vezetett. A dekarbonizációs erőfeszítések folyamatosan alakítják a villamosenergia-ellátást. Ami a teljes energiafogyasztást illeti, az Európai Unió nagy fogyasztásorientált népessége, területe és folyamatos gazdasági növekedése miatt az energiafogyasztás iránti kereslet a jövőben várhatóan tovább fog növekedni, ami folyamatos piacfejlesztéshez és területi összekapcsoltsághoz vezet. A területi integráció a kereslet és kínálat egyensúlyának fenntartását segíti elő. Mivel a tőzsdéi kereskedők mind ugyanazon a platformon kereskednek, *a piaci anomáliák szinte azonnal begyűrűznek a magyarországi piacra* is, így a továbbiakban topológiai szempontból nem lesz értelme külön vizsgálni a német, román, szlovák vagy bármely más, a hazaival határkeresztező kapcsolatban álló áramtőzsdét. Ennek vonatkozásában ezt követően kizárólag a magyar HUPX áramtőzsde adatait vizsgálom meg részletesen a láthatósági gráf módszerével. Az itt jelentkező kilengések oka szinte az összes esetben egybevág a régióban tapasztalható többi piacon jelentkező extremitások, trendek és ciklusok ok-okozati tényezőivel. Mindez tehát a piaci összekapcsoltság és az egyre fejlődő határkeresztező hálózatok eredménye. Mindazonáltal az elsődleges célom nem az áramtőzsdék viselkedési mintáinak mélyreemenő elemzése, hanem egy *új idősvizsgálati eljárás bemutatása*, melyhez az áramtőzsdéről származó adatok csupán személtetőeszközként szolgálnak. Célom ennek az algoritmusnak a bemutatása és egy *gondolatindító értekezés*

megalkotása. A módszertan korántsem lesz tökéletes, annak kidolgozása még hosszú évek munkáját kívánja tőlem és a téma iránt érdeklődő kollégáimtól. A láthatósági gráffal vizsgált magyar HUPX áramtőzsde tulajdonságaira a következő hipotéziseket állítottam fel:

H₃: *A gráfokban kialakuló klaszterek segítségével meghatározhatók a vizsgált időszakban bekövetkező piaci események.*

H₄: *A klaszterek legmagasabb fokszámmal rendelkező csúcspontjai (HUB-ok) globális és lokális maximumértékeket jelölnek.*

H₅: *Az a klaszter, amelyből nem emelhető ki egyértelműen magas fokszámú csúcspont, nyugodt piaci időszakot ölel fel.*

Egy idősor vizsgálata általában grafikus szemrevételezéssel kezdődik. Mint azt azonban gyakran tapasztaljuk, egy hosszabb piaci ciklus ilyen módon történő vizsgálata igencsak körülményes. A grafikus ábrázolás gyakran elrejt olyan kisebb periódusokat a sorozatban, melyek különálló piaci időszakokat ölelnek fel. Ezek a kisebb intervallumok a láthatósági gráf algoritmusával vélhetően könnyebben azonosíthatók, ehhez kapcsolódik a negyedik hipotézisem.

A gráfokban általában vannak központi és kevésbé fókuszban lévő szereplők. Gondoljunk első körben a társadalmi hálózatokra. Vegyük alapul a baráti hálózatunkat. Vannak köztük olyan személyek, akik több, míg mások – főleg, ha introvertált személyiségek – kevesebb kapcsolattal rendelkeznek. Azok a személyek, akik sok baráttal rendelkeznek, ún. HUB-ok, központi szereplők a hálózatban. Feltevésem szerint egy pozitív irányban kialakuló tőzsdei ártüske ugyancsak ilyen HUB-ként jelenik majd meg a hálózatban, ráadásul elválasztja azt egy következő piaci ciklustól, mely a láthatósági gráfban klaszterként jelenik meg. Ide vonatkozik a negyedik és ötödik hipotézisem. Utóbbi azzal a feltevessel él, hogy az eljárással azonosíthatók olyan piaci ciklust is, amely kevésbé volatilis és nem rendelkezik ártüskékkel. Ezekben a halmazokban nem, vagy korlátozottan figyelhetők meg HUB-ok.

Végezetül *statisztikai elemzéseknek* vetem alá a HUPX idősoraiból létrehozott gráfok *topológiai mérőszámait* és különböző összefüggések kimutatására teszek kísérletet. Ide kapcsolódva fogalmaztam meg az utolsó hipotézisemet:

H₆: *Egy adott időszak árfolyamának extrém eseményeire és volatilitására az átlagos fokszám mellett a fokszám szórásából lehet következtetni.*

Ezen hipotézisek teszteléséhez és bizonyításához a fokszám mérőszámokat használom majd fel, a köztük lévő kapcsolatot pedig különböző függvényillesztésekkel igyekszem igazolni. Mint az a bevezetésből is sejthető, dolgozatom nem egy tématerület kizárólagos vizsgálatán alapszik. Sokkal inkább tekinthető *interdiszciplináris munkának*, amely ötvözi a

közgazdaságtan, a regionális tudományok, a statisztika és a gráfelmélet ismeretanyagait, melyekből egy *új elemzési módszertan megalkotása a célom*. Értekezésem célkitűzése nem egy megkérdőjelezhetetlen, alapjaiban szilárd és hibátlan módszertan bemutatása. Épp ellenkezőleg; egy új tudományos eljárás bemutatása, gondolatmenetek indítása és lehetőség a tudományos életben történő jövőbeli kutatómunkára. A villamosenergia-piacok kutatásában számos különböző megközelítés, adat és módszer alkalmazásával történtek már jelentős előrelépések. Mindazonáltal komplex hálózatelméletet és módszereket ritkán alkalmaztak árak, legfőképpen elektromos áram árának idősoraira és *ez adja munkám kutatási részét*.

1. A VILLAMOS ENERGIA, MINT TERMÉK

Annak eldöntése, hogy a villamosenergia árának vagy szolgáltatásnak tekinthető a közelmúltig vita tárgyát képezte. Ugyanis a villamosenergia, mint áru vagy szolgáltatás kérdése a villamosenergia-szektor felépítő különböző szakaszokból adódik, úgy, mint nyersanyagtermelés, szállítás, felhasználás. A Kereskedelmi Világszervezet (WTO) keretrendszerének magyarázata szerint a villamosenergia-termelés az Általános Vám-és Kereskedelmi Egyezmény (GATT) árumegállapodása, a villamos energia elosztása és a kapcsolódó szolgáltatások pedig az Általános Szolgáltatáskereskedelmi Egyezmény (GATS) hatálya alá tartoznak. Az Európai Bíróság több alkalommal is kimondta, hogy a villamos energia áru, ezzel véget vetett annak, hogy a villamos energia szolgáltatásnak minősüljön. A 96/92/EK irányelvvel 1996-ban életbe lépett liberalizációs folyamat a tevékenységek szétválasztásához vezetett. A villamosenergia-áru (áru) és a villamosenergia-szolgáltatás (szolgáltatás) külön jogi kezelése miatt a két fogalmat külön kell kezelni. A villamosenergia olyan áru, amellyel könnyen lehet határokon átnyúlóan kereskedni, számos európai irányelv megköveteli az országok közötti összekapcsolt rendszerek kialakítását. Az áru kereskedelmének módja olyan regionális klaszterek létrehozását ösztönzi, amelyek földrajzilag közeli országokban kereskednek villamos energiával. Például egy belga elosztó társaság nagyobb valószínűséggel ad el villamos energiát Hollandiában, mint Görögországban (Bajo-Buenestado és Cahan 2015, Igbinovia et al. 2017, Meeus et al. 2005).

A villamosenergia háromdimenziós heterogenitással jellemezhető, az ára gyorsan változik az egyes pillanatokban, az egyes helyszíneken, valamint a szerződés és a szállítás közötti átfutási idő szerint. Ez a heterogenitás hatással van az energiatermelési technológiák gazdaságosságára. A különböző technológiák (széntüzelésű erőművek és a szélturbinák) eltérő gazdasági értékű villamos energiát képesek előállítani. Ebből kifolyólag a világ több részén olcsóbb szélből villamos energiát előállítani, mint hagyományos energiaforrásokból (pl.: szénből). A heterogenitás figyelmen kívül hagyása torzításhoz vezet. A földgáz, a kőolaj és a villamos energia piaca számos ország gazdaságában fontos szerepet tölt be. Más erőforrásokkal ellentétben ezeknek a piacoknak mindegyike saját átviteli rendszerrel rendelkezik. A fogyasztók és a termelők különböző pontokon helyezkednek el, melyeket ez az átviteli hálózat kapcsol össze, mint nagyfeszültségű elektromos hálózat, mely a villamos energiát az erőművektől és más energiaforrásoktól a fogyasztók felé továbbítja, azonban a helyi piacok közötti vezetékek átviteli kapacitása korlátozott. Az átviteli hálózat optimalizálása számos régióban jelentősen csökkentheti az energiaárakat. Ez sok más áru árának csökkenésével és a

fogyasztás növekedésével járna. A hálózat optimalizálása, a termelő létesítmények optimális elosztása érdekében különböző modelleket használnak. Ilyen modell az ELMOD, amely az európai villamosenergia-piac mérnöki és gazdasági modellje (1-1. ábra). A DC Load Flow megközelítésen alapuló és az európai villamosenergia-piacok alapvető jellemzőit megragadó modell jól alkalmazható a tengeri szélenergia északnyugat-európai villamosenergia-piacra gyakorolt hatásának, valamint az országok közötti és a hálózaton belüli torlódások hatásainak elemzésére (Hirth et al. 2016, Leuthold et al. 2012, Vasin et al. 2017; Bye és Hope 2005, Hirth et al. 2016, Vasin et al. 2017).

A hálózat üzemeltetés és tervezés szempontjából nehéz megtalálni a legolcsóbb megoldást, ennek oka a villamosenergia egyedi jellemzői, melyeket a következőkben foglalkozok össze:

- A villamos energiát valós időben kell szolgáltatni, az ingadozó keresletnek megfelelően. Ugyanis a villamosenergia a primer energia más formáitól (pl. szén, földgáz) vagy az energiahordozóktól (például benzin, metanol, hidrogén) eltérően nem tárolható gazdaságosan (Igbinovia et al. 2017, Von Meier 2006).
- A villamos energia *korlátozottan helyettesíthető*. Ennek eredményeként a valós idejű igények megbízható kielégítéséhez olyan kapacitástartalékokra van szükség, amelyek rugalmasan szétoszthatók az elektromos rendszer terhelés-erőforrás egyensúlyának fenntartása érdekében (Igbinovia et al. 2017, Von Meier 2006).
- Egy nagyobb létesítmény (pl. egy nagyfeszültségű távvezeték, erőmű) váratlan meghibásodása esetén, lépcsőzetes hatásokkal kell számolni, amelyek az összekapcsolt hálózaton keresztül terjednek. Ezáltal akár regionális szintű ellátási problémák is kialakulhatnak. A villamosenergia-rendszer áramszünete súlyos kényelmetlenséget okoz a fogyasztóknak, és jelentős veszteséget jelent a szolgáltatónak. Ezért az áramszünetek megelőzése komoly kihívást jelent a közműszolgáltató számára (Yusuf et al. 2016).
- A kapacitásbővítés, hosszú átfutási időt igényel. Ennek megfelelően a kereslet várható növekedését figyelembe véve, a rendszer kapacitásbővítését már akkor el kell kezdeni, amikor még kapacitástöbblet áll rendelkezésre. A nagyon szűk termelési kapacitás („alultervezés”) a versenyképes villamosenergia-piacokon komoly problémát jelenthet. A villamosenergia-termelők ahelyett, hogy az év nagy részében tétlenül álló új kapacitásokat építenének, jellemzően engedik a villamosenergia-árugrást (Milstein és Tishler 2012).

A fogyasztók számára a villamos energia *nélkülözhetetlen áru* (jószág), melyet viszonylag rugalmatlan kereslet jellemez. A fogyasztó szemszögéből nézve az elektromos áramnak több különböző tulajdonsága van: minőség, megbízhatóság, használati idő, fogyasztás (kWh) mennyiség, maximális igény (kW), környezetvédeleми hatás. A termék (és a kapcsolódó ár) differenciálás egy általános fogalom, amely lehetővé teszi, hogy a villamos energia más szempontjait is dinamikusan értékeljük, nem csak az energiatartalmat. Használható például hálózati tarifák bevezetésére, dinamikus adórendszerre, vagy arra, hogy a fogyasztók kifejezzék preferenciáikat bizonyos termelési típusokkal kapcsolatban. A gyakorlatban a termékdifferenciálás már lehetséges kétoldalú szerződések vagy nagyfogyasztók és -termelők számára megkötött áramvásárlási megállapodások, valamint származási bizonyítványok révén. A kiskereskedők végezhetik a termékdifferenciálást a háztartási fogyasztók irányában azáltal, hogy összegyűjtik a differenciált igényeket (főleg a megújuló energiatermelésre vonatkozóan), és kétoldalú szerződéseket kötnek (Sorin et al. 2018, Sousa et al. 2019). Woo és munkatársai (2014) szerint a termékdifferenciálás értelmezhető fogalom a villamosenergia esetében is. A termékdifferenciálás tovább javíthatja a hálózat működését és tervezését, csökkentve ezáltal a villamosenergia-szolgáltatások költségeit. A villamosenergia termékdifferenciálásának alkalmazása a végfelhasználókat arra készítheti, hogy hatékonyabban elégítsék ki a villamosenergia rendszerrel szemben támasztott igényeiket, és ezt környezetbarát módon tegyék. A liberalizált villamosenergia-piacokon a lakossági fogyasztók kiválaszthatják a preferált szolgáltatót, és különféle villamosenergia-termékek közül választhatnak, beleértve a zöld energia opciókat is. A zöld villamos energia sikeres terméktervezése és marketingstratégiája versenyelőnyt biztosíthat az áramszolgáltatóknak, ugyanakkor hozzájárulhat az energiapolitikai célok eléréséhez. Ez azonban megköveteli az ügyfelek preferenciáinak alapos megértését (Kaenzig et al. 2013, Woo et al. 2014).

Az energiafogyasztás mindemellett a gazdasági növekedéssel is szoros kapcsolatban áll. Ennek következtében manapság egy ország termelési kapacitása és technológiai színvonala egyre inkább függ az energiától és az energiaalapú inputoktól. Bár az energia nem az egyetlen input, amely meghatározza egy ország termelési szintjét és gazdasági fejlettségi fokát, a gazdasági növekedés szempontjából kiemelten fontos. Az országok csak bizonyos mennyiségű energia felhasználásával érhetnek el egy bizonyos szintű gazdasági növekedést. Energia nélkül nem lehetséges árukat és szolgáltatásokat előállítani, a termelési folyamatot fenntartani, vagy ezeket az árukat és szolgáltatásokat megfelelő módon kínálni a fogyasztóknak. Ezért a termelés minden fázisában a kiemelten fontos inputot képező energia beszerzésének megszakítása, vagy

a kedvező feltételek melletti növekvő termelés energiaigényének korlátozott kielégítése szűk keresztmetszet okozhat a gazdaságban. Az országoknak tehát költséghatékony, minőségtudatos, biztonságos módon, kellő mennyiségű energiát kell beszerezniük a fenntartható növekedési célok eléréséhez és életszínvonaluk javításához (Esen és Bayrak 2017). Ezek alapján az energia a gazdasági növekedés kulcsfontosságú forrása, mivel számos termelési és fogyasztási tevékenység alapvető inputként használja az energiát. Tehát az energia a gazdasági fejlődés egyik legfontosabb motorja. Az energia ára, közvetlen vagy közvetett beszerzése hatással van az országok termelési struktúrájára, költségvetési egyensúlyára és versenyképességére a hazai és nemzetközi piacokon. A modern gazdaságokban az ipari növekedés legalább feléért az energia felelős, miközben a termelési költségek kevesebb mint egytizedét teszi ki. A megfelelő és megbízható villamosenergia-ellátás a gazdasági növekedés kritikus eleme. Ha egy állam a növekvő energiafogyasztás ellenére sem tudja növelni az energiatermelést, akkor energiahiány léphet fel. Az energiahiánnyal küzdő gazdaságok előtt két út kínálkozik, vagy elfogadják az energiahiánnyal járó alacsonyabb gazdasági növekedést, vagy megpróbálják a hiányt pótolni (energia import). Az energiát megfizethető áron, időben és elegendő mennyiségben szükséges beszerezni, de kiemelten fontos azt is, hogy a beszerzett energiát hatékonyan képesek legyenek felhasználni. Összességében az energia és az energiaforrások birtoklása a gazdasági fejlődés és a nemzetközi politika szempontjából egyaránt kiemelten fontosak (Asghar 2008; Igbinovia et al. 2017, Woo et al. 2014).

További fontos kérdés, hogy megvalósítható-e az olyan gazdasági fejlődés, amely csökkenő energiafelhasználással, ezáltal csökkenő környezetterheléssel jár. A gazdasági növekedés és az energiafelhasználás szétválasztása egy nagyon fontos környezeti célkitűzés, mely számos stratégiában megjelenik (Szlávik és Szép 2018; Shuai et al. 2019). Gács (2015) szerint kézenfekvő azt gondolni, hogy a gazdasági növekedés az energiafelhasználás növekedésével jár együtt. Ez pedig jelentősen hozzájárul az üvegházhatás fokozódásához, a globális felmelegedéséhez. Ward és munkatársai (2016) szerint kecsegtető feltételezés, hogy az emberi társadalom el tudja választani a gazdasági növekedést (amelyet a bruttó hazai termék (GDP) növekedéseként határoznak meg) a környezeti hatások növekedésétől. Ha egy ilyen szétválasztás lehetséges, akkor az azt jelenti, hogy a GDP növekedése fenntartható társadalmi célnak tekinthető. Munkájukban bemutatják, hogy a szétválasztás fogalma értelmezhető a gazdasági növekedés és a környezeti hatás modelljeivel. Az általuk készített modellben a történelmi adatokat és modellezett előre jelzéseket használták annak bizonyítására, hogy a GDP növekedése végső soron nem választható el az anyag- és energiafelhasználás növekedésétől.

Modellezésük alapján kimutatható, hogy a GDP növekedése végső soron nem függetleníthető az anyag- és energiafelhasználás növekedésétől, kategorikusan bizonyítva, hogy a GDP növekedése nem tartható fenn a végtelenségig. Ha a GDP növekedése, mint társadalmi cél fenntarthatatlan, akkor végső soron a nemzeteknek és a világnak át kell állniuk egy állandó vagy csökkenő GDP-forgatókönyvre. Véleményük szerint félrevezető a növekedés-orientált politikát azzal az elvárással kidolgozni, hogy a szétválás lehetséges (Costanza et al. 2014, Ward et al., 2016).

Szlávik és Szép (2018) munkájában a visegrádi négyek esetében kétféle szétválási tényező alkalmazásával vizsgálta meg a gazdasági növekedés és a végső energiafelhasználás szétválását. Az erőforrásszétválás vizsgálatához az 1990 és 2015 közötti időszakot elemezték különféle indikátorok segítségével. Eredményeik alapján kimutatható, hogy visegrádi négyek körében a rendszerváltást követően erősen csökkent az energiafelhasználás és ezzel párhuzamosan javult a gazdaságok energiaintenzitása. A rendszerváltást követően a gazdaság szektorait jelentős átrendeződés jellemezte, azaz kezdetben a strukturális hatás (gazdasági szektorok átrendeződése) volt a jelentős. Később az intenzitás hatás (termelékenység javulása és technológiai fejlődés) vált jelentőssé (Szlávik és Szép 2018). A szerzők szerint ezekben az országokban hosszú távon akár meg is valósulhat a szétválás, ugyanis csökkenő energiafelhasználás mellett, is megvalósulhat a gazdasági fejlődés. A rendelkezésre álló technológiák, az átalakuló gazdasági struktúra pedig lehetővé teszi, hogy az igények kielégítése kevésbé energiaintenzív módon történjen meg. A szerzők felhívják a figyelmet arra is, hogy a szétválás nem egy állandósult folyamatnak tekinthető, a pozitív tendencia akár meg is fordulhat. Például egy gazdasági válság, mint amilyen a 2008-2009-es válság volt, negatív irányú szétválást eredményezhet, ennek eredményként az energiafelhasználás és a gazdasági növekedés nem válik szét a gazdaságokban (Szlávik és Szép 2018).

2. VILLAMOSENERGIA-IPARI REFORMOK HAZÁNKBAN

Az elmúlt három évtized folyamán számos ország tett lépéseket a villamosenergia kereskedelem liberalizálására, a jogállamiság, a tulajdonjogok és a kormányzás szélesebb körű megerősítése érdekében, ennek megfelelően különböző strukturális reformokat vittek véghez. Az ilyen reformokat azzal a céllal kezdték meg, hogy növeljék a gazdaság hatékonyságát és kibocsátását. A villamosenergia-piacok esetében is szükségessé váltak ezek a reformok, a nagyobb működési hatékonyság és az általa generált költség- és árcsökkenés elérése érdekében. A villamosenergia-piac liberalizációja nagyon összetett és hosszú távú folyamat (Joskow 2008, Kamiński 2009).

Joskow (2008) a villamosenergia-piac liberalizációjának előfeltételei között a következőket határozta meg:

- Termelés és a kiskereskedelem vertikális leválasztása
- Likvid nagykereskedelmi piac létrehozása
- Hálózathoz való hozzáférés biztosítása bárki számára
- Szabályozhatóság létrehozása
- Verseny feltételeinek megteremtése
- Privatizáció (inkumbens vállaltok létrehozása)
- Monopol pozíciók megszüntetése

Az Európai Unió (EU) az energiaszektor az egyik fő politikai prioritásként kezeli. A megbízható és hosszú távon fenntartható, a vállalkozások és a fogyasztók számára egyaránt elfogadható áron biztosított energiaellátás kulcsfontosságú az európai gazdaság szempontjából. A múltban az energiaipar vertikálisan integrált monopóliumként, a legtöbb tagországban állami tulajdonban volt. A villamosenergia-ellátás elsődleges alkotóelemeit (termelés, szállítás, elosztás és kiskereskedelmi ellátás) vertikálisan integrálták, és az esetek többségében egy állami szerv tulajdonában voltak. A vertikálisan integrált monopóliumok iránti növekvő ideológiai és politikai ellenszenv és a más iparágakban elért sikerek liberalizációs kezdeményezésekhez vezettek az energiaiparban is. A vertikálisan integrált közszolgáltatásokat szétválasztották és megszüntették a termelésbe és az ellátásba való belépés akadályait, a verseny megteremtése és a villamosenergia-ipar versenyképességének növelése érdekében. Az első liberalizációs irányelveket az EU-ban 1996-ban (villamos energia) és 1998-ban (gáz) fogadták el, és ezeket át kellett ültetni a tagállamok jogrendszerébe (1998-ig - villamos energia esetében, 2000-ig gáz esetében). A második EU-liberalizációs irányelvet 2003-ban fogadták el, és a tagállamoknak

2004-ig kellett átültetniük a nemzeti jogrendbe néhány rendelkezés csak 2007-ben lépett hatályba. A 2009-ben elfogadott harmadik villamosenergia-irányelv megerősíti a 2003-as irányelv által kezdeményezett tendenciákat, általános iránymutatásokat ad az ágazat számára és tovább erősíti a fogyasztóvédelmet, az innovációt, és megkísérli a nemzeti rendszerek egyesítését egy közös európai villamosenergia-piacon keretein belül. Az EU-irányelv a következő fontos pontokat tartalmazza: piacnyitás, harmadik felek belépésének biztosítása (TPA elv) és a rendszerüzemeltető megválasztása (Streimikiene et al., 2013, Blaggrave és Furceri 2021).

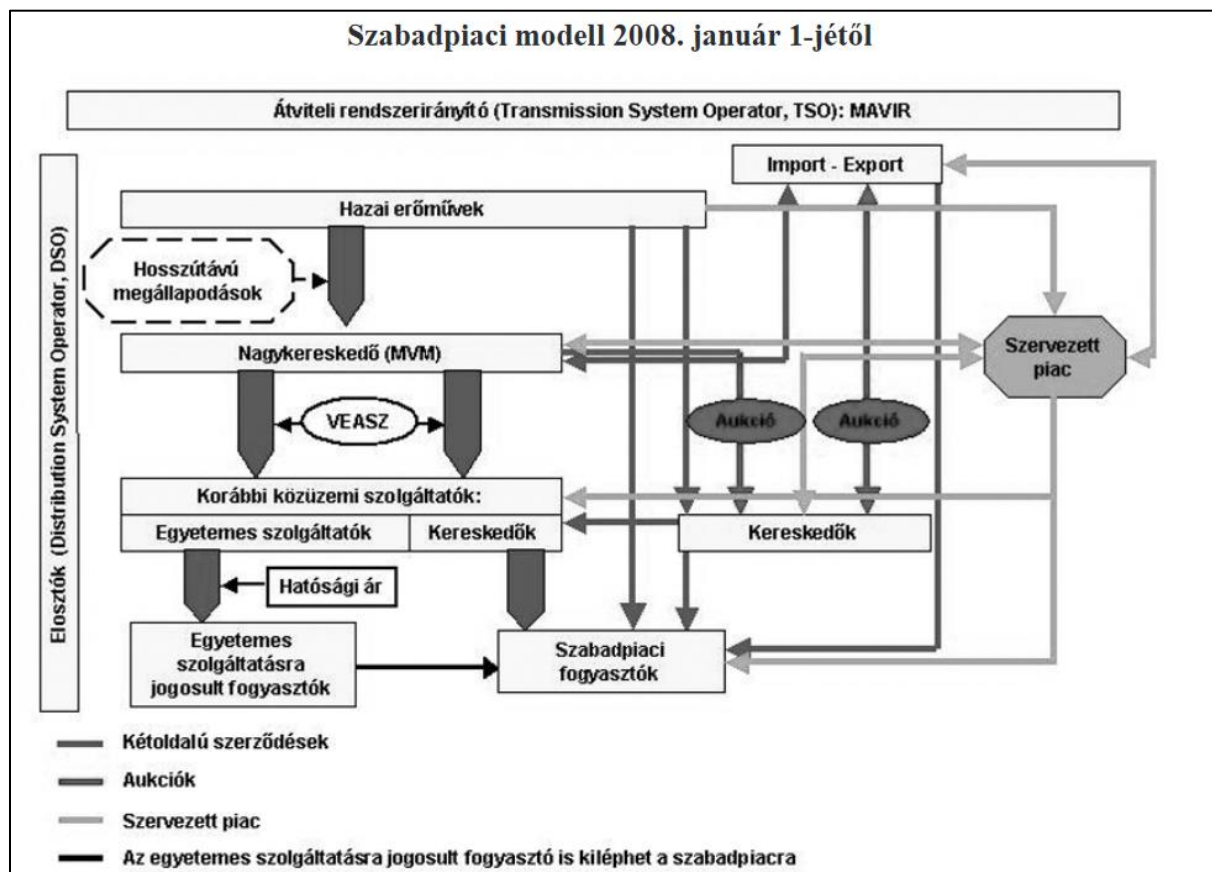
Az 96/92/EK irányelv a tagállamok villamosenergia-piacának lassú, fokozatos és részleges megnyitását tűzte ki célul, hogy egyre több termelőnek és fogyasztónak lehetősége legyen szabadon tárgyalni a villamos energia adásvételéről. Az első irányelvet felváltó új 2003/54 /EK irányelvvel a folyamat felgyorsult, és minden nem lakossági fogyasztó jogosult lett 2004. július 1-jétől, minden lakossági fogyasztó jogosult lett 2007. július 1-jétől, szabadon megválasztani a szolgáltatót. A szállítókat és a termelőket ezzel együtt biztosítani kell arról, hogy hozzáférnek a hálózathoz, annak érdekében, hogy a villamosenergia-tranzakciókat le tudják bonyolítani. Az első irányelv 1998-as bevezetése óta, amely megnyitja az EU energiapiacait a verseny előtt, az energiaszektor helyzete drámai módon megváltozott a tagállamokban. Az EU energiapolitikájának három pillére (versenyképesség, energiaellátás biztonsága, környezeti fenntarthatóság) közötti koherencia elérése szükséges a jövőben (Streimikiene et al., 2013).

A magyarországi villamosenergia-piacon is jelentős átalakulások történtek az elmúlt évtizedekben. A rendszerváltást megelőző időkben a magyar villamosenergia-piacot egyetlen szereplő a Magyar Villamos Művek Tröszt (MVMT) uralta, ez a vállalat egyben végezte a termelést, a szolgáltatást, a kereskedést és látta el a rendszerirányítói feladatokat. A 1990-es évek elején megkezdődött a MVMT feldarabolása és a feladatok külön vállalatokba történő kiszervezése. A részvénytársaság formájába átszervezett kisebb vállalatokat 1995-ben privatizálták, melynek során fontos cél volt, hogy a vállalatok tőkeerős, szakmai befektetők tulajdonába kerüljenek, az ellátás biztonságának biztosítása érdekében. A folyamat 1998-ra zárult le, ekkora minden áramszolgáltató és az erőművek jelentős része (kivéve paksi és a vértesi) magántulajdonba kerültek. 1994-ben megalakult a Magyar Energia Hivatal, amely a Gazdasági Versenyhivatallal közösen szabályozza az iparágat, felügyeli a piacot. Az állami tulajdonban lévő Magyar Villamos Művek (MVM) cégcsoport birtokolja a paksi és a vértesi erőművet, valamint több más erőműben is részesedéssel rendelkezik. A privatizációt követően az MVM cégcsoport köré szerveződött a hazai villamosenergia-piac. Az így létrejött modellt

egyvásárlós modellnek hívjuk, ugyanis csak az MVM rendelkezett megfelelő jogosultságokkal ahhoz, hogy a területi szolgáltató társaságokat villamos energiával lással el. Az erőművek pedig a megtermelt villamos energiát csak az MVM részére értékesíthették. Ez a modell 2002-ig működött. A rendszerirányítási feladatokat végző vállalatot (MAVIR) 2000-ben hozták létre, és az Unió ajánlásoknak megfelelően állami tulajdonban, független vállalként működött (Gáspár és Závecz 2011, Sztankó 2011).

A Magyar Energia Hivatal fokozatosan készítette elő a piacnyitást. Ennek első lépéseként 2003 és 2007 közötti időszakban az úgynevezett kettős piaci modell keretében működött a hazai villamosenergia-piac. Ebben a modellben egy versenypiaci és egy regulált szegmens egyszerre van jelen. A hálózati engedélyes társaság kötelezve van arra, hogy hálózati hozzáférést biztosítson bármely piaci szereplőnek. Ebben a modellben a fogyasztók egy részének (6,5 GWH/év fogyasztás felett) lehetőségük van kilépni a szabadpiacra és ott tetszőleges kereskedőtől egyedileg kialakított áron és feltételek mellett villamosenergiát vásárolni. Ezeket a fogyasztókat feljogosított fogyasztóknak nevezik és 2004-től, minden nem lakossági fogyasztó részére lehetővé tették a piacra lépést. A regulált szektorban továbbra is hatósági áron vehették a fogyasztók az áramot a közüzemi szolgáltatóktól. 2006-ban a MAVIR az MVM csoport tulajdonába került, ezzel együtt a rendszerirányítói és az átviteli jogosultság az MVM-hez került, kialakult az átviteli rendszerirányítói rendszer (TSO). A változásoknak köszönhetően szabadpiaci szegmensben gyors fejlődést történt, számos fogyasztó lépett át a szabadpiacra (Gáspár és Závecz 2011).

Az EU célkitűzéseivel összhangban 2007-ben elfogadásra került villamosenergia törvény (2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról) lehetővé tette a piacnyitást, a piaci liberalizációt. A 2008 január 1-jével hatályba lépő törvény értelmében létrejött a szabad villamosenergia-piac. Ennek eredményeképpen minden hazai villamosenergia fogyasztó 2007 július 1. után saját maga választhatja meg kitől szeretne villamosenergiát vásárolni, ezáltal a lakossági fogyasztók is feljogosított fogyasztókká váltak (Gáspár és Závecz 2011, Tóth 2006).



(forrás: Gáspár és Závecz 2011)

A kettős piaci modell helyét a szabadpiaci modell vette át (2-1. ábra). Ebben a rendszerben eltűnt a közüzemi szegmens, helyét az egyetemes szolgáltatás vette át. Ennek keretében a jogosult fogyasztók a MEH által megszabott és felügyelt áron vásárolhatja az egyetemes szolgáltatótól a villamos energiát. A hatósági árak az érzékeny fogyasztók ellátásának biztosítása céljából továbbra is megmaradtak. Az új modell azt is eredményezte, hogy a fogyasztók jelentős részének kötelező volt kilépni a versenypiacra. A szabadpiaci modellben a szabadpiaci fogyasztók bármely kereskedőtől vagy akár közvetlenül az erőműtől is megvásárolhatják az áramot. Az átviteli hálózat továbbra is a MAVIR tulajdonában van, amely az MVM Csoportba van integrálva. Az import és a megtermelt villamosenergia jelentős része továbbra is a MVM Csoporton keresztül jut el a fogyasztókhoz, így az MVM szerepe a nagykereskedelemben meghatározó. Az MVM az erőművekkel a korábbi hosszú távú megállapodások (HTM) helyett középtávú, termékalapú megállapodásokat kötött. Az MVM befolyásának csökkentése és a piac kiegyenlítése érdekében a MEH az MVM-et kötelezte, hogy a kapacitásainak egy részét aukciók keretében értékesítse. Annak érdekében, hogy a nagykereskedelmi verseny lehetőségei megteremtődjenek különösen fontosak voltak az

importkapacitásokhoz való hozzáférések biztosítása és a magyar áramtőzsde (HUPX) létrejötte. A szabadpiaci modell bevezetésével Magyarország teljesítette az Európai Unió előírásait (Gáspár és Závecz 2011, Sztankó 2011, Kácsor et al 2019).

Annak ellenére, hogy Magyarország nagy utat tett meg a rendszerváltás óta a nemzetközi piaci integráció felé, valamint teljesítette az Európai Unió elvárásait, továbbra is számos probléma nehezíti a hazai villamosenergia-piac hatékony működését. A legfontosabb problémák a következők a hazai villamosenergia-piaccal (Gáspár és Závecz 2011, Kácsor et al 2019):

- Transzparens referenciaárak hiánya
- Stabíl szabályozási környezet hiánya
- Gazdasági szereplők ellenállása, passzivitása

A verseny térnyerése egy olyan piaci mechanizmust mozdíthat elő, amely az alacsony hatékonysággal üzemelő erőművek forgalomból való kivonását eredményezné és egy olyan energiatermelési mix alakulhatna ki, amely jobban igazodik a piaci igényekhez. Teret nyerhetnek a gazdaságilag hatékonyabb energiapiaci beruházások. Ennek eredményeképp pedig az energiatermelésben részt vevő erőművek száma az optimális méretre szűkülhet, ami a magyarországi piacon annyit jelent, hogy a csúcsidőszaki termelés 20%-ának megfelelő kapacitástartalék állna rendelkezésre (REKK, 2010). A hazai piacot mindössze egyetlen befolyásos nagykereskedő és néhány erőmű alkotja. A kisszámú versenyzővel rendelkező piacon, a valódi verseny kialakulása nehézkes. A transzparens referenciaárak hiánya nem segíti elő azt, hogy az árak korreláljanak a nemzetközi és régiós tőzsdék termékeinek árával. A versenyző források hiánya komoly gátat szab a hiteles árjelzésnek és a piac likviditásának. Magyarországon a villamosenergia-piac esetében a szabadpiac létrehozása egy mesterséges, felülről irányított folyamat részeként jött létre. A privatizációt követően erőműveket kizárólag az MVM által kiírt tenderek és értékesítési szerződések által volt lehetőség létrehozni. A kisebb fogyasztók nem képesek proaktív és tudatos viselkedésre, ennek köszönhetően a közüzemek és a kis- és középvállalkozások jelentős része ameddig tudott maradt a közüzemi keretek között. A szabadpiac nem elég vonzó az átlagos fogyasztók számára. A hazai szabályozási környezet nem elég kiszámítható, a villamosenergia-piacot a szabályok gyakori változása jellemezi. Ezek a körülmények pedig nem teszik lehetővé a hosszú távú befektetői döntéseket. A hálózati veszteségek sem csökkennek érdemben, ami további költségeket ró a vállalatokra (Gáspár és Závecz 2011, Kácsor et al 2019). A piaci szerkezet és hálózat az utóbbi években sokat fejlődött, ám a piaci szereplőkre mind a mai napig jellemző, hogy amennyire csak lehet, megmaradnak

az állami szabályozás és oltalom berkeiben, ami ugyancsak a piacfejlődés lassulását eredményezi.

Az áttekintett szakirodalmak alapján jól látható, hogy Magyarországon a korábban vertikálisan integrált monopóliumok szétválasztása a rendszerváltást követő években megtörtént. Megalakult a szabályozó hatóság, mely felügyeli a villamosenergia-piacot. A villamosenergia-piac liberalizációja az Európai Unió csatlakozást követően megkezdődött s mára minden országban végbement. Emellett a regionális piacon Ausztria már korábban az EU tagja volt, így ott a piac liberalizációja már korábban elkezdődött. A folyamatok meghatározó eleme volt az Európai Unió 2003/54/EK irányelve, mellyel összhangban születtek meg a nemzeti energiatörvények. A liberalizációs folyamat azonban, Ausztria kivételével a régióban az országok egyikében sem tekinthető teljesnek, hiszen a korábbi monopóliumok továbbra sem szűntek meg, a piaci szereplők alacsony száma akadályozza az optimális működést, a fogyasztók nem ismerik a lehetőségeiket, ennek következtében nem is használják azokat. Számos jogi és bürokratikus akadály nehezíti a liberalizált piacok létrejöttét. Mindazonáltal összességében megállapítható, hogy elkezdődött Közép-Európában is egy olyan folyamat, mely a villamosenergia-piac teljes liberalizációjához vezet, valamint az áramtözsdékre való, egyre alacsonyabb belépési korlátok is nagy fejlődést hozhatnak a jövőben.

3. A REGIONÁLIS VILLAMOSENERGIA-PIAC SZERKEZETE

A villamosenergia-piac alapvetően két szinten működik. A nagykereskedelmi piac az első szektor magába foglalja az áramtermelőket és a nagykereskedelmi vásárlókat (3-1. ábra). A közvetlen fogyasztók is működhetnek rajta, de a részvétel költségei, az ellátás kiegyensúlyozásának problémája, a telekommunikációs és számítógépes rendszerek birtoklásának szükségessége és a személyi költségek hatékonyan korlátozzák ezt a részvételt a nagyon nagy villamosenergia-fogyasztókra. A kiskereskedelmi piac a második szint, ahol az árban, a szállítási feltételekben és a kiegészítő szolgáltatásokban egymással versengő energiatermelők villamosenergiát kínálnak a fogyasztóknak. A villamosenergia-piac sajátosságait a villamosenergia-rendszer folyamatának természetes sajátosságai okozzák. Észrevehető, mint a villamosenergia-piac és az egyéb árupiacok közötti különbség (Gerse 2014, Teufel et al. 2013). Ezek a különbségek a következők (Teufel et al. 2013):

- a kereslet és a villamosenergia-termelés folyamatos és pontos kiegyensúlyozásának biztosítása szükséges
- a termék iránti kereslet alacsony (rövid időn belüli) árrugalmassága jellemző
- a termék (villamosenergia) esetében csak rövid távú tárolásra van lehetőség
- a meghibásodás stratégiai jelentőségű, az energiaellátó rendszer működtetése szempontjából
- a piac monopolizálásának lehetősége fennáll a villamosenergia-rendszer sajátos fizikai jellemzőinek miatt

Az villamosenergia-piac sok esetben nem felel meg a versenypiac feltételeinek. Számos országban jellemezték és még mindig jellemzik a természetes monopóliumok. A villamosenergia egyedisége és a szállítás műszaki feltételeinek jellemzői még a fejlett országokban is elősegítik a monopolisztikus szerveződések létrejöttét, melyhez sok esetben az állami felügyeleti is hozzájárul. Az ágazat saját magát is sok esetben természetes monopóliumként határozza meg, indokolva a verseny hiányát az energiaágazatban. Ez a felállás pedig számos negatív következményt hozott létre. A helyzet megoldása egy új gazdaságpolitikai doktrínát kívánt, amelynek célja a liberalizáció és a verseny kialakítása az energiapiacra (Brzeziński et al. 2013, Slusarczyk et al. 2013).

A nagykereskedelmi villamosenergia-piacnak három fő típusa van, különös tekintettel a szervezet működésére (Gerse 2014):

- Centralizált piac (központi) - villamosenergia és kiegyenlítő ajánlatok integrált csomagjával, amely központi, leggyakrabban kötelező kereskedelmi piac.
- A tőzsde - egy speciális, többnyire nem kötelező villamosenergia-tőzsdei és kiegyensúlyozó rendszeren alapul, amely a kínálati oldalon és az elosztórendszer-üzemeltető felé tett ajánlatokon alapul.
- Decentralizált piac - struktúrájában az energiapiac működtetésének alapját az elosztórendszer-üzemeltetők, valamint a kereskedelmi és műszaki szolgáltatók képezik.

A kiskereskedelmi villamosenergia-piac működésének alapelvei viszonylag egyszerűek. A szabályozott kiskereskedelmi piac területén a célszemélyek a végső fogyasztók. Az elosztótársaságok biztosítják az energiaellátást ezeknek az ügyfeleknek a hatóság által jóváhagyott tarifák szerint. E piac versenyterületén azonban az áramfogyasztóknak joguk van megválasztani szállítójukat a TPA (harmadik fél hozzáférése) elv alapján. Megvásárolhatják az áramot a szállítóktól, amelyek elosztótársaságok vagy közvetítők az energia kereskedelemben (kereskedelmi társaságok, tőzsdék), vagy közvetlenül a termelőktől. Az energiaellátás díját annak az energiaipari vállalatnak fizetik, amely szerződést köt az ügyféllel (Brzeziński et al. 2013, Slusarczyk et al. 2013).

A villamosenergia-piac fő célja olyan feltételek megteremtése, amelyek teljesítése lehetővé teszi a fogyasztók számára, hogy versenypiacon vásároljanak energiát. Másrészt az erős, hatékony és versenyképes piac megteremtése nem könnyű. Összefügg azzal, hogy a villamosenergia-hálózatok tulajdonosaként és használóiként működő hálózati társaságokat kötelezni kell arra, hogy engedélyezzék mások számára a hálózat használatát az átviteli szolgáltatási díj ellenében. Ezt nevezik az energiahálózatokhoz való harmadik felek hozzáférési elvének (TPA), amely lehetővé teszi a szolgáltatások bármely harmadik fél általi használatát. A kötelező TPA elv nélkül nem lehet megtörni a villamosenergia-hálózattal rendelkező vállalatok természetes monopóliumát az áramellátási piacon. A hálózat harmadik fél általi hozzáféréseinek elvével összhangban a szállítónak lehetősége van arra, hogy villamos energiát küldjön bármely ügyfélnek. Ennek az ügyfélnek lehetősége van bármelyik energiaszolgáltatót választani, beleértve a meglévő szolgáltatót is, amely a hálózat tulajdonosa (Brzeziński et al. 2013, Streimikiene et al. 2013).

Megállapítható, hogy a villamosenergia-piacra lépve az ügyfeleket két fő kategóriába sorolják: nem tarifás és tarifás fogyasztók. Az elsőnek joga van megválasztani a villamosenergia-szolgáltatót és igénybe venni a tarifaváltást. A második csoport villamos energiát vásárol a helyi elosztótársaságoktól, és a hatóság által jóváhagyott tarifák szerint fizeti ki azt. Feltételezhető,

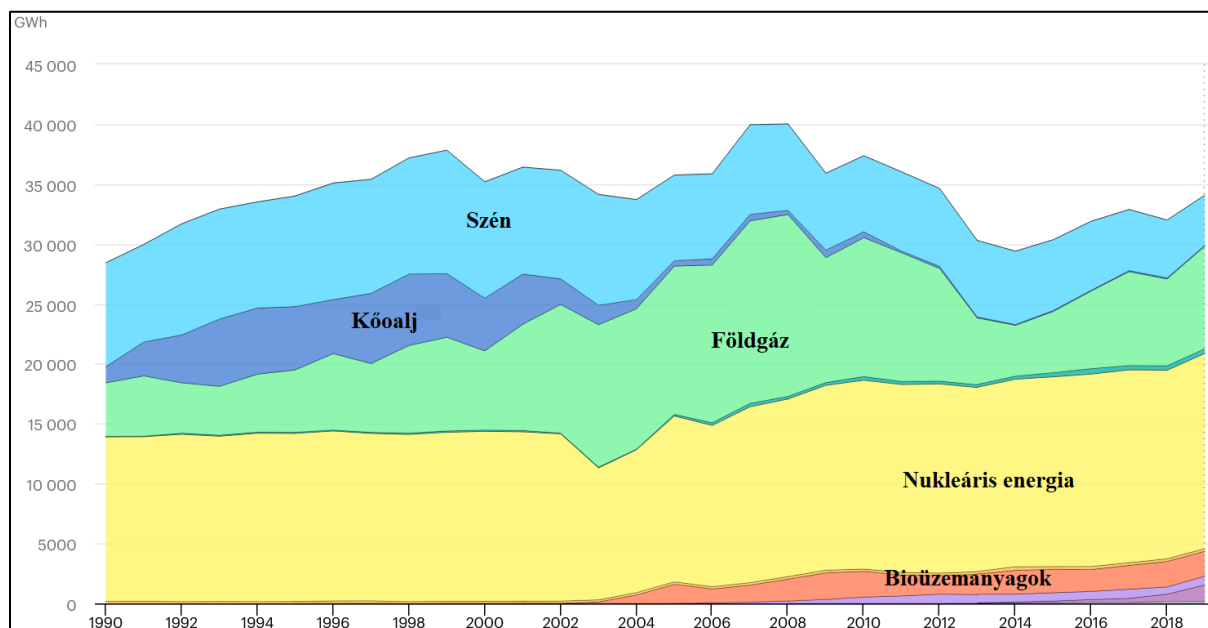
hogy a villamosenergia-piac fejlődésével és a TPA kiterjesztésével a jövőben a tarifás fogyasztók száma csökken. A villamos energia értékesítéséből származó bevételek stabil szintjének fenntartása érdekében a hálózati és a kereskedelmi társaságok jelentősen fokozzák tevékenységeiket a nem tarifás piac területén, amely lehetővé teszi a villamosenergia-ellátáshoz kedvezőbb árakon való hozzáférést (Kökény és Hortay 2020, Streimikiene et al. 2013).

Magyarországon 2007. június 25-én a parlament elfogadta a 2007. évi LXXXVI. törvényt (villamosenergia-törvény), mely lehetővé tette a szabadpiac megvalósulását. A magyar villamosenergia-szektor az Európai Unió követelményeinek megfelelően teljesen szét van választva. Nagyrészt privatizálták a termelő, az elosztó és az ellátó szektort. A villamosenergia-piac ezen ágazatai liberalizáltak, és ennek eredményeként a végfelhasználók szabadon választhatják meg beszállítóikat. Magyarország villamosenergia-rendszere jól csatlakozik a legtöbb szomszédos országhoz. Az import versenyben áll a hazai villamosenergia-termeléssel, és az ország az utóbbi években egyre jobban függ a villamosenergia-importtól, miközben a hazai termelés csökken. A Szlovák Köztársaság a legnagyobb villamosenergia-importőr Magyarországra, a teljes nettó import körülbelül ötven százalékát adja, amelyet Ukrajna követ. Az import elsősorban Magyarország északkeletre fekvő régióiból származik, míg az export a délnyugati régiókba irányul. Horvátország importálja Magyarország teljes exportjának megközelítőleg a hetvenöt százalékát, majd Szerbia következik kb. 20 %-kal. Jelenleg Magyarország villamosenergia-termelési kapacitása elégségesnek tűnik a kereslet kielégítésére, a termelő létesítmények közül sok a közeljövőben leállításra vagy korszerűsítésre szorul. Az elavult létesítmények és a növekvő fosszilis tüzelőanyagok ára azt jelenti, hogy sok ilyen létesítmény nem üzemeltethető gazdaságosan teljes kapacitással a jelenlegi piaci körülmények között. Ehelyett egyre inkább a szomszédos országokból importált villamos energiára támaszkodik az ország. A MAVIR a szomszédos országok átvitelrendszer-üzemeltetőivel együtt megkezdte a szűk keresztmetszetek felszámolását a kapacitás növelése érdekében (IEA 2017, Szuchy 2018, Vincze 2009).

A vertikálisan integrált állami tulajdonú Magyar Villamos Művek Zrt. (MVM) szerkezetátalakítását és részleges privatizációját követően több termelő társaság, hat regionális elosztó társaság és egy szállító társaság jött létre. Míg a magyar villamosenergia-ágazatban a magánberuházások jelentősek voltak (főleg a termelésben és az elosztásban), az állami tulajdonban lévő MVM továbbra is a piac legnagyobb szereplője, amely ellenőrzi Magyarország termelési kapacitásának jelentős részét. A meghatározó hazai erőművek termelésük nagy részét az MVM-mel kötött középtávú szerződések keretében értékesítik.

Az erőmű termelésének körülbelül egyötödét rövid távú (jellemzően egy éves) szerződésekkel értékesítik közvetlenül a versenypiacon. Az MVM erőműszerződéseinek időtartama általában öt-nyolc év. Az MVM viszont a hazai erőművekből keretszerződések, úgynevezett villamosenergia-ellátási szerződések alapján vásárolt villamos energia mintegy felét értékesíti az egyetemes szolgáltatóknak, akik az egyetemes szolgáltatásra jogosult fogyasztókat (háztartások, kisvállalkozások, közintézmények) látják el. Az MVM az erőművek által termelt villamos-energia fennmaradó hányadát kétoldalú szerződések vagy nyilvános kapacitás aukciók útján adja el a kereskedőknek. A villamosenergia-törvény alapján a villamos energia ára általában a piaci feltételektől függ. A kormány azonban a jogalkotási mechanizmusok alapján meghatározza a megújuló energiaforrásokból előállított villamos energia kötelező átvételi árait és a rendszerhasználati díjakat. Az energiacegéket, különösen az elosztórendszer-üzemeltetőket és az egyetemes szolgáltatókat a kormány folyamatosan nyomás alá helyezi annak érdekében, hogy csökkentsék a háztartások, valamint a kis- és középvállalkozások végfelhasználói árait (IEA 2017, Szuchy 2018, Vincze 2009).

3-1. ÁBRA: ÁRAMTERMELÉS FORRÁSOK SZERINT MAGYARORSZÁGON 1990-2019 KÖZÖTT



(Forrás: <https://www.iea.org/countries/hungary>)

Magyarország áramtermelésében a nukleáris energia szerepe meghatározó, ezt a földgáz és a szén alapú villamosenergia-elállítás követi. A szén szerepe várhatóan a jövőben csökkenni fog, míg a nukleáris energia szerepe a Paks II. bővítésnek köszönhetően előreláthatóan növekszik. A megújuló forrásokból termelt villamosenergia-jelentősége a 2000-es évek elejétől növekvő

tendenciát mutat, különösen a biomassza alapú villamosenergia-termelés esetében (3-1. ábra; a további vizsgált országok ábrái a mellékletben található.) (IEA 2017).

A termelő (a paksi atomerőmű kivételével) és az elosztó társaságok többsége külföldi tulajdonban van. Az állami tulajdonban lévő (korábban monopóliummal rendelkező) MVM közüzemi vállalat, bár szétválasztva, mégis a piac jelentős részét ellenőrzi, beleértve a paksi atomerőművet és az átvitelrendszer-üzemeltetőt (MAVIR ZRt.). Az állami tulajdonban lévő MVM leányvállalata, a MAVIR birtokolja és üzemelteti az átviteli rendszert. A MAVIR felelős a határokon átnyúló átviteli kapacitások kezeléséért. A villamosenergia-törvény és a kapcsolódó másodlagos jogszabályok értelmében a szállítási hálózathoz hozzáférést harmadik felek (kereskedők, elosztórendszer-üzemeltetők, végfelhasználók) megkülönböztetésmentesen kaphatnak, ezt szabályozott tarifák alapján biztosítják. A MAVIR a nagykereskedelmi piac adminisztrátora is. A piacra jutási feltételek megkövetelik, hogy minden piaci szereplő csatlakozzon egy úgynevezett „mérlegkörhöz”. A „mérlegkör” a termelők, a kereskedők és a végfelhasználók számviteli egysége, amelyben az elfogadott mennyiségek kiegyenlítik az átvételt és a betáplálást. A termelők és kereskedők létrehozhatják saját mérlegköreiket, vagy csatlakozhatnak egy meglévő körhöz. Minden mérlegkörnek rendelkeznie kell egy mérlegkör vezetővel (általában kereskedővel vagy termelővel), aki felelős a kiegyenlítő díjak MAVIR-nál történő rendezéséért. A MAVIR felelős a termelés és a kereslet kiegyensúlyozásáért a teljes átviteli rendszerben, és szükség esetén kiegyenlítő intézkedéseket hajt végre a piaci szereplőkkel, beleértve az MVM-et is, a kereslet és kínálat összehangolása érdekében. A nagykereskedelmi villamosenergia-szektor működését a villamosenergia-törvény értelmében liberalizálták, felszámolva a korábbi közüzemi szektort. Az engedéllyel rendelkező kereskedők jogosultak villamos energiát vásárolni termelőktől, más kereskedőktől vagy külföldről. Jogosultak villamos energiát értékesíteni a végfelhasználóknak, más kereskedőknek vagy külföldön. Jellemző, hogy az elsődleges kereskedő a beszerzésének jelentős részét a kereskedelmi szektoron belül másodlagos kereskedelem formájában értékesíti újra, mielőtt eladná a fogyasztóknak vagy exportként értékesítené azt. Míg korábban a villamosenergia-kereskedők általában leányvállalatok voltak, amelyeket az elosztórendszer-üzemeltetők alapítottak, hogy jelen lehessenek a piac nyitott szegmensében, addig a piac liberalizációja és a Magyar Energia Tőzsde (HUPX) létrehozása óta a kereskedők száma folyamatosan növekszik (Csipkés 2019, Kerekes et al 2019, IEA 2017).

Magyarország hat elosztási zónájában három vállalat működik egyetemes szolgáltatóként: az E.ON Energetikai Szolgáltató, a DÉMÁSZ (amelyet az EDF Csoporttól vásárolt az NKSZ

Nemzeti Közüzemi Szolgáltató Kft. 2017 elején), valamint az RWE tulajdonú ELMŰ-ÉMÁSZ Energetikai Szolgáltató. További nagyjából 80 vállalat rendelkezik engedéllyel a végfelhasználók áramellátására, és kb. ugyanennyi kereskedő csak nagykereskedelmi tevékenységre jogosult. A kereskedők és a végfelhasználók közötti szerződéseket nem szabályozzák, így a felek szabadon meghatározhatják az ilyen megállapodások időtartamát, árát és egyéb rendelkezéseit. Az MVM Csoport továbbra is meghatározó szereplő a villamosenergia nagykereskedelmi piacán (Csipkés 2019, Kerekes et al 2019, IEA 2017).

A villamosenergia-törvény előírja, hogy a MAVIR-nek átlátható és megkülönböztetésmentes alapon kell hozzáférést biztosítania a piaci szereplőkhöz, amelynek részletes szabályait a vonatkozó másodlagos jogszabályok és a Magyar Hálózat Működési Szabályzata (Grid Kódex) rögzítik. A Grid Kódexnek megfelelően a MAVIR rendszeresen aukciókat folytat a rendelkezésre álló, határokon átnyúló átviteli kapacitásról. A kapacitást egy évre, hónapra, hétre vagy napra árverezik. A MAVIR minden határon átnyúló kapacitásra aukciót szervez a felajánlott kapacitás felosztása érdekében. Az elosztói tarifák szabályozás alá esnek. A tarifákat a Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hatóság (MEKH) készíti el és terjeszti elő a jogszabályoknak megfelelően. Az egyetemes szolgáltatóknak a szabályozó hatóság által elfogadott, a tényleges költségek alapján meghatározott tarifákkal rendelkező csomagokat kell felajánlaniuk az arra jogosult végfelhasználóknak, és kötelesek ilyen szállítási szerződéseket kötni a végfelhasználó kérésére. A Gazdasági Versenyhivatal hatáskörrel rendelkezik arra, hogy a versenytörvény alapján szankciókat szabjon ki a villamosenergia-ágazat versenyellenes gyakorlataira. Azonban a villamosenergia-piacon jelentős piaci erővel rendelkező inkumbensek azonosítása és a vonatkozó különleges intézkedések bevezetése kizárólag a szabályozó hatóság, az MEKH hatáskörébe tartozik (Kerekes et al 2019, IEA 2017, Szuchy 2018).

Szlovákiában 1996 óta az áramfogyasztás viszonylag stabil, 27.386 és 30.103 GWh között mozog. Az áramtermelés azonban sokkal ingatagabb. 1997 és 2002 között folyamatosan növekedett, és a nukleáris erőműveknek köszönhetően az 1999-2006 közötti időszakban a Szlovák Köztársaság áramexportórrá lépett elő. Az import jelentősége 2013 óta nő. A rendszer azonban képes kiegyenlíteni a különbséget a szomszédos piacokkal (főleg Csehországgal és Magyarországgal) való kapcsolatoknak köszönhetően. Lengyelországgal és Ukrajnával szintén jelentős mennyiségű áramot cserélnek, miközben Szlovákia és a szomszédos Ausztria átviteli rendszerei nincsenek összekapcsolva. Szlovákia 2014 novemberében a Cseh Köztársaság, Magyarország és Románia részvételével bekapcsolódott a 4MMC piaci szerveződésbe (Janda 2018).

A Szlovákiában 2007-ben végrehajtott vertikális szétválasztás óta verseny alakult ki az áramszolgáltatók között, és a fogyasztók szabadon választhatnak. A villamosenergiával árucikként kereskednek a tőzsdén kívüli piacon vagy tőzsdén. A termékek kereskedése általában havi, negyedéves és éves csomagokban, határidős ügyletekkel, vagy spot piacon történik. Szlovákiában a villamosenergia árát kizárólag a piaci folyamatok határozzák meg anélkül, hogy a nagykereskedelem szintjén bármilyen szabályozás lenne érvényben. A végső fogyasztók kiskereskedelmi ára azonban több összetevőből áll, a nagykereskedelmi villamosenergia-ár 45 %-ot tesz ki, a végösszeg tartalmazza a villamosenergia-átviteli rendszeren keresztül történő szállítás során bekövetkező veszteségek tarifáját és a rendszerszolgáltatások díját is. Ezenkívül tartalmazza a rendszerüzemeltetési díjakat (rendszerüzemeltetőknél felmerült költségek), valamint a Nemzeti Nukleáris Alapnak fizetendő illetéket. A végfelhasználók számára biztosított villamosenergia ára magában foglalja a járulékos szolgáltatások fedezéséhez szükséges rendszerdíjakat (TSO), a megújuló energiaforrások használatához nyújtott támogatásokat és a hazai barnaszén felhasználásával történő villamosenergia-termelést. Az elemek azonban nincsenek azonos súllyal a tarifában. A megújuló tételek 67 %-ot képviselnek 2017-től. Az átviteli és elosztói díjakat, valamint a rendszer díjakat a Hálózati Iparágak Szabályozó Hivatala (RONI) állapítja meg. Az ársapka módszer alkalmazásával a háztartások és a kisvállalkozások kiskereskedelmi árát a maximális érték beállításával szabályozzák, követve a piaci trendeket. Mint az összes többi EU-tag esetében, az árszabályozás továbbra is kiterjed a szolgáltatókra a végfelhasználók védelme érdekében (Janda 2018, Leal-Arcas et al. 2020).

Országos szinten a Slovenské elektrárne (SE) a legnagyobb villamosenergia-szolgáltató Szlovákiában, az ország termelési piacának 66 %-át birtokolja. Az SE a beépített kapacitás (beleértve a két atomerőművet, a két hőerőművet és a több vízerőművet) és a termelt villamos energia több mint 80 %-át adja, valamint a más forrásokból vásárolt energia viszonteladójaként is működik. A Slovenské elektrárne a szlovákiai három legnagyobb regionális elosztóvállalat (ZSE, SSE és VSE) fő villamosenergia-szolgáltatója, valamint villamos energiát szállít a nagyvállalkozásoknak is. Az elosztási szektorban három nagy regionális vállalat működik, amelyek elosztói rendszerüzemeltetőként működnek. A három legnagyobb disztribúciós társaságot, a ZSE-t (nyugat), az SSE-t (központi) és a VSE-t (kelet) 51 %-ban az állam ellenőrzi, de a fennmaradó kisebbségi részvények és a végrehajtói jogok olyan magánbefektetők kezében vannak, mint a német E.ON, a cseh-szlovák Energy Equity Fund és az Industrial Holding plc, illetve a német RWE Group. A kiskereskedelmi piac többi részét mintegy 130 kis

elosztóvállalat látja el, kevesebb mint 100 ezer ügyféllel. Az állami tulajdonban lévő Slovenská elektrizaná prenosová sústava, (SEPS) az egyetlen szállítótársaság és az országos átviteli rendszerüzemeltető, aki felelős az átvitelrendszer tervezéséért és a beruházásokért. A regionális elosztóvállalatok piaci részesedése csökkent az elmúlt években, ebben a tekintetben a szétválasztás és a liberalizáció hatékonyan csökkentette a piaci koncentrációt, a termelési struktúra azonban továbbra is erősen koncentrált. A magyar, a cseh, a román és a szlovák energiapiac integrálásának projektjei (4MMC piacösszekapcsolás) meglehetősen sikeresek voltak, és várhatóan tovább fognak fejlődni. Ukrajna és Szlovákia villamosenergia-hálózatának üzemeltetői a közelmúltban megállapodtak egy új rendszerösszekötő megépítésében a kapacitás bővítése érdekében. Mely jól mutatja az összekapcsolhatóság lehetőségét a szomszédos országok és a hazai regionális vonalak között (Lieskovský et al. 2019, Leal-Arcas et al. 2020)

A cseh villamosenergia-piac egy nagyobb közép-európai regionális piac része, a Cseh Köztársaság és a szomszédos országok közötti határokon átnyúló átviteli kapacitások eredményeként. Csehország a többi vizsgált országhoz hasonlóan liberalizált energiapiacot működtet. Az állami tulajdonú CEZ vállalat az 1990-es évek végéig irányította az ágazatot, amikor megtörtént a szétválasztás és a piacnyitás. Ennek a folyamatnak az eredményeként az energiatörvény négy részre osztotta a villamosenergia-szektor: termelés, szállítás, elosztás és kereskedelem. A törvényt 2011-ben módosították, hogy megfeleljen a harmadik energiacsomag (TEP) elvárásainak. A villamosenergia-piaci tevékenységeket az Energiaszabályozási Hivatal (ERO) ellenőrzi és engedélyezi, a termelésre, szállításra, elosztásra vonatkozó engedélyeket legfeljebb huszonöt évre adja ki, míg a kereskedelemre vonatkozó engedélyek csak öt évig érvényesek. A termelési és az átviteli szegmens teljes jogi elkülönülést mutat. A termelési, elosztási és ellátási szegmensek nagy része azonban integrált vállalkozás, amelynek tulajdonosa a CEZ és leányvállalatai (CEZ Csoport). A CEZ és leányvállalatai továbbra is ellenőrzik a termelés (a termelői kapacitás körülbelül háromnegyedét), az elosztás és a kereskedelem jelentős részét. Noha az erős piaci koncentráció negatívan befolyásolhatja a versenyt, Csehországban az áramárak alacsonyabbak az EU átlagánál (mind a háztartások, mind az ipar számára). Az elemzők arra számítanak, hogy a villamosenergia-árak valószínűleg emelkedni fognak a megújuló energiaforrások költségeinek áthárítása, az átviteli rendszer felújítása és fejlesztése, valamint intelligens hálózatok kiépítéséhez szükséges beruházások miatt. Csehországban a CEPS az egyetlen állami tulajdonú szállításirendszer-üzemeltető, amely felelős az ellátás kiegyensúlyozásáért, az üzemeltetésért, a karbantartásért és a villamosenergia-

hálózat bővítéséért. Ezenkívül a CEPS elosztja a rendelkezésre álló átviteli kapacitást a rendszerösszekötőkön, és együttműködik a szomszédos országokkal a villamosenergia-piac fokozottabb integrációja érdekében. Nyolc regionális elosztó társaság működik, amelyek közül ötöt a CEZ, kettőt az E.ON és egyet az one by EnBW irányít. 2018-tól 400 engedéllyel rendelkező szállító működött: CEZ Prodej a piac 40 %-át, az E.ON Energie 20 %-át, a Prazská energetika 11 %-át birtokolja. Az érintett piaci szereplőknek teljes hozzáférést kell biztosítani a cseh szállító- és elosztóhálózatokhoz, beleértve a villamos energia továbbításának vagy elosztásának lehetőségét a hálózatokban. Csehországnak két villamosenergia-piacja van: a nagy- és a kiskereskedelem. A nagykereskedelmi piacon a REMIT-rendeletet értelmében folyik a kereskedelem. Az OTE a legjelentősebb cseh villamosenergia-piaci szereplő. Az OTE a Cseh Köztársaság tulajdonában lévő részvénytársaság, amely adminisztrálja és jelentést készít a villamosenergia-piacokról, és a CEPS-szel, a villamosenergia-átviteli rendszer tulajdonosával és üzemeltetőjével együttműködve számviteli funkciót lát el az energia-kiegyenlítő piac vonatkozásában. Az OTE az elektromos spot piacon és a Közép-európai Energia Piacon (PXE) szervezi a kereskedést. A cseh villamosenergia-piac szerves része a tágabb európai villamosenergia-piacnak, és pozitív kereskedelmi egyensúlyt tart fenn a legtöbb szomszédos országgal. A PXE-t 2007-ben hozták létre, mint új üzleti tőzsdét a villamosenergia-kereskedelem számára a Cseh Köztársaságban és a Szlovák Köztársaságban. A PXE a prágai tőzsde leányvállalata, és része a közép-kelet-európai tőzsde csoportnak (Leal-Arcas et al. 2020, Kristoufek és Lunackova 2013, Vrba et al. 2015).

Lengyelország szintén liberalizált nagykereskedelmi piaccal rendelkezik, amit a TPA elv alapján működtet. Lengyelországban, ahogy az előző fejezetben is bemutattam végbement a villamosenergia-piac liberalizációja. Ennek hatására az állami tulajdonú szervezetek négy vertikálisan integrált csoportba szerveződtek és részlegesen privatizáltak. Ezek a csoportok a PGE Polska Grupa Energetyczna S.A (PGE), a TAURON Polska Energia S.A. (TAURON), az ENEA S.A. (ENEA) és az ENERGA S.A. (ENERGA). Ezek a vállalatok egyesítik a termelési, szállítási és kereskedési (beleértve az ellátási) tevékenységeket. Az EU energiapiacának való megfelelés érdekében a második energiacsomag szétválasztási rendszerében az elosztórendszer-üzemeltetőket 2007. július 1-jén jogilag szétválasztották. 2011-ben a nagykereskedelmi villamosenergia-piac jelentős átszervezése következett be, különös tekintettel a vertikálisan integrált csoportokra. A 2010. augusztus 9-én hatályba lépett energiatörvény kimondja, hogy a villamosenergia-termelők kötelessége, hogy az adott évben termelt villamos energia legalább 15 % -át értékesítsék egy áramtőzsdén. Ez az átszervezés a

POLPX-et is meghatározta 2011-ben a villamosenergia-kereskedelem fő platformjaként. Lengyelországban a villamosenergia-termelés szektorban 2019-ben a legnagyobb 40%-os részesedést továbbra is a PGE Polska Grupa Energetyczna S.A. csoport birtokolta. Ez a csoport, miután megvásárolta az EDF csoport energetikai vállalatait, vezető helyet foglalt el a végfelhasználók számára történő értékesítés piacán is. A lengyel piaci szereplők megkülönböztetésmentes alapon széles körű hozzáférést kapnak a villamosenergia-értékesítés különféle formáihoz, valamint hozzáférést kapnak a villamosenergia nagykereskedelmi piacon történő szerződéses és értékesítési volumenére vonatkozó információkhoz (Gawlik et al. 2015, Slusarczyk et al. 2013, Tucki et al. 2019).

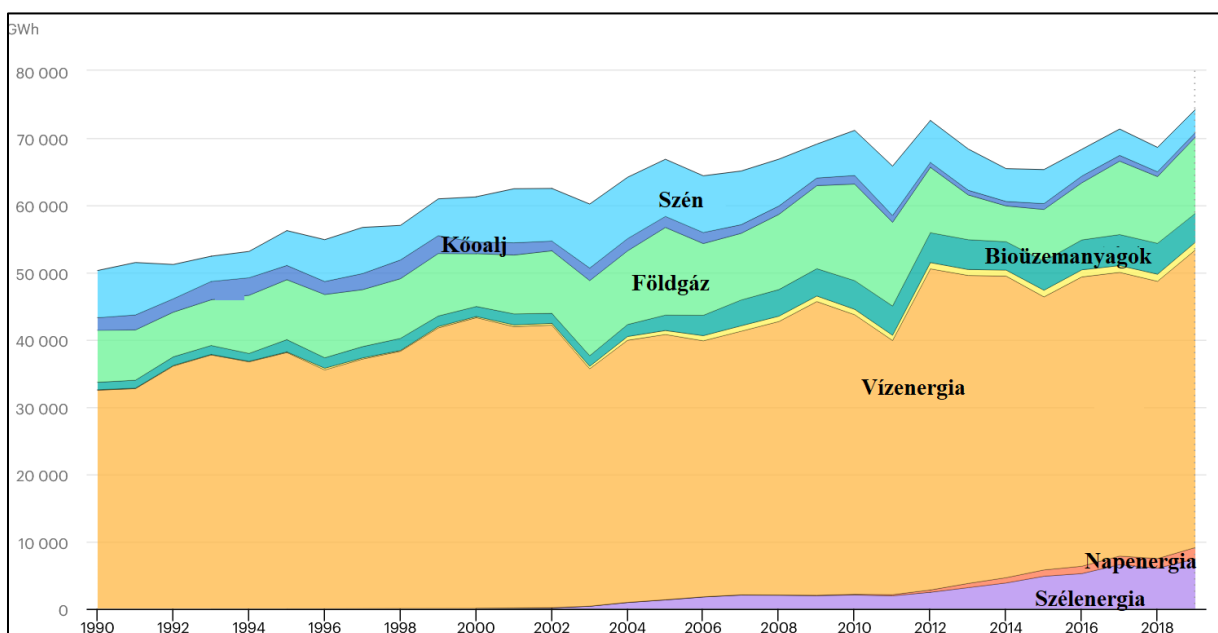
2019-ben öt nagy elosztórendszer-üzemeltető működött a lengyel villamosenergia-piacon, amelyekre szétválasztási kötelezettség vonatkozik. Ezen kívül 184 vertikálisan integrált vállalkozás volt kijelölve elosztórendszer-üzemeltetőként. 2019-ben mintegy 17,8 millió végfelhasználót számlált a piac. Ennek 91 %-a (16,2 millió) olyan fogyasztó, aki a G tarifacsoportba sorolható (főként háztartások). Lengyelországban az egyetlen átvitelirendszer-üzemeltető, a Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. (PSE), melye egy teljesen állami tulajdonban lévő részvénytársaság, ez a vállalat birtokolja az összes szállítóeszközt. A PSE tevékenységét az Energiaszabályozó Hatóság által kiadott engedély alapján szabályozzák. A villamos energia határokon átnyúló kereskedelmét Lengyelországban az átvitelirendszer-üzemeltető (PSE) végzi. A nemzeti szállítási rendszer összekapcsolódik a német, a cseh és a szlovák rendszerrel, amelyek átvitelirendszer-üzemeltetői, a villamosenergia-piaci átviteli rendszerüzemeltetők európai hálózatának (ENTSO-E) részét képezik. Lengyelország további kapcsolatban van Fehéroroszországgal, Svédországgal, Ukrajnával és Litvániával. Közép-kelet-európai régióban történő kereskedelem esetében az átviteli kapacitás rendelkezésre állását és felosztását az átvitelirendszer-üzemeltető határozza meg. A kelet-közép-európai országokkal rendelkező rendszerösszekötők átviteli kapacitását a PSE bocsátja rendelkezésre koordinált aukciók keretében, amelyet a Central Allocation Office GmbH (CAO) által szervezett és irányított éves, havi és napi aukciók alapján tart fenn. A CAO által szervezett összehangolt aukcióknak köszönhetően lehetőség van a kapacitások lefoglalására a közép-kelet-európai régióban. A legnagyobb mennyiségű átviteli kapacitást a piaci szereplők a német és a cseh határon foglalták le az elmúlt években. Az energiaárakat a piaci szegmensek jelentős eltérései jellemzik. Ennek oka a generációs technológia, a szállítás időtartama és mennyisége, valamint a fogyasztói profil (Gawlik et al. 2015, Slusarczyk et al. 2013, Tucki et al. 2019).

A lengyel energiaágazat jelentős beruházásokat igényel az elkövetkező tíz évben, mert a meglévő és gyakran kevésbé hatékony erőműveket le kell állítani a CO₂ és egyéb környezeti korlátozásokra vonatkozó uniós előírásokkal (EU-ETS) összhangban. Egy másik kulcsfontosságú feladat az átviteli és elosztó hálózatok korszerűsítése és fejlesztése, különösen Észak-Lengyelországban, ahol számos új megújuló energia projekt található, viszont a kapacitáshiány miatt problémák vannak a hálózati csatlakozás lehetővé tételével. A keresletre adott válasz alapvető fontosságú a megbízhatóbb, fenntarthatóbb és hatékonyabb villamosenergia-rendszer szempontjából, az ebben rejlő potenciál azonban kihasználatlan. Lengyelországban a legfőbb akadályok a szénfüggőség és az energiaipari vállalkozásokra gyakorolt politikai befolyás (Gawlik et al. 2015, Rollert 2018, Slusarczyk et al. 2013, Tucki et al. 2019).

2001. október 1-jétől az osztrák villamosenergia-piacot a 2010. évi villamos energia törvény alapján az osztrák jogba átültetett harmadik energiacsomag követelményeinek megfelelően teljes mértékben liberalizálták. Az osztrák energiapolitika legfőbb jogi szabályzója a 2010. évi szövetségi villamosenergia-gazdálkodási törvény (Elektrizitätswirtschafts- und organisationsgesetz 2010). Ennek célja az egyenlő, tisztességes, fogyasztóbarát és átlátható energiapiac szabályozása. A törvény szabályozza többek között a piaci szereplők jogait és kötelezéseit, különös tekintettel a fogyasztókkal szembeni kötelezettségeikre. A piac liberalizációját követően a fogyasztók számos szolgáltató közül szabadon választhatják meg energiaszolgáltatójukat. A piac termelőkre, átvitelrendszer-üzemeltetőkre, elosztórendszer-üzemeltetőkre és szállítókra oszlik. Ausztria bevezette a „mérlegcsoport modellt”, a szállítók és ügyfelek virtuális csoportját, amelyen belül a beszerzett és szállított villamos energia kiegyensúlyozott. Az áramszolgáltatók vagy kereskedők dönthetnek arról, hogy csatlakoznak-e egy meglévő mérlegcsoporthoz, vagy a sajátot alapítanak. Mindazonáltal minden piaci szereplő köteles egy mérlegcsoport tagjának lenni. A mérlegcsoportok kompenzálják a kereslet és kínálat ingadozásait. Az osztrák villamosenergia-ágazat legfontosabb fejleménye az elmúlt években a Németországgal közös nagykereskedelmi piac 2018. október 1-jei megszűnése. A Németország és Ausztria közötti cserékből származó villamosenergia-áramlásokat ma már határokon átnyúló áramlásnak tekintik a belső cserék helyett, ez pedig a nagykereskedelmi piacon árkülönbségeket eredményez. Ausztria része a Közép-Nyugati Régió (CWE) egynapos piac-összekapcsolási rendszernek, hogy az ország bekapcsolódhasson az áramlás-alapú piaci összekapcsolási allokációkba. A CWE régió Ausztria mellett Belgiumot, Franciaországot, Németországot, Luxemburgot és Hollandiát fedi

le. Napi piac-összekapcsolás valósult meg Ausztria és Olaszország közötti 2015-ben, Ausztria és Szlovénia között 2016-ban. Ausztria továbbra is folytat aukciókat a Cseh Köztársasággal, Magyarországgal és Svájjal való összeköttetésein. Ausztria Európa központjában található, ezáltal szoros villamosenergia-kapcsolata van hét szomszédos országgal. 2017-ben az összekapcsolási aránya 15,3 % volt, meghaladva a 2020-ra kitűzött 10 %-os európai célkitűzést. Ennek ellenére Ausztriában továbbra is a szűk keresztmetszetek okoznak gondot a szomszédos országokkal való összekapcsolásában, különösen az észak-déli villamosenergia-áramlások esetében (IEA 2020a).

3-2. ÁBRA: ÁRAMTERMELÉS FORRÁSOK SZERINT AUSZTRIÁBAN 1990-2019 KÖZÖTT



(Forrás: <https://www.iea.org/countries/austria>)

Ausztria villamosenergia termelésében a megújuló forrásból termelt energia szerepe meghatározó, ezt a földgáz és a szén alapú villamosenergia elállítás követi. A szén szerepe várhatóan a jövőben csökkenni fog, míg a megújuló források szerepe előreláthatóan növekszik. A megújuló forrásokból termelt villamosenergia esetében a vízenergia a domináns, amit a szél és napenergia követ (3-2. ábra) (IEA 2017). Ausztriában számos vállalat termel villamos energiát, tehát villamosenergia-termelő ipara viszonylag sokszínű, nagyszámú regionális székhellyel rendelkező vállalat van, amelyek közül több évente 1 TWh-nál nagyobb mennyiséget állít elő. Az osztrák villamosenergia-piac legfontosabb szereplői a Verbund AG és az EVN. A legnagyobb termelő a Verbund AG, amely több mint 140 erőművet üzemeltet. 2018-ban az osztrák termelés mintegy 48 %-át tette ki. Annak ellenére, hogy a piacot liberalizált a harmadik energiacsomag követelményeinek megfelelően, a Verbund AG és az EVN egyaránt

tevékenykedik a villamos energia szállítási, termelési, elosztási és ellátási szektorban. Az Osztrák Köztársaság a Verbund alaptőkéjének 51%-ával rendelkezik. Alsó-Ausztria szövetségi tartomány (Niederösterreich) (holdingtársaságon keresztül) az EVN alaptőkéjének 51 %-át birtokolja. Ausztria két tanúsított független szállításirendszer-üzemeltetővel rendelkezik. A fő osztrák átvitelirendszer-üzemeltető az osztrák Power Grid AG (APG), amely az osztrák nagyfeszültségű villamosenergia-hálózatának 95%-ával rendelkezik. A Vorarlberger Übertragungsnetz GmbH (VUEN) Vorarlberg tartományban az átviteli hálózat tulajdonosa és üzemeltetője. Az APG nagyfeszültségű elektromos hálózatának (azaz 380kV, 220kV és 110kV) hossza megközelítőleg 6700 km. A Verbund AG az osztrák Power Grid AG részvényeinek 100%-át birtokolja. Az APG felelős a teljes osztrák átviteli hálózat kiegyensúlyozásáért és operatív irányításáért, és az egyetlen kapcsolattartó pont az import és az export tekintetében. Az árakat, amelyeket az átvitelirendszer-üzemeltetők a hálózat és szolgáltatásaik használatáért felszámíthatnak, az éves költségellenőrzéseken alapuló költség-plusz szabályozási rendszer fedezi. Ausztriának több mint 130 elosztórendszer-üzemeltetője van, amelyekre 2006 óta ösztönző szabályozási rendszer vonatkozik. Mivel az egyes hálózati területekre egységes díjakat számolnak, az egyenlő fizetési mechanizmus biztosítja a hálózatüzemeltetők közötti bevételi struktúrában jelentkező különbségek kiküszöbölését (IEA 2020a).

Az osztrák villamosenergia-ágazat többsége magántulajdonban van, az energiaipari vállalatok többségének közvetlen vagy közvetett érdekeltségei vannak a többi piaci szereplőben. Például az EVN 100%-ban az EVN Kraftwerks und Beteiligungsgesellschaft GmbH tulajdonában van a termelési szektorban, és az EVN Energievertrieb GmbH & Co KG és az EVN Netz GmbH 100%-os tulajdonrészén keresztül az EVN az elosztási és ellátási piacon is aktív. A kiskereskedelmi piacon 2018-ban összesen 155 beszállító tevékenykedett, 4,3 millió háztartást, 1,4 millió vállalkozást és egyéb kisfogyasztót kiszolgálva. a bécsi háztartások több mint 40 szállító nagyjából 95 ajánlata közül választhatnak, a kevésbé népes régiókban ez a szám alacsonyabb. Átlagosan egy osztrák villamosenergia-fogyasztó tíz különböző szolgáltató közül választhat. A következő vállalatok a domináns szereplők a kínálati piacon: Verbund, Wien Energie, KELAG, Salzburg Netz, Linz Strom és EVN. A Wien Energie, az EVN és a BEWAG szoros együttműködése az Osztrák Energiaszövetségen (Energie Allianz Austria) keresztül azonban már Ausztria piacliberalizációjának kezdetén fokozta a piaci koncentrációt. A villamos energia árát Ausztriában nem szabályozzák sem a háztartások, sem az ipari fogyasztók esetében. Ausztria fogyasztói viszonylag magas villamosenergia-árat fizetnek az IEA többi tagországához képest, főleg a magas adóterhek miatt. Az ország az IEA mediánja

felett helyezkedett el az ipari villamosenergia-árak tekintetében 2018-ban. Az adók az ipari áram teljes árának 27 % -át teszik ki, ami a negyedik legmagasabb az IEA-országok között. A háztartások villamosenergia-árai 37% adót tartalmaznak, az IEA összehasonlításában így Ausztria a 10. helyen áll. Az országban a villamosenergia-árai mind az ipari, mind a háztartási szektorban 2012 óta csökkentek (IEA 2020a).

A villamosenergia-piaci liberalizáció hatására a vizsgált országokban a korábbi állami tulajdonú szervezetek vertikálisan integrált csoportokban szerveződtek, és megtörtént a privatizáció is. Jogi értelemben az EU szabályozásával összhangban zajlott a szétválasztás, de a vizsgált országok nagy többségében továbbra is egy-egy jellemzően állami tulajdonban lévő vállalatcsoporthoz tartozik a termelés és az átviteli rendszer üzemeltetése. Ebből kifolyólag erős piaci koncentráció tapasztalható a vizsgált országokban. Mindezek alapján Ausztria tekinthető a legváltozatosabb piacnak, hiszen nagy diverzitás mutatható ki a villamosenergia szektorban. Ausztriában és Magyarországon mérlegkör rendszer működik, melyhez való csatlakozás a piacra jutás feltétele. A piaci versenyt akadályozó gyakorlatokat, minden országban a hatóságok felügyelik és szankcionálják, valamint a vizsgált országban a fogyasztók szabadon választhatják meg szolgáltatójukat.

A fókuszban szereplő országok regionális együttműködésekben vesznek részt, ennek keretén belül lehetőség van a szomszédos országokkal való kereskedelemre. Magyarország esetében az elmúlt időszakban ez az import villamosenergia arányának növekedéséhez vezetett. A jövőben vélhetően újabb összeköttetések fognak létrejönni és a meglévő kapacitások is bővülni fognak. A létrejövő regionális piacok lehetővé tették a kereslet és a kínálat összehangolását. A skandináv országok energiatőzsdéje (Nordpool) az egyik legjobban működő regionális energiatőzsde. A regionális villamosenergia-tőzsdék (pl.: PXE) biztosítják a villamosenergia szabad áramlását, likviditásuk magas, a részvétel önkéntes. A regionális árképzés helyett jelenleg főként tagállami keretek között kialakított árak léteznek, tehát nem beszélhetünk egységes regionális árképzésről a kiskereskedelmi árak tekintetében. A villamosenergia nagykereskedelmi ára és az árakban fellelhető regionális különbségek az elmúlt években csökkentek, ennek ellenére a kiskereskedelmi árak esetében ez a tendencia nem volt kimutatható. Ez pedig azt mutatja, hogy a kiskereskedelmi piacon gyenge árverseny van. A regionális piacok fejlődését elősegítené, ha regionális szinten lehetne dönteni a villamosenergia határokon átnyúló kereskedelméről, ez pedig meggátolná a mozgást akadályozó tagállami intézkedéseket (Sztankó 2017).

4. A megújuló energia piacának területi különbségei

A Szlovák Hálózati Iparágak Szabályozó Hivatala által 2020 júniusában közzétett statisztikák szerint a megújuló energiaforrások az elfogyasztott villamosenergia 17,48%-át tették ki 2019-ben. A megújuló energiaforrásokból előállított energia a teljes villamosenergia-termelés körülbelül 18,42%-a volt. A biomassza aránya 5%, a vízenergia aránya 8,1%, ezek a vezető megújuló források. A napenergia csak körülbelül 1,8%-ot képvisel. Atomenergia a Szlovákiában termelt összes villamos energia több mint 55%-át adja. Az EU megújuló energiáról szóló irányelvének (EC, 2009) köszönhetően a fotovoltaiikus áramtermelést Szlovákiában a kormányzati politika nagymértékben támogatta általános támogatásokkal, garantált betáplálási tarifákkal és jogi eszközökkel. A szlovák nemzeti célkitűzés teljesítése érdekében tett erőfeszítések szerint a megújuló villamos energia arányát 24%-ra kell emelni 2020-ra (Janda 2018, Janda és Koscova 2018, Štreimikienė 2021).

Szlovákiában a többi közép-európai országhoz hasonlóan a megújuló energiát termelő létesítmények nem képesek versenyezni a hagyományos erőművekkel szemben, az alkalmazott támogatási rendszerek nélkül. Ezért a jövőben továbbra is szükség lesz az állam támogatására. Szlovákiában a megújuló energiaforrásokból történő villamosenergia-termelést támogatja a betáplálási tarifarendszer, amelynek keretében a megújuló energiát termelők fix áron értékesítik a villamos energiát. A támogatási rendszer bevezetése megemelte az összes végfelhasználó által fizetett villamosenergia-árat az országban. A betáplálási tarifákat évente a Szlovák Hálózati Ipari Szabályozó Iroda határozza meg. A betáplálási tarifa mértéke attól az évtől függ, amelyben a projektet üzembe helyezték és értéke a törvényben meghatározott időszakra (évek) garantált. Elméletileg a Szlovák Köztársaságban a megújuló energiaforrásokból származó villamosenergia-termelők jogosultak élni az elosztórendszerhez való preferenciális hozzáféréssel, valamint a preferenciális szállítással és elosztással. Gyakorlatban az elmúlt években az elosztó vállalatok nagyon vonakodtak új létesítmények (különösen a napenergia) bekötésétől, azzal érvelve, hogy a nemzeti hálózat nem rendelkezik elegendő kapacitással. Szlovákia túlkompenzációval is szembesül. A közelmúltban a Szlovák Hálózati Iparágak Szabályozó Hivatala több mint 60 vizsgálatot végzett, és kiderült, hogy közülük több mint 50-en kaptak több mint 100 millió euró túlkompenzációt. Tekintettel erre a jelentős adatra, a Hivatal bejelentette, hogy a zöld energia valamennyi termelőjének ellenőrzését tervezi (körülbelül 2 700 termelőegység). A jogi szankciókra vonatkozóan nincsenek határozott tervek,

de a jövőben sokkal szigorúbb intézkedésekre számíthatunk a termelők (Janda 2018, Janda és Koscova 2018, Štreimikienė 2021).

A kormányzat a 2020. január 1-jétől hatályba lépő új jogszabályokkal próbálta feloldani a jelenlegi helyzetet. A módosítás célja a megújuló energiaforrásokból történő villamosenergia-termelés támogatásának átfogó reformja volt. A reformot a fokozatos kivonás filozófiájával összhangban készítették el, kiemelt fontosságú volt a költséghatékonyság biztosítása és a végső energiaárakra gyakorolt hatás minimalizálása. Az új szabályok új betáplálási prémiumtarifát vezettek be (amely a piaci ár feletti prémiumot garantálja) zöld aukciókon keresztül a 100 kW feletti napenergiát hasznosító berendezésekre és az 500 kW teljesítmény feletti egyéb létesítményekre. Kisebb teljesítményű létesítmények esetében a betáplálási tarifa továbbra is elérhető lesz, de nem olyan kedvező formában, mint 2009-2010-ben volt, amikor az új naperőművek nagyrészét telepítették. A módosítás bevezetett egy 500kW-ig terjedő ún. helyi forrást és az elosztóvállalatok azon köteleességét, hogy ezeket a forrásokat csatlakoztassák a nemzeti hálózathoz azzal a feltétellel, hogy a villamos energia 90%-át a telepítés helyén használják fel. A módosítás átruházta a tarifafizetési kötelezettséget az elosztó társaságoktól a villamosenergia-piaci üzemeltetőkhöz (OKTE), amely állami tulajdonú szervezet. A módosítás új korlátozásokat is bevezetett (üvegházhatást okozó gázok kibocsátása miatt), amelyek befolyásolják a biomasszából vagy biogázból történő villamosenergia-termelést. A legjelentősebb újítás minden kétséget kizáróan zöld aukciók bevezetése volt az új létesítmények számára, amelyeket a Gazdasági Minisztérium szervez az EU irányelveivel összhangban. 2020 februárjában a Gazdasági Minisztérium meghirdette az első zöld aukciót az új, legfeljebb 30 MW teljesítményű létesítmények számára, 15 évre garantált betáplálási prémium tarifával. A minisztérium meghatározta az aukción felajánlható maximális árakat. A nap- és szélenergia esetében a maximális ár 84,98 EUR/MWh, a többinél pedig 106,80 EUR/MWh volt. A csatlakozás problémájának megoldásaként az aukciós szabályok kötelezték az elosztótársaságokat, hogy a nyertes létesítményeket csatlakoztassák a nemzeti hálózathoz (Čeryová et al. 2018, Leal-Arcas et al. 2020).

Szlovákiában az új kormány jóváhagyta nemzeti energia- és éghajlat-politikai tervet, amely 2030-ra célul tűzte ki, hogy az összes felhasznált energia 19,2 %-a származik majd megújuló energiaforrásokból. Ennek megvalósítása érdekében a megújuló energiaforrások erőteljes támogatását tartalmazó tervet jelentettek be, amelynek célja a bürokrácia csökkentése, a támogatási rendszerek és a pályázati folyamat átláthatóbbá tétele. A kormány nem tervezi új vízerőművek telepítésének támogatását, a társadalmi ellenállás miatt. Ezen tervek

megvalósulását megakadályozhatja az ambiciózus nukleáris energia hasznosítására irányuló tervek a V4 országokban. Ha az ambiciózus V4-es nukleáris terveket valóban végrehajtják, akkor az atomerőművek versenyezni fognak a korlátozott exportlehetőségekért a megújuló forrásokkal a csúcsidőszakokban. A hosszú távú energiapolitikák összehangolása a V4 régióon belül kritikus fontosságú a nukleáris és a megújuló fejlesztések tekintetében (Mezősi et al. 2020).

Lengyelországban az Eurostat adatai szerint a megújuló energia részaránya a bruttó végső energiafogyasztásban a 2005. évi 6,9 %-ról 2010-re 9,3 %-ra, 2015-ben pedig 11,8 %-ra nőtt. 2018-ban 11,3 % volt. EU 2030 keretében kitűzött célok elérése érdekében Lengyelországban a megújuló energiaforrásokból előállított energia részarányát 32%-ra kell emelni a bruttó energiafogyasztásban. Ennek a célnak az elérése érdekében szükségessé vált bizonyos intézkedések meghozatala a megújuló energiaforrások piacának bővítése érdekében. A Lengyelország 2040-ig szóló energiapolitikai tervezete a napenergiát jelöli meg, amely a szélenergia mellett kulcsszerepet játszik a megújuló energiával kapcsolatos célok elérésében. A napenergia hasznosítása az egyik leggyorsabban növekvő megújuló energia ágazat Lengyelországban. A napenergiára alapozott létesítmények teljes beépített kapacitása 2018 végén körülbelül 500 MW volt, míg 2020 augusztusában a beépített kapacitás elérte a 2200 MW-ot. A legújabb tendencia a nagyméretű (1 MW feletti) napenergia-projektek telepítése vagy a napenergia és más megújuló energiák kombinálása. Lengyelország jelentős ipari potenciállal rendelkezik a tengeri szélenergia kihasználása területén is. Az integrált nemzeti energia- és éghajlati terv szerint az elképzelés az, hogy 2030-ig 3,8 GW kapacitást érjenek el a tengeri szélenergiaforrásokból, és 2040-ig ezt 8 GW-ra növeljék. A megújuló energiaforrásokból történő energiatermelés kiegyensúlyozása érdekében energiátárolási projekteket is terveznek a következő években. 2018-ban megkezdődött Lengyelország legnagyobb, 27 MWh kapacitású energiátárolójának építése a Bystra szélenergia park közelében. A Polska Grupa Energetyczna S.A. (PGE) állami tulajdonú társaság nyolc, mintegy 40 MW kapacitású tároló létesítését tervezi a jövőben (Gnatowska és Moryń-Kucharczyk 2019, Marks-Bielska et al. 2020, Piwowar és Dzikuc 2019, Tucki et al. 2019).

Lengyelországban a megújuló energiaforrások támogatását két fő támogatási mechanizmus ösztönözte az elmúlt években, a származási igazolások rendszere és az aukciós rendszer. A szabályozó hatóság által kiállított származási igazolások (zöld tanúsítványok) bizonyítják, hogy a villamosenergia megújuló forrásokból származik. A zöld tanúsítványokból származó tulajdonjogokkal a lengyel áramtőzsdén és a tőzsdén kívüli piacokon (OTC) egyaránt lehet

kereskedni. A zöld tanúsítványrendszert azonban fokozatosan felváltja a 2016. évi megújuló energiaforrásokról szóló törvény által bevezetett aukciós rendszer. Az aukciós rendszer lehetőséget kínál a lengyel szabályozó hatóság által szervezett aukciókon való részvételre. A következő naptári évben árverésre bocsátható villamos energia maximális mennyiségét és értékét évente a Miniszterek Tanácsa határozza meg. Az aukciók egyetlen kritériuma az ár - a legalacsonyabb ajánlattevőket választják ki, amíg el nem érik az adott aukcióra meghatározott maximális mennyiséget. Az aukció nyerteseinek a rendszer garantált védelmet nyújt az energia piaci ára és az aukciós ár közötti „negatív egyenleg” ellen. A támogatást a Zarządca Rozliczeń S.A., állami tulajdonban lévő szervezet folyósítja, amely a támogatási rendszer pénzügyi oldaláért és a „negatív egyenleg” rendezéséért felel. A támogatás időtartama 15 év az első villamosenergia-értékesítés időpontjától, de legkésőbb 2039. június 30-ig szólhat. Az első aukcióra 2016. december végén került sor. Az eddigi aukciók főként az 1MW beépített kapacitás alatti telepítésekre irányultak nap és szélenergiára összpontosítva. Az aukciós rendszer felpezsdítette a megújuló energiaforrások piacát, új befektetéseket generált, különösen a szélerőműparkok és a napenergia területén. Ezen túlmenően a kormány tervezi a tengerre telepített szélerőmű-hálózat fejlesztését a saját támogatási rendszere révén (Gnatowska és Moryń-Kucharczyk 2019, Tucki et al. 2019).

Lengyelországban is akadnak problémák szabályozási szempontból, a piaci bizonytalanságot növeli, hogy korábban nem hirdettek aukciókat az 1 MW feletti szárazföldi szélerőművekre. Az egyik akadály, amellyel a szárazföldi szélpiac szembesült, a szigorú rendelkezések bevezetése volt a szélturbina-beruházásokról szóló törvényben. A törvény meghatározza az új szélturbinák és a háztartások vagy vegyes célú épületek közötti minimális távolságot, amely legalább a szélerőmű teljes magasságának tízszerese. További vitákat generált a szélturbinák ingatlanadója. A jelenlegi jogszabályok szerint az 50 kW-nál nagyobb, de 500 kW-nál kisebb beépített teljesítményű létesítményeket csak az energiatermelők nyilvántartásába kell bejegyezni, míg az engedély megszerzésének kötelezettsége 500 kW beépített teljesítmény felett szükséges. Az új javaslat szerint a második küszöbértéket 1 MW-ig szükséges emelni. A legtöbb jogi akadályt megszüntették vagy enyhítették az elmúlt években, ez pedig az éves aukciók mellett ösztönözte a lengyelországi szárazföldi szélerőmű és napenergia projektekbe történő beruházásokat (Gnatowska és Moryń-Kucharczyk 2019, Piwowar és Dzikúć 2019, Tucki et al. 2019, Wyrobek et al. 2021).

Csehországban a megújuló forrásokból előállított energia jelenleg az ország energiamixének körülbelül 12%-át teszi ki. A teljes energiatermelés mintegy 35%-a nukleáris, a fennmaradó

53% pedig fosszilis tüzelőanyagokból (főként lignitből) származik. Ennek ellenére a megújuló forrásokból származó energia részaránya a bruttó végső energiafogyasztásban körülbelül 15%-os. A megújuló energiaforrásokból történő villamosenergia-termelés biogáz, biomassza és napenergia (25% - 25% - 25%), ezt a vízenergia (18%) követi. A Cseh Köztársaság az EU célkitűzésekkel összhangban 2030-ra vállalata, hogy megújuló energiaforrások részarányát 2030-ra 22%-ra emeli. Az atomenergiát és az energiamegtakarítást egyaránt támogatja a cseh kormány (Brožyna et al. 2020, Gürtler et al. 2019, IEA 2016).

A cseh megújuló energia támogatási rendszert 2005-ben vezették be, és fő elvei még mindig érvényben vannak. Csehországban a megújuló energiaforrásokból származó villamosenergia-termelők két rendszer között választhatnak az egyik a betáplálási tarifa, a másik a zöld bónusz rendszer. A betáplálási tarifa alapján a termelők fix áron értékesítik a villamos energiát a kötelezően kijelölt vevőknek. A zöld bónusz rendszer keretében a termelők piaci áron értékesítik a villamos energiát a villamosenergia-piacon és jogosultak további fix támogatási összegre. A projekt élettartama alatt lehet váltani a két séma között. A betáplálási tarifát és a zöld bónuszt évente a Cseh Energiaszabályozási Hivatal állapítja meg. A betáplálási tarifa mértéke attól az évtől függ, amelyben a projektet üzembe helyezték, és meghatározott évig az összeg garantált, a törvény előírása szerint. A zöld bónusz szintje a betáplálási tarifa szintjéhez kapcsolódik, mivel figyelembe veszi az adott év villamosenergia piaci árát. A megújuló energiatermelőnek saját költségén kell biztosítani erőművek csatlakozását az átviteli vagy az elosztóhálózathoz (Gürtler et al. 2019, IEA 2016, Zimmermannová és Jilková 2016).

Bizonyos esetekben a hálózati csatlakozási eljárás gátat szab a megújuló energiák fejlődésének Csehországban. A CEPS, az átvitelirendszer-üzemeltető 2010-ben ideiglenes csatlakozási moratóriumot hirdetett meg megújulóforrásból származó energiát előállító erőművek számára, amelyet 2011 végén megszüntettek. Bár a megújuló villamosenergia-termelők általában jogosultak a hálózat elsőbbségi csatlakozására, az átvitelirendszer-üzemeltető azzal érvelt, hogy a hálózati kapacitás nem elegendő további megújuló rendszerek csatlakoztatásához. Az átvitelirendszer-üzemeltető számos módosítást követelt a jogszabályok területén, többek között a hálózati csatlakozáshoz szükséges előlegfizetések bevezetését és a megújuló energiaforrásokból származó villamosenergia elsőbbségi hozzáféréseinek megszüntetését. Bár a cseh támogatási rendszerek összességében összeegyeztethetők az EU belső piacával, az EU több javaslatot tett annak módosítására. A jelenlegi szabályozást a közeljövőben módosítani tervezik, melynek keretében a betáplálási tarifarendszer megszűnik, 1 MW beépített kapacitás alatt óránként érvényes zöld bónuszok lesznek. Az 1 MW beépített kapacitás felett az aukciós

rendszer kerül bevezetésre. Az új jogszabály a túlkompensáció kérdésével is foglalkozik. A javasolt rendelet célja a túlkompensáció eseteinek azonosítása, és ha ilyen eseteket fedeznek fel, a mechanizmus biztosítja a túlkompensáció kiküszöbölését vagy a túlkompenzált összegek visszafizetését. A módosítási tervezet bevezeti a hatóságok általi ágazati ellenőrzéseket is. A nagyobb létesítmények fejlesztésének támogatása jelenleg korlátozott. Ez a viszonylag alacsony villamosenergia-árakkal együtt azt sugallja, hogy a közeljövőben nem lesz sok lehetőség a nagyobb projektek beindítására. A kisméretű megújuló energiaforrások fejlesztése kapcsán azonban két tendencia mutatható ki, a tetőtéri napelemes létesítmények fejlesztése és az energiatárolásba történő beruházások. A cseh kormány számos intézkedést és támogatási rendszert vezetett be a fejlesztések megvalósítása érdekében. A megújuló energiát és az energiatárolást közvetett módon támogatják az önkormányzatok vagy egyes kkv-k számára nyújtott támogatások is. Lehetséges a vállalati megújuló HTM-ek (nem támogatott) piacának kialakítása is, amely kihasználhatja egyes megújuló energiaforrások (pl. napenergia) építésének csökkenő költségeit (Gürtler et al. 2019, IEA 2016, Tanil és Jurek 2020).

Ausztria a megújuló energiák terén világelső. 2018-ban a termelt villamos energia nagyjából 80%-a megújuló forrásokból származott. A víz az összes megújuló energia 58%-át adja, a biomassza pedig 33%-ot. A szél- és napenergia-termelés jelentősége (6,6%) is folyamatosan emelkedőtendenciát mutat. A vízenergia hosszú évtizedek óta Ausztriában a legnagyobb áramforrás. 2018-ban a vízenergia 38 TWh-ot termelt, ami a teljes termelés 58 %-át teszi ki. Az ország domborzata kedvez a megújuló energiatermelésnek, továbbá az Uniós jogon alapuló jogszabályi keretek szintén elősegítik a szektor fejlődését. Ausztria megújuló energiára vonatkozó céljait az Európai Unió megújuló energiáról szóló irányelve (RED II) szerinti kötelezettségek vezérlik. A megújuló energia támogatásának mozgatórugója a zöld villamos energiáról szóló 2012. évi törvény, amelyet folyamatosan módosítanak a megújuló energia részarányának további növelése érdekében. A 2020-ban kitűzött célok alapján Ausztriának 2030-ban 100%-ban megújuló alapon kell a villamosenergiát előállítani és 2040-ig el kell érnie a teljes karbonsemlegességet. Ausztria 2030-ra megújuló energiára vonatkozó célkitűzését a bruttó végső fogyasztás 46-50%-ában határozták meg. Ehhez 22-27 TWh bővítésre lenne szükség a megújuló energiaforrásokból történő termelés szintjén, ennek a növekedésnek jelentős részét szél és napenergiából kell előállítani, mivel a vízenergia forrásokat már többnyire kiaknázták, valamint a biomasszából történő előállítás várhatóan nem fog jelentősen növekedni (IEA 2020a, Terreros et al. 2020, Wurster és Hagemann 2020).

2018. január 1-jétől a Green Electricity Clearing and Settlement Agency (OeMAG) dönt a napenergia, a szél és a kis vízerőművek jóváhagyási kérelmeiről és szerződést köt ezen erőművek támogatására. A beruházási támogatásoknak meg kell felelniük a 651/2014/EU rendeletnek. 2017-től a kis vízerőművek támogatását évi 16 millió euróról 20 millió euróra növelték. Ezzel szemben a naperőművek beruházási támogatásait 15 millió euróra korlátozták a 2018-as és 2019-es években. 2019 októberében ismét módosították a zöld villamos energiáról szóló 2012. évi törvényt. A fő cél a támogatási várólisták csökkentése volt. További 30 millió eurót bocsátottak rendelkezésre közepes méretű vízenenergia-beruházásokhoz, és ezzel egyidejűleg a támogatások összegét 10%-ról 15%-ra, vagy maximum 400 EUR/kW-ról 650 EUR/kW-ra növelték (IEA 2020, Wurster és Hagemann 2020).

Ausztria már 2000-ben döntött a megújuló energiaforrások támogatását szolgáló nemzeti rendszer bevezetéséről, és megnyitott az utat a befektetők előtt a megújuló energiatermelés felé. Ausztria betáplálási tarifával és beruházási támogatásokkal támogatja a megújuló energiaforrásokból történő villamosenergia-termelést. A támogatásnak költségvetési felső határa van, amely 2012 óta évente csökken. Jelenlegi átvételi tarifa, a szél-, a szilárd és folyékony biomassza, a biogáz vagy a geotermikus energia termelését támogatja, függetlenül a rendszer kapacitásától. A napenergia átvételi tarifája az 5 kW feletti kapacitású rendszerekre korlátozódik. A vízenenergia esetében az átvételi díjak csak a 2 MW-nál kisebb teljesítményű rendszerekre vonatkoznak. A betáplálási tarifának további technológia-specifikus követelményei vannak a rendszer hatékonyságával, a felhasznált üzemanyag-készletek típusával és egyéb műszaki előírásokkal kapcsolatban. 2018. január 1-je óta a szilárd, folyékony és gáznemű biomassza erőművek szigorúbb jogosultsági feltételekkel rendelkeznek. A betáplálási tarifához a termelési eszközt zöld villamoserőműként be kell jegyezni a regionális kormányznál. A bejegyzett üzemek 13 évig, a biomassza- és biogázüzemek esetében pedig 15 évig részesülhetnek a betáplálási tarifában. A zöld megújuló energiákról szóló 2012. évi törvényben meghatározott jelenlegi megújuló energiák támogatási rendszere valószínűleg 2020 végéig lesz érvényben, ezt követően a kormány a rendszer frissítését tervezi, hogy a 2030-as célok elérésére összpontosítson. A frissített rendszer egy versenyképes aukciós rendszert vezet be a nagy teljesítményű megújuló energiatermelő létesítmények számára (IEA 2020a, Zipp 2017, Wurster és Hagemann 2020).

A 2012. évi zöld villamosenergia-törvény alapján létrehozott elszámolási ügynökség (OeMAG) köteles megújuló energiaforrásokból előállított összes villamos energiát megvásárolni a vonatkozó átvételi tarifa és a piaci ár által meghatározott áron, és eladni ezt a villamos energia

kereskedőknek, akik viszont a nagykereskedelmi piacon értékesítik az áramot. A megújuló energiát termelőket előnyben részesítik a villamos energia értékesítésében, szemben a nem megújuló energiatermeléssel. A betáplálási tarifa keret a megalakulása óta kevés, a pályázatot benyújtó projektek száma meghaladja az éves költségvetést, és egyes projekteknek hosszabb ideig kell várniuk a betáplálási tarifához való hozzáférésre. Ausztriában a napelemek viszonylag lassú terjedésének egyik fő oka az éves támogatás felső határa. Válaszul a kormány többször módosította a zöld villamos energiáról szóló 2012. évi törvényt. A betáplálási tarifa költségvetését többféle mechanizmus finanszírozza, ideértve a megújuló energia pótdíját, amelyet az áramfogyasztók fizetnek. Az 500 kW-nál kisebb, az épületekbe integrált napenergia-projektek (pl. tetőtéri PV) beruházási is jogosultak támogatásra, amely a projekt költségeinek 30%-át fedezi, ők egyaránt jogosultak a betáplálási tarifára is. A napelemek terjedésének legfontosabb akadályai a magas beruházási költségek és a bonyolult engedélyeztetési folyamat. Az Osztrák Klíma- és Energiaügyi Alap két beruházási támogatást is támogat a napenergiával kapcsolatban, egyet a magánlakásokon vagy kereskedelmi ingatlanokban lévő napenergia projektekhez, egyet pedig a mezőgazdasági és erdészeti szektor napenergia projektjeihez. A tervezett rendszerben a megújuló energiával kapcsolatos projektek közvetlenül részt vesznek a villamosenergia-piacokon. Ez alatt teljes piaci részvételt kell érteni, ideértve a kiegyensúlyozó és ellenőrző piacra és a hálózati tartalékpiacon való belépést (Fina et al. 2021, IEA 2020a, Gsodam et al. 2015, Wurster és Hagemann 2020, Shivakumar et al. 2019).

Magyarországon a megújuló energiaforrásokból történő villamosenergia-termelés gyorsan fejlődő szektornak tekinthető. 2018-ban a megújuló energiaforrások aránya a villamos energia végső fogyasztásában 8,5% volt, a megújuló energiaforrások legfőbb típusa Magyarországon a biomassza. A jelenlegi villamosenergia-törvény 2008. január 1-jei hatálybalépése és a megújuló energiaforrásokból előállított villamos energia kötelező átvételi rendszerének bevezetése előtt egyes termelők már elkezdték fontolóra venni meglévő erőműveik üzemanyag-forrásának szénről/gázzal biomasszára való átállítását. 2017 és 2018 között a megújuló energiaforrásokból előállított villamos energia növekedése elsősorban a napelemek beépített kapacitásának növekedéséből származik. Egyre nagyobb a kereslet a napenergia iránt, mind háztartási, mind ipari szinten. Néhány nagyobb méretű (önálló vagy ipari projekt részeként működő) naperőmű már működik, országos telepített kapacitása 680 MW körül alakul. A jelenlegi kormányzati tervek szerint a kapacitást 2030-ig 4000 MW-ra növelnék. Az engedélyt nem igénylő háztartási méretű naperőművek száma is folyamatosan növekszik, a beépített teljes kapacitásuk 2017 végén 240 MW volt (Bartek-Lesi et al 2019, Tóth és Kulin 2019).

2017-ben új operatív támogatási rendszert, a METÁR-t (Megújuló Támogatási Rendszer) vezettek be a megújuló alapú villamosenergia-termeléshez. A szükséges jogszabály-módosításokat a parlament 2016. júniusban és decemberben fogadta el. A KÁT (kötelező átvételi rendszer) rendszer a METÁR bevezetését követően továbbra is működik a meglévő üzemek esetében, a METÁR támogatási mechanizmusra azonban csak az új belépők jogosultak. Az új mechanizmus célja a megújuló villamosenergia-termelők piaci integrációjának megkönnyítése, valamint Magyarország 2030-as megújuló energiával kapcsolatos céljainak támogatása. A METÁR keretében a megújuló villamosenergia-termelőknek (a 0,5 MW alatti és a már betáplálási tarifát kapó villamos erőművek kivételével) villamos energiát kell értékesíteniük a piacon (Haffner 2018, Tóth és Somossy 2020).

A METÁR rendszer keretében a megújuló forrásokból előállított villamos energiát a termelőtől háromféle módon vehetik át (Haffner 2018) (4-1. ábra):

- Előre meghatározott, kötelező betáplálási tarifával (kisebb villamosenergia-termelő egységek esetében).
- Prémiumtámogatást nyújthat a termelőnek a MEKH
- Prémium támogatást a MEKH által meghirdetett pályázati eljárás útján ítélik oda a termelőnek

A legutóbbi legfontosabb változás a megújuló energiaforrások szektorában a METÁR bevezetése volt. Ezt 2017. január 1-je óta alkalmazzák a megújuló energiaforrásokból előállított villamos energiára. A METÁR kötelező betáplálási tarifákat és prémiumtámogatásokat kínál a megújuló energiaforrásokat használó újonnan épített villamosenergia-termelő egységeknek, vagy a meglévő egységeknek, amelyeket felújítanak, ha a felújítási költségek meghaladják az eredeti beruházás 50%-át. A kötelező betáplálási tarifák azokra a termelőegységekre vonatkoznak, amelyek kapacitása nem haladja meg a 0,5 MW-ot. A tarifákat a jogszabályok határozzák meg, és évente indexelik. A tarifák további diverzifikálása a napszakon és a megújuló energia típusán (nap, szél vagy egyéb) alapul. Az átvitelrendszer-üzemeltető köteles átvenni a kötelező betáplálási tarifarendszerbe felvett termelőegység által termelt villamos energiát a MEKH által meghatározott villamosenergia-mennyiség erejéig, és a kötelező betáplálási tarifát megfizetni a termelőnek. A kötelező betáplálási tarifára azonban nem lehet jogosultságot benyújtani 2018. április 26. után. A 0,5 MW-nál kisebb teljesítményű erőművek (kivéve szélenergia) és demonstrációs projektek esetén a megtermelt villamos energiát a MAVIR, az átvitelrendszer-üzemeltető vásárolja meg (a rendelet által megszabott áron) és értékesíti a villamosenergia-nagykereskedelmi piacon (HUPX). A MEKH-től igényelhető

prémium támogatás a 0,5-1 MW kapacitású termelőegységekhez. 2019. május 1-je után pályázati eljárás nélkül nem ítélt oda prémium támogatást a hatóság. Nagyobb (1 MW feletti) erőművek és szél erőművek esetében a prémium támogatás csak versenytárgyalási eljárás útján nyújtható (kivéve a demonstrációs projekteket). Az 1 MW teljesítmény feletti termelőegységek prémium támogatását meghívásos pályázati eljárás útján nyújtják. A jogszabályok meghatározzák a prémiumtámogatások összesített összegének legmagasabb szintjét, és évente újraszámítják őket. A prémium támogatásban részesülő termelőknek villamos energiájukat külön kell értékesíteniük a piacon. A prémium támogatást az átvitelrendszer-üzemeltető a jogosult termelőknek folyósítja, a HUPX előző napi árai és a termelő pályázati kiírásában meghatározott támogatott ár, vagy pályázat nélkül nyújtott támogatás esetén a jogszabályban meghatározott számítási módszer alapján. Az új jogszabály meghatározza, hogy azok a termelők, amelyek 2016. december 31. előtt kérték a szükséges szabályozási engedélyeket, jogosultak maradni a korábbi kötelező kivételi rendszerben (KÁT). Bevezetését követően számos változás történt a METÁR rendszerben. 2018. április 26. óta nincs jogosultság a kötelező betáplálási tarifa megadására, és 2019. május 1. után a MEKH (szabályozó hatóság) nem ítélt oda zöld prémium támogatást pályázat (METÁR-tender) nélkül. Az első METÁR-tenderen kétféle támogatási kategóriát alakítottak ki, ezek voltak a 0,3 MW és 1 MW közötti és a 1 MW és 20 MW közötti erőműegységek kategóriái (4-2. ábra) (Haffner 2018, Tóth és Somossy 2020). A hazai megújuló energiával kapcsolatos beruházások esetében a támogatások, valamint a hálózatra való csatlakozás a leginkább releváns telepítési szempont. A társadalmi és környezeti jellemzők azonban csak kismértékű befolyással bírnak, mely esetében a szél erőművek telepítése esetében a legnagyobb korlátozást a településektől vett minimális kötelező távolság jelenti. Ez gyakorlatilag Magyarország nagy részén kizárja ezeket a beruházásokat. A legfontosabb beruházásösztönző eszköz a megújuló energiatermelők telepítése szempontjából az állami támogatások mértéke és a kötelező átvételi rendszer által biztosított ár és folyamatos áramátvétel. Az áramátvétel, mint ösztönzőrendszer azonban torzította az optimális telephelyválasztást (Somossy – Tóth 2015; Tóth 2019).

Az elektromos energiáról szóló törvény kiemelt hálózati csatlakozást és hozzáférést biztosít a megújuló energiaforrásokból előállított villamos energia számára. Ezenkívül a megújuló energia javára korlátozásokat szab az áram behozatalára vonatkozóan. A megújuló energiát hasznosító erőművek bekapcsolásának és a hálózat bővítésének költségeit bizonyos feltételektől függően az erőmű vagy a hálózat üzemeltetője viseli. A pozitív szabályozás ellenére az elégtelen hálózati kapacitás, a magas csatlakozási költségek és a nagyon nehéz és

lassú engedélyezési folyamat jelentős akadályokat jelent a megújuló energiaforrások bővülése tekintetében. Az engedélyezési folyamatban nagy számú hatóság vesz részt és jelenleg sok kérelmet elutasítanak. Ha Magyarország a megújuló energiaforrások piacát ki akarja aknázni akkor jelentős átalakításra lesz szükség. A 2016 végén bevezetésre került a potenciális jövőbeli szélenergia projektek kormányzat általi ellenőrzése, amely szigorú korlátozó építési rendelkezéseket tartalmazott. A jelenlegi szabályozási környezet ezáltal gyakorlatilag lehetlenné teszi az új szélenergia projektek engedélyeztetését. A szélenergia vonatkozásában a közelmúltban hozott korlátozó intézkedések hatására a megújuló energiaforrások legnagyobb valószínűséggel a nap- és a geotermikus energia kiaknázásnak irányában fognak fejlődni. A napenergia tűnik a megújuló energiatermelő ágazat legígéretesebb szegmensének (Haffner 2018, Hortay és Víg 2020, Kulcsár 2019, Tóth és Somossy 2020).

Az áttekintett szakirodalmak alapján látható, hogy az öt vizsgált ország közül Ausztria kivételével a megújuló energiák aránya az országok energiamixében 10-15% közötti, az elmúlt években dinamikus fejlődést mutat. Ausztriában a megújuló energiák aránya 80% feletti, ezzel pedig világelső a megújuló területén. A területi adottságoknak megfelelően, a vizsgált országok eltérnek abban, hogy mely megújuló források a dominánsak. Az EU célkitűzéseivel összhangban, minden vizsgált ország vállalata, hogy 2030-ra növeli a megújuló arányát az ország energiamixében. A jövőben minden vizsgált ország esetében nagy szerepet kap a napenergia hasznosítása, Ausztriában, Lengyelországban és Szlovákiában emellett a szélenergia hasznosítására kívánják a hangsúlyt helyezni, addig Csehország és Magyarország a megújuló mellett az atomenergiával is számol.

Minden vizsgált ország esetében szükség van a megújuló forrásból előállított villamosenergia támogatására, annak érdekében, hogy versenyképes legyen a fosszilis forrásból származó energiákkal. Lengyelországban, Ausztriában a zöld igazolások rendszere segíti ezt a folyamatot. A vizsgált országok közül Ausztriában működik legrégebb óta ilyen rendszer. Minden vizsgált országban jelentős reformok zajlottak a megújuló támogatásának területén az elmúlt években, melyek az EU-s célkitűzéseknek való megfelelést szolgálták. Ennek köszönhetően Magyarországon, Csehországban, Lengyelországban és Szlovákiában párhuzamosan két támogatási rendszer is létezik. A régebbi rendszerek betáplálási tarifán alapulnak, az újabb támogatási rendszerek pedig a piacon történő (aukciós) értékesítést támogatják. A jogszabályi változások hatására lehetőség nyílt a megújuló forrásból származó villamosenergia aukciókon történő értékesítésére, ezáltal pedig a liberalizált energiapiacra való részvételre. A támogatás mértékét és időtartamát, az adott ország illetékes szervezete határozza

meg, a fennálló jogszabályok alapján. A megújuló energiaforrásból termelt villamosenergia, piacokon történő értékesítést, minden vizsgált ország esetében külön szervezet felügyeli és szabályozza. Ausztriában az energia tőzsdén (EXAA) lehetőség van külön a megújuló forrásból származó villamosenergiával kereskedni.

Minden vizsgált országban különböző akadályok nehezítették a megújuló forrásból történő villamosenergia széleskörű elterjedését. Általános jelenségnek tekinthető a túlkompensáció és a csatlakozási eljárás nehézségei, melyek ellen jogszabályi változtatásokkal kívánnak fellépni az adott országok hatóságai. Csehország esetében tapasztalható, hogy az üzemeltető a hálózati kapacitás elégtelenségével magyarázta a csatlakozási engedélyek kiadásának megakadályozását. Lengyelországban és Magyarországon a kedvezőtlen jogszabályi környezet akadályozza a szélenergia terjedését. Mindazonáltal a szélenergia környezeti és gazdasági tényezői sem elhanyagolhatók, nem minden esetben indokolt ezek telepítésének előmozdítása.

5. TERÜLETI POLITIKA A VILLAMOS ENERGIA PIACÁN

Annak érdekében, hogy megvizsgálhassuk és megértsük a fókuszban lévő országok energiapiacán zajló folyamatokat, térbeli elemzésre van szükségünk. A gazdaságföldrajzban Dusek (2004) szerint a régiókat tényleges kiterjedéssel rendelkező egységenként kell kezelni. A szerző rávilágít arra, hogy az egyes termékek értékére azok térbeli pozíciója is jelentős hatással van. Az egy ár törvényének térbeli piacra történő általánosítása alapján a szállítható termékek két pont között árkülönbsége, nem haladhatja meg a szállítás költségét. Ez alapján villamosenergiát is tekinthetjük egyfajta szállítható terméknek, a regionális kereskedelemnek a decentralizált energiatermelés adott jelentős löketet az elmúlt években. Az energiatermelés az utóbbi néhány év kivételével centralizált folyamatnak volt tekinthető, azaz néhány nagyobb csomópontban összpontosult, a villamosenergia rendszerek jellemzően országon belül szerveződtek. A villamosenergiát előállító erőművek pedig az alapanyagot (szén, gáz) jellemzően egy térben jól körülhatárolható régióból szerezték be. A hálózatok azonban a megújuló energiaforrások térnyerésének és növekvő nemzetközi együttműködéseknek köszönhetően mára decentralizálttá váltak, a fogyasztás és a termelés szempontjából is. A megújuló források térnyerésével a fosszilis tüzelőanyagokkal nem rendelkező térségek is bekapcsolódhattak az energiatermelés és elosztás rendszerébe (Csák 2015).

Csák (2015) hangsúlyozza, hogy a decentralizáció hatására a hálózati minta is jelentősen megváltozott, a fogyasztók maguk is potenciális termelőkkel váltak, másrészt a kisebb kapacitású megújuló forrást hasznosító erőművek (pl.: szél, víz, nap) térben elszórtan helyezkednek el, ezáltal Európai szinten is egy meglehetősen sűrű hálózat alakult ki a kiserőművekből. A jelenlegi kisebb erőművek által termelt energia térben és időben egyaránt változó módon jelenik meg, a termelt áram mintázata ezért sok esetben előre nem látható mintázatot mutat (Csák 2015, Sovacool 2011). Fabók (2015) hangsúlyozza, hogy az energiatermelésben megvalósuló átrendeződés többféle scenárió mentén valósulhat meg, melyek közül az egyik lehetséges irány egy európai szuperhálózat kialakulása, a másik a háztartási szintű villamosenergia-rendszerek térnyerése. A folyamat során a termelés és felhasználás földrajzi mintázata jelentősen átalakul. A szerző szerint elképzelhető, hogy néhány évtized múlva egy integrált európai szuperhálózatból kapjuk villamosenergiánkat, a termelés alapja pedig déleurópai naperőműparkok és az Északi-tengeren található szélenergiafarmok lesznek. Ebben az esetben néhány óriásvállalat és az EU fog felelni a termelésért és az elosztásért. Az energiapolitika pedig a területpolitikába fog integrálódni, központi célkitűzés lesz a dekarbonizáció (Fabók 2015).

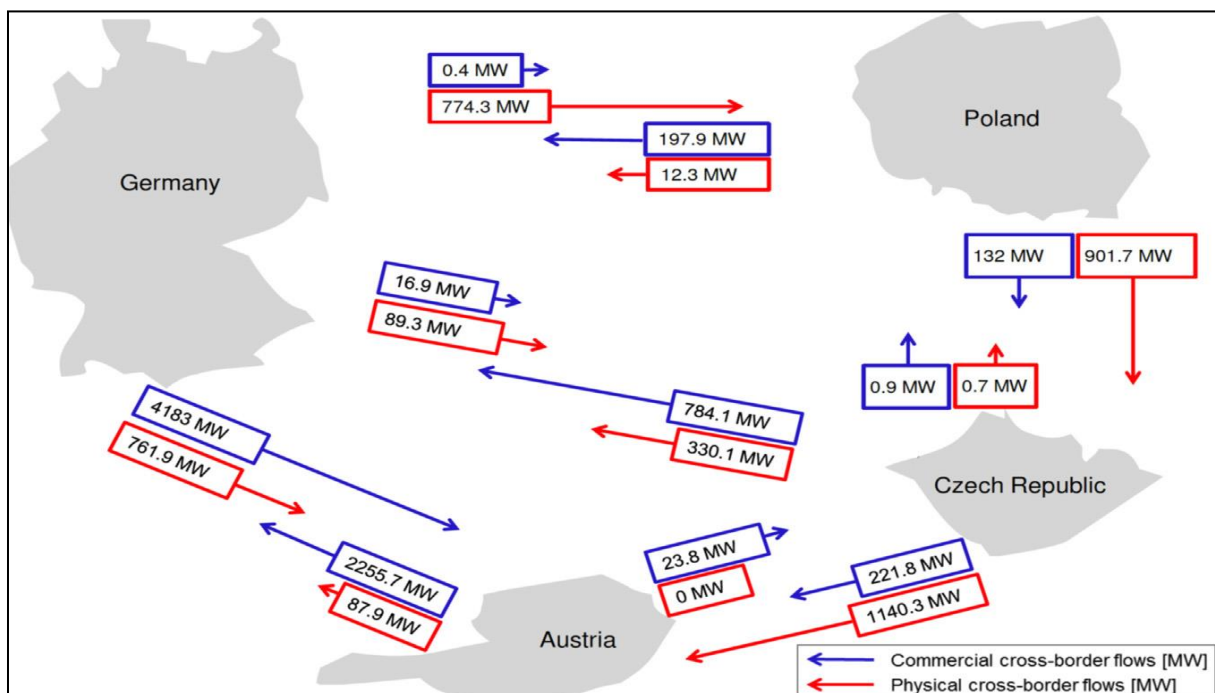
A megújuló energiák közül azok esetében, ahol az erőforrás változékonysága magas (pl.: fotovoltaiikus, szélturbina) és a termelés kevésbé jelezhető előre, a költségek optimalizálása és az erőforrások maximális kihasználása érdekében megoldást kellett találni. Ezáltal a megújuló energiaforrások hasznosítása, az ingadozások kiegyenlítése és a folyamatos energiaellátás biztosítása érdekében szükségessé vált a hálózatok összekapcsolása az EU tagállamaiban, sűríteni kellett a hálózatot az országokon belül és azok között is. A hálózatok összekapcsolásával egy viszonylag kiegyensúlyozott rendszer jöhet létre, amely mind a fogyasztók, mind a termelők érdekeit egyaránt szolgálja. Az Európai Unió (EU) harmadik energiacsomagja 2009-ben kiemelten kezelte az egységes gáz- és villamosenergia-piac megteremtését és a hálózatok összekapcsolását. Ez a csomag kötelező irányelveket adott ki az EU-tagállamoknak a szükséges infrastruktúra-fejlesztés és megfelelő szakpolitikai reformok elérése érdekében. Az EU geopolitikai határain átnyúló árcsökkenés és az energiához való hozzájutás egyidejű elérése érdekében a villamosenergia-piacok és hálózatok fokozottabb integrációja szükséges. Néhány évvel ezelőttig az európai energiapiacok nemzeti rendszerekként szerveződtek, korlátozott összekapcsolódásokkal és cserékkel. Az 1990-es években történt liberalizáció óta azonban az európai villamosenergia-piacok fokozatosan fejlődtek és integrálódtak. Az infrastruktúra és a piacok kontinentális szintű integrációja azonban még korántsem tekinthető teljesnek (Csák 2015, Haffner 2018, Singh et al. 2016).

Az egyértelmű, hogy az energiabiztonság alapvető a gazdasági növekedés és a társadalmi jólét biztosításához. Az áramtermelő rendszerek biztonsága érdekében vállalt tevékenységek közé tartozik a szomszédos országok közötti együttműködés a villamosenergia-csere terén. A villamosenergia-piacok integrációja az Európai Unió energiapolitikájának egyik legfontosabb kihívása. Az Európai Bizottság irányelvet adott ki az összekapcsolásról, amely szerint a rendszerösszekötők kapacitásának 2020-ig a beépített kapacitás 10%-ának (2030-ig pedig 15%-ának) kell lennie minden tagállamban (Komorowska 2019).

A szél és a nap azon megújuló források melyek esetében különösen fontos a hálózatok összekötése. A szélenergia-termelés térhódítása az energiarendszerekben tovább növekszik, a vizsgált országok közül különösen Lengyelország érintett a kérdésben. A szélenergiával kapcsolatos változékonyság kihívásokat jelent az energiarendszer-üzemeltetők számára. Több tanulmány hangsúlyozza a szélerőművek földrajzi sokszínűségének hatását az energiarendszer működésére. A szélkapacitás nagy földrajzi kiterjedése nagymértékben csökkenti a szélenergia összesített változékonyságát. A beépített kapacitás nagy földrajzi kiterjedése csökkentheti a szélenergia változékonyságát és a zökkenőmentes energiatermelést tesz lehetővé.

Ezt villamosenergia-összeköttetések és tárolórendszerek alkalmazásával lehetne elérni. Az összekapcsolások és a tárolás azonban nem teljesen rugalmasak, az optimalizálás elengedhetetlen az energiarendszer korlátjainak leküzdése érdekében. Ez különösen fontos a rendszerösszekötő áramlások tervezése és üzemeltetése, a tárolás optimalizálása és a határokon átnyúló energiakereskedelem során. A szélenergia-kapacitás megnövekedett földrajzi sokfélesége és a turbinák számának növekedése számos előnnyel járhat az energiarendszer-üzemeltetők számára. A kiegészítő szolgáltatások relatív igénye is csökkenhet az aggregált szélenergiára gyakorolt simító hatás miatt. A földrajzi sokféleség és a turbinák nagyobb száma egyaránt az összesített teljesítmény alacsonyabb időbeli változékonyságához vezet, a nagy teljesítményű és kis teljesítményű események rövidebb időtartamához, valamint kisebb előrejelzési hibákhoz vezet. A szélenergia nagymértékű elterjedése azonban problémákat és kihívásokat is jelent az átvitelrendszer-üzemeltetők (TSO) számára. A feszültségszabályozást és a rendszerbiztonságot nagymértékben befolyásolja a szélenergia ingadozása a nagyon gyenge összeköttetésű rendszerekben (Holtinen et al. 2011, Malvaldi et al. 2017).

5-1. ÁBRA: ÁTLAGOS FIZIKAI ÉS KERESKEDELMI FORGALOM A KÖZÉP-EURÓPAI RÉGIÓBAN A 2012. JÚLIUS ÉS SZEPTEMBER KÖZÖTTI IDŐSZAKBAN



(forrás: Singh et al. 2016)

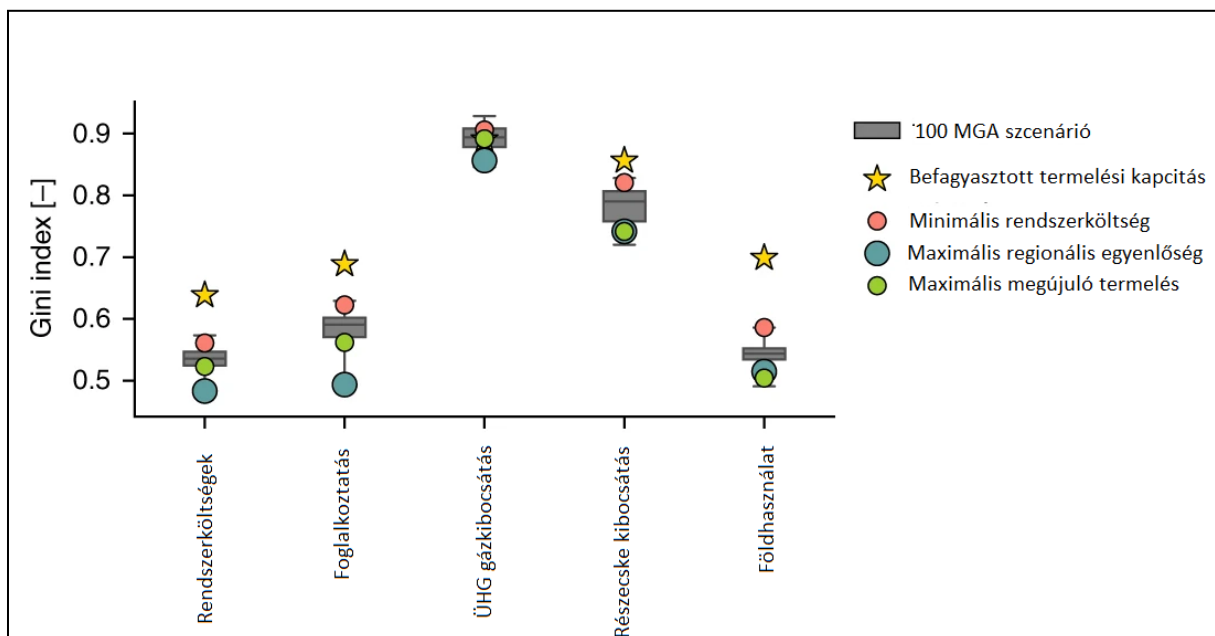
A teljesen integrált energiapiac (teljes összekapcsoltság megvalósulása) előfeltétele annak, hogy az EU energiapolitikai céljai (megfizethető és versenyképes energiaárak, ellátásbiztonság és környezeti fenntarthatóság az energiaszektorban) megvalósuljanak. Az egységes energiapiac

megvalósítása és az átviteli hálózatok összekapcsolása elősegítheti a termelési és átviteli infrastruktúra optimális felhasználását. Továbbá a piacok hatékony működése a befektetőkre is pozitív hatást gyakorol. Singh és munkatársainak (2016) tanulmánya rámutat arra, hogy a közép-kelet-európai és a közép-nyugat-európai villamosenergia-piacok összekapcsolásain számos nem tervezett áramáramlás történik (5-1. ábra). A nem tervezett áramlások nagysága és iránya ellentétes az EU piacösszekapcsolási politikájának kitűzött céljával, mivel a potenciális kereskedelmi lehetőségek sok esetben elvesznek, továbbá az átviteli kapacitások kihasználására ezek a folyamatok nem hatnak ösztönzőleg. A térségben a nagymértékű nem tervezett áramlások előfordulásának három oka lehet. Először is a németországi átviteli infrastruktúra-fejlesztési tervek késedelme, különös tekintettel a további átviteli kapacitásra és a vezérlési infrastruktúrára. Másodsor, a változó megújuló energiaforrások számottevő növekedése Észak-Németországban, amelyet a preferenciális betáplálási politika vezérel. Végül a német és az osztrák piac egységes ajánlattételi zónaként való működése. Ennek következtében az észak-németországi szélenergiával termelt villamos energia gyakran a kelet-közép-európai régió és az Ausztria–Németország összeköttetéseken keresztül halad a dél-németországi kereslet kiszolgálása érdekében. A Németországból Lengyelországba irányuló fizikai áramlások jelentősen meghaladják a kereskedelmi menetrendeket, és ellentétesek a kereskedelmi menetrendekkel a változó megújuló energiátöbblet, amely folyamatosan növekszik, és amely földrajzilag a nem optimálisan kialakított piacokon (ajánlati zónákon) koncentrálódik, a nem tervezett áramlásokat az összekapcsolt CWE és CEE rendszeren belül más határokra tolhatja, vagy elriaszthatja a további beruházásokat a megújuló energiatermelés ágazatába. Mindkét eredmény ellentétes lenne a belső energiapiac és a megújuló energiaforrások fejlesztését elősegítő uniós politikák szándékával (Singh et al. 2016).

Sasse és Trutnevyte (2020) véleménye szerint a rendszerköltségek minimalizálásának, a regionális egyenlőség és a megújuló villamosenergia-termelés maximalizálásának nagyon eltérő regionális megvalósítási módjai vannak. Ezek a célok egyszerre nem érhetők el a szerzők szerint. A regionális hatások térbeli eloszlását a Gini-indexszel értékelve egyértelmű különbségeket tapasztaltak a három cél közötti regionális egyenlőségek és egyenlőtlenségek tekintetében. A rendszerköltségek minimalizálása nagy központi szén-, tengeri szélenergia-, nagy vízenergia- és biomassza-hulladék-termelési kapacitást, valamint nagy átviteli kapacitást igényel. A rendszerköltségek regionális egyenlőségének maximalizálása nagy decentralizált megújuló és gázalapú termelőkapacitásokat, valamint további tárolási kapacitásokat igényel. A megújuló villamosenergia-termelés maximalizálása nagy megújuló és nukleáris termelési

kapacitást, valamint kiugróan magas tárolási és átviteli kapacitást igényel. A szerzők úgy vélik, hogy a lignit és az atomenergia teljes kivonása 2035-ig nem kivitelezhető, míg a kőszén, gáz és olaj fokozatos megszüntetése igen.² A lignit alapú energiatermelés leállítása különösen Lengyelországban nem megvalósítható, a technológia korlátozott kiépítése miatt. 2018-hoz képest a 2035-ös közép-európai villamosenergia-célok további 18-43%-kal növelik a rendszerköltségek regionális egyenlőtlenségét, és további 97-140%-kal növelik a megújuló villamosenergia-termelést (Sasse és Trutnevyte 2020).

5-2. ÁBRA: GINI-INDEX A RENDSZERKÖLTSÉGEKRE, A FOGLALKOZTATÁSRA, AZ ÜVEGHÁZHATÁST OKOZÓ GÁZOK KIBOCSÁTÁSÁRA, A RÉSZECSCHE-KIBOCSÁTÁSRA ÉS A FÖLDHASZNÁLATRA GYAKOROLT REGIONÁLIS HATÁSOK TÉRBELI ELOSZLÁSÁRA



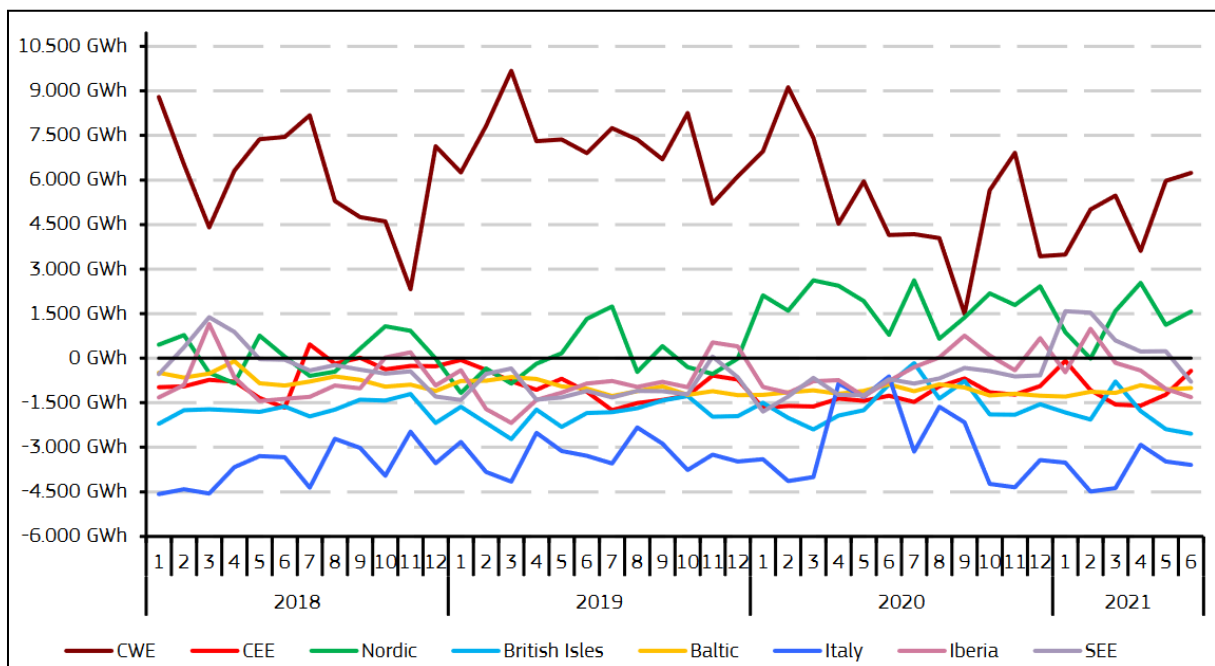
Megj.: Gini-index a rendszerköltségekre, a foglalkoztatásra, az üvegházhatást okozó gázok kibocsátására, a részecske-kibocsátásra és a földhasználatra gyakorolt regionális hatások térbeli eloszlására. Az 1,0-s Gini-index a tökéletes regionális egyenlőtlenséget, a 0,0-s Gini-index pedig a tökéletes regionális egyenlőséget jelzi. (forrás: Sasse és Trutnevyte 2020)

A kitűzött három cél, azaz a költségek minimalizálása, az egyenlőség és a megújuló energiatermelés maximalizálása eltérő térbeli mintázatot mutat a regionális termelési, tárolási és átviteli kapacitások tekintetében. A rendszerköltségek minimalizálása ösztönözi a szélerőművi kapacitások térbeli koncentrációját a szeles és alacsony termelési költségekkel rendelkező régiókban, például Németország és Lengyelország partmenti területein, valamint Ausztria keleti részén. Hasonlóképpen ösztönözi a napelem-kapacitások térbeli koncentrációját

² Mindemellett megjegyzendő, hogy az atomerőművek iránti nagy lobbifránciára részéről ugyancsak lassítja és megnehezíti az atomerőművek kivonását.

azokban a régiókban, ahol magas a napsugárzás és alacsony az előállítási költség. A szerzők szerint költséghatékony a legtöbb nukleáris kapacitást Franciaországban, a szénkapacitást pedig Németországban és Lengyelországban tartani. Ahelyett, hogy az akkumulátor-és hidrogéntárolásba fektetnék be az országok, költséghatékony az átviteli kapacitások bővítése az országok között és a partmenti területeken az időszakos villamosenergia-kiegyenlítés érdekében. Az átviteli kapacitás bővítése elkerülhetetlen a közép-európai régióban (Sasse és Trutnevyte 2020). Zappa és van den Broek (2018) is hangsúlyozzák, hogy a változó megújuló energiaforrások energiagenerálási profiljai mind a technológia típusától, mind az időjárási viszonyoktól függenek, ezeket pedig meghatározza a helyszín, ahová telepítik őket. A szerzők a változó megújuló energiaforrások térbeli eloszlásának optimalizálását javasolták az energiarendszerbe történő integrálás egyik módjaként.

5-3. ÁBRA: A VILLAGENERGIA REGIONÁLIS HATÁRON ÁTNYÚLÓ ÁRAMLÁSAI (FIZIKAI ÁRAMLÁSOK) 2021 MÁSODIK NEGYEDÉVÉBEN AZ ENTSO-E RÉGIÓK ALAPJÁN.



Jelkules: CWE (AT, DE, BE, NL, FR, CH), CEE (CZ, HU, PL, SK, SI, RO), skandináv (DK, SE, FI, NO), Balti (LT, LV, EE), Ibéria (ES, PT), SEE (BG, GR, HR, RS, BA, ME, MK, AL), Brit-szigetek (UK, IE), Appennin-félsziget (IT, MT)

(Forrás: EC 2021b)

Az elmúlt évek regionális határokon átnyúló áramlásait vizsgálva megállapítható, hogy Közép-Nyugat-Európa (CWE) a fő exportáló régió pozícióját tölti be, bőséges és változatos termelőkapacitással, valamint más régiók ellátására alkalmas központi pozícióval rendelkezik (5-3. ábra). 2021 második negyedévében a CWE 15 TWh nettó exportjával kihasználta erős

potenciálját, és ismét a legnagyobb kiáramlási forrás volt, 8%-kal növelve az áramlást 2020 második negyedévéhez képest. A növekedés elsősorban a CWE piacon belüli magasabb termelésre vezethető vissza, ami növelte az export lehetőségét. A kelet-közép-európai régió (CEE) az elmúlt években szinte folyamatosan nettó importőr pozícióban van (EC 2021b).

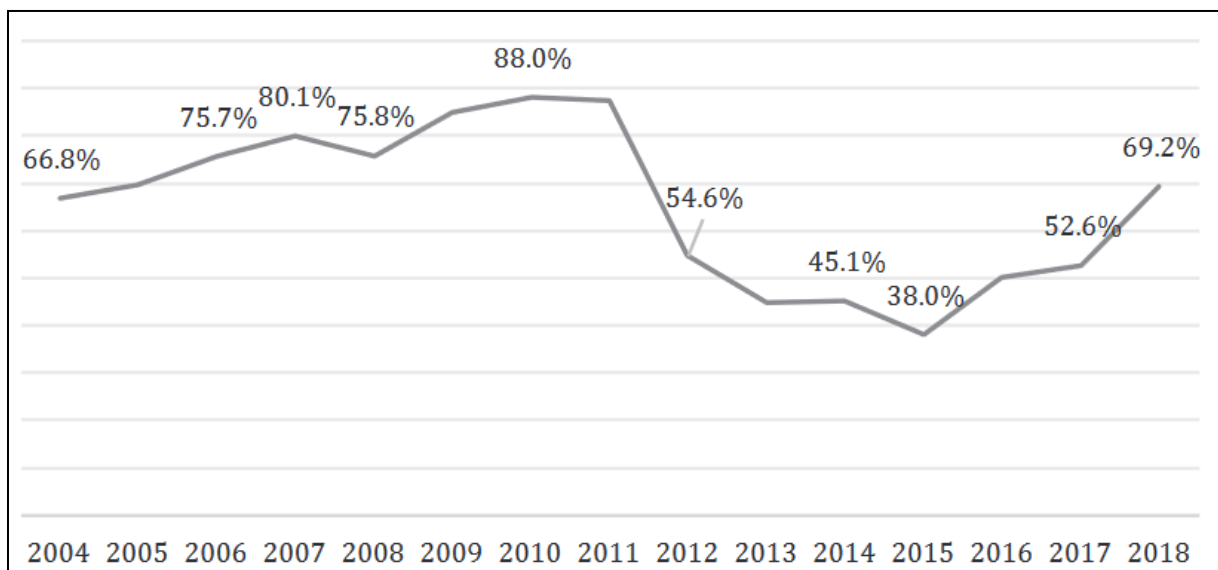
5.1. OROSZORSZÁG HATÁSA A REGIONÁLIS ENERGIAPOLITIKÁRA

Az elmúlt években az energiabiztonság a kelet-közép-európai országok egyik legégetőbb politikai kérdésévé vált. A legtöbb kelet-közép-európai államban az energiaszektor privatizációjának célja erős, piacorientált gazdaság létrehozása volt, hatékony és eredményes nemzeti szereplőkkel, valamint hazai és külföldi befektetési lehetőségekkel. Az energiabiztonságra való törekvés tehát alapvető geopolitikai kihívást jelent (Butler 2018). A vizsgált országok és az egész európai energiakereskedelmi rendszer szempontjából kulcsfontosságú szereplő Oroszország, így szerepét mindenképpen érdemes néhány mondatban kifejteni. Közép-Európában az energiabiztonság elérésére való törekvés kulcsfontosságú, hiszen a térség egyszerre kívánja megoldani az Oroszországgal kapcsolatos politikai bonyodalmakat, és próbál megfelelni a 21. század kihívásainak, beleértve a kiegyensúlyozott gazdasági fejlődést, az energiadiverzitást és az éghajlatváltozás elleni küzdelmet. Az energia és az energiakereskedelem mindig is kulcsfontosságú eleme volt az Orosz Föderáció és az Európai Unió közötti kapcsolatoknak. Minden politikai bizonytalanságtól és kudarctól függetlenül a gazdasági együttműködés és különösen az energetikai kapcsolatok a kölcsönös interakció fontos elemét képezik. Így nem meglepő, hogy az energiaügyi kapcsolatok általában nagyon fontos elemét képezték a különböző koncepcióknak, amelyeket mindkét fél az együttműködés keretében tekintett. Oroszország továbbra is Európa fő gázszállítója, még akkor is, ha 2018-ban elveszítette a világ vezető gáz- és olajtermelői pozícióját az Egyesült Államokkal szemben. Oroszország számos EU-s tagállam domináns gázszállítója. Bulgária, Csehország, Észtország, Magyarország, Lettország, Lengyelország, Románia és Szlovákia földgázimportjának 75-100 százalékát Oroszországból kapja. Ezen országok között találunk olyanokat is, akik szintén Oroszországból szerzik be olajimportjuk, több mint 50 százalékát (Lang és Westphal 2020, Siddi 2020, Valášek 2019).

Oroszország jelentősége Németország stratégiai beszállítójaként növekszik a német kormány 2011-es döntése következtében, amely szerint az atomenergiát kivonják az energiamixből. A korábban az atomerőművek által termelt, jelenleg lignittüzelésű erőművek által előállított

villamosenergia-alapterhelést várhatóan az Északi Áramlat vezetéken Oroszországból importált földgáz fogja pótolni. Ideális esetben Oroszország standard piaci szereplőként működne a likvid és versenyképes energiapiacra. Ez azonban megvalósíthatatlan, mivel Oroszország 40,6 százalékos részesedéssel rendelkezik az EU-ba irányuló földgázimportban, és egyúttal a legolcsóbb beszállító. A vásárló országok számára nincs ösztönzés arra, hogy a forrásokat másra cseréljék. A nagy vásárlóerővel rendelkező EU tagállamok, mint például Németország, Olaszország vagy Franciaország, gyakorolhatják piaci erejüket, és közvetlenül Oroszországtól kaphatnak kedvezményeket és garanciákat. Ezért szerkezetileg eltérő ösztönzőkkel rendelkeznek, mint a kisebb vásárlóerővel rendelkező EU-tagok, akik inkább az EU belső piaci keretek adta lehetőségeket használják ki. Ezt jól szemlélteti az Oroszországtól Németországig tartó, de az Egyesült Államok, valamint számos balti és közép-európai állam által ellenzett Északi Áramlat 2 vezetékkel kapcsolatos nézetek megoszlása. Összességében elmondható, hogy Oroszország domináns geopolitikai pozíciója jelentős korlátot jelent a Közép-Európai államok, köztük az általam vizsgált országok számára is (Lang és Westphal 2020, Siddi 2020, Ostrowski 2020, Valášek 2019).

5-4. ÁBRA: OROSZORSZÁG RÉSZESÉDÉSE AZ EU-28-BA IRÁNYULÓ TELJES VILLAMOSENERGIA-EXPORTBÓL



(forrás: Lang és Westphal 2020)

Az EU és Oroszország közötti villamosenergia kereskedelem mértéké jól mutatja az 5-4. ábra, mely alapján látható, hogy 2018-ban EU-28-ba irányuló teljes villamosenergia-exportból Oroszország részesedése 69,2 %-os volt. 2018 előtt időszakban azonban lényegesen alacsonyabb volt az orosz export áram aránya, 2015-ben mindössze 38,0 %. A balti államoknak a volt orosz/szovjet hálózattól való deszinkronizálására és az ENTSO-E hálózattal való

szinkronizálására vonatkozó tervek megvalósulása esetén 2025-ig várhatóan tovább csökken Oroszország részesedése a határokon átnyúló villamosenergia-kereskedelemből (Lang és Westphal 2020).

Közép-Európa az Európai Unió támogatásával az alábbi lépéseket teheti az energiabiztonsági kihívások megoldása és a kontinens geopolitikájának megreformálása érdekében (Valášek 2019):

- létrehoz egy formális regionális együttműködési mechanizmust;
- elvégzi a regionális gázpiacok és infrastruktúra átalakítását;
- az atomenergia kapacitások kiegyensúlyozott és együttműködő fejlesztésére törekszik;
- az energiahatékonyság növelése érdekében lépéseket tesz;
- alternatív energiákba való befektetést támogatja.

5.2. SMART GRID RENDSZEREK

Ahhoz, hogy az energiarendszer integrálja a különböző megújuló energiaforrásokat, és biztosítsa a villamosenergia-termelés és -fogyasztás egyensúlyát, a hálózatoknak intelligensebbé kell válniuk. Ehhez magas szintű digitalizációra, valamint automatizált kommunikációra és vezérlésre van szükség. Ez a fogyasztók javát szolgálja, mivel jobban szabályozhatják energiafogyasztásukat. Választhatnak például tiszta, helyben termelt villamos energiát, helyi szövetkezetekbe fektethetnek be, vagy napelemeket szerelhetnek fel a házukra. A smart grid rendszerek (intelligens hálózatok) olyan energiahálózatok, amelyek automatikusan figyelemmel kísérik az energiaáramlást, és ennek megfelelően alkalmazkodnak az energiakínálat és -kereslet változásaihoz. Az intelligens mérőrendszerekkel összekapcsolva a smart grid rendszerek valós idejű fogyasztási információkkal látják el a fogyasztókat és a szállítókat. A villamosenergia-piacon aktívabb, önállóan vagy szolgáltató cég segítségével bekapcsolódni vágyó fogyasztók számára az intelligens fogyasztásmérők számos lehetőséget kínálnak. Lehetővé teszik számukra, hogy energiafelhasználásukat a nap folyamán a különböző energiaárakhoz igazítsák, így az alacsonyabb árú időszakokban többet fogyaszthatnak, ezáltal pénzt takaríthatnak meg. Az intelligens mérés révén a hálózatüzemeltetők jobb betekintést kapnak abba, hogy mi történik a hálózat adott részén. Így jobban meg tudják tervezni beruházásaikat, infrastruktúrájukat ügyfélbaráttá tudják tenni. Az intelligens hálózatok kiépítése a transzeurópai energiahálózatok (TEN-E) három kiemelt tematikus területének egyike és mint olyan kulcsfontosságú a határokon átnyúló energiainfrastruktúra EU-ban történő

megvalósítása szempontjából. A vizsgált országok különböző smart grid hálózati projekt csoportokba tartoznak (IqtiyaniIlham et al. 2017, Vasiljevska és Flego 2019):

- Csehország és Szlovákia: ACON (Again Connected Networks) fő célja a cseh és a szlovák villamosenergia-piacok integrációjának elősegítése.
- Magyarország és Szlovákia: Danube InGrid projekt a villamosenergia-hálózat-menedzsment határokon átnyúló koordinációját erősíti, az adatgyűjtés és adatcsere okosabbá tételére fókuszálva.

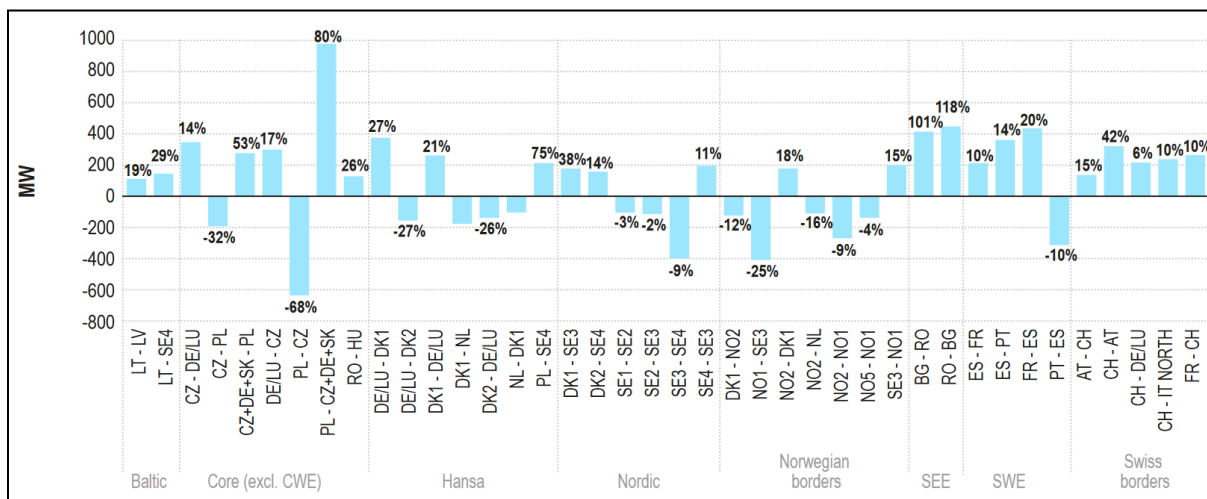
5.3. REGIONÁLIS KAPCSOLATOK

A közép-európai régió belül az energetikai együttműködések terén kiemelendő a Visegrádi országok (Magyarország, Szlovákia, Lengyelország, Csehország) közötti együttműködés. Az együttműködés egyik sarkalatos pontja a kulcsfontosságú energetikai infrastruktúrák (belső hálózatok és összeköttetések) fejlesztése és a régió számára optimális piaci modell kialakítása. Az országok politikai döntéshozók és a szektorban érdekelt felek közötti együttműködést alakították ki. Ennek eredményeként valamennyi visegrádi ország határozottan támogatja az energiaellátás és a tranzitútvonalak diverzifikálását, a kölcsönös hálózati összeköttetések kiépítését a régió energiabiztonságának fokozása és az orosz olaj- és gázellátástól való egyoldalú függés negatív hatásainak mérséklése érdekében. Az első Energia Csúcs 2010. február 24-én került megrendezésre Budapesten, amelynek eredményeképpen született meg a Budapest V4+ Energiabiztonsági Csúcstalálkozó Nyilatkozata. A dokumentum öt elsődleges cselekvési irányt jelölt meg, amelyek célja a regionális energiabiztonság növelése. Az egyes energiahordozók felhasználási szerkezetének változása kihívás elé állítja a régió országait az energetikai infrastruktúra fejlesztése terén, mind az átvitel, mind az elosztás tekintetében. Európának ezen a részén az energiaszállítási infrastruktúrába történő beruházások az Európai Unió belső villamosenergia- és földgázpiacának kulcsfontosságú elemei. Ennek következtében az európai átviteli rendszerirányítókkal való integrációt eredményező beruházások közös érdekű projekt státuszt kaptak (Minárik 2014, Trubalska 2019). Smirnov (2021) szerint a visegrádi országok megőrzik földgázimporttól való függőségüket, mivel a földgáz várhatóan továbbra is jelentős alapanyag marad a villamosenergia-termelésben.

A vizsgált országok közötti elektromos energia szállítására vonatkozóan az ACER adatai mutatnak képet. Az értékesíthető kapacitás (Net Transmission Capacity – NTC -nettó átviteli kapacitás) változásait vizsgáljuk Európában 2019 és 2020 közötti időszakban (5-5. ábra), az

adatokból jól látható, hogy a jelentős növekedés volt megfigyelhető a lengyel és a svéd határ között (75%-os növekedés a lengyelországi export irányában). Ennek oka, hogy a határkeresztező kapacitás lineáris növekedése várható a lengyel határokon a Lengyelország által az átdolgozott villamosenergia-rendelet 15. cikkével összhangban meghatározott cselekvési terv részeként 2019-től 2025-ig. Jelentős növekedés volt megfigyelhető a Lengyelország és a Cseh Köztársaság, Németország és Szlovákia határai közötti határkeresztezésnél (80% a lengyel export irányában és 53% az ellenkező irányban). A legjelentősebb csökkenés a Cseh Köztársaság–Lengyelország határán volt tapasztalható (68% a lengyel export irányában és 32% az ellenkező irányban). A svájci határokon bekövetkezett növekedés elsősorban a Svájc és Ausztria közötti rendelkezésre álló kapacitás növekedésének volt köszönhető (42% Svájcból export irányban, 15% a másik irányban). Ez megfelel a svájci hálózat megerősítésének és a Beznau és Bir közötti 380kV-os vezeték üzembe helyezésének (ACER 2021).

5-5. ÁBRA: A KERESKEDHETŐ KAPACITÁS (NTC) VÁLTOZÁSAI EURÓPÁBAN – 2019–2020 (MW)



(forrás: ACER 2021)

Az ACER (2021) jelentése szerint az elmúlt években jelentős előrelépés történt a villamosenergia-célmodell (ETM) bevezetése felé a másnapi piaci időkeretre. Az ETM egyetlen másnapi csatolást irányoz elő európai szinten. Ez az összekapcsolás lehetővé teszi a zónák közötti kapacitás „helyes gazdasági irányba” történő felhasználását, ha az árak eltérnek az adott ajánlattételi zóna határán. Két mutató szemlélteti a piaci integráció felé tett előrehaladást, valamint a további előrelépés lehetőségét. Az egyik a villamosenergia-rendszerösszekötők hatékony használatának szintje, a másik az általános becsült jóléti nyereség, tehát a fogyasztásból eredő többlethaszon és az alternatív költségek különbsége.

Összességében 2020-ban a zónaközi kapacitás hatékony kihasználását a másnapi piacon 87%-osnak mérték. A másnapi piacösszekapcsolás véglegesítése ezeken az európai határokon megemeli a zónák közötti kapacitás hatékony kihasználásának szintjét. Ez növelni az európai villamosenergia-nagykereskedelmi piacok általános gazdasági hatékonyságát. 2021 júniusa óta a 4MMC és az MRC régiók, azaz AT-CZ, AT-HU, CZ-DE, CZ-PL, PL-SK és DE-PL határait összekapcsolták a NTC alapú hálózat bevezetésével ezzel implicit kapacitásallokáció jött létre a fent említett hat határokon. Az ACER jelentés megállapításai szerint a rendszerösszekötők hatékony felhasználása nem nőtt jelentősen az elmúlt öt évben. Ennek fő oka az, hogy az elmúlt években korlátozott mértékben építettek be új határokat a piac összekapcsolása érdekében (ACER 2021).

6. A VILLAMOSENERGIA TŐZSDÉK (PX)

A villamosenergia kereskedelem liberalizációs folyamata során Európa országaiban létrejöttek az energiatőzsdék, melyek teret adnak a villamosenergia kereskedelemnek. Az európai áramtőzsde létrehozásához az uniós integráció jelentős mértékben járult hozzá. Gazdasági szempontból a villamos energia olyan árucikk, amelyet meg lehet vásárolni és el lehet adni, ezáltal lehet vele kereskedni. A villamos energiát természeténél fogva nehéz tárolni, és igény szerint rendelkezésre kell állnia. Következésképpen, más termékekkel ellentétben, normál üzemi körülmények között nem lehet raktáron tartani, adagolni vagy a vevőket sorba állítani. Továbbá a folyamatosan változó kereslet és a kínálat megszabja a piacot. A villamosenergia tőzsde (áramtőzsde vagy PX), olyan rendszer, amely lehetővé teszi a vételeket vételi ajánlatok révén, az értékesítést eladási ajánlatok révén. A tőzsdék képesek biztosítani a megfelelő piaci likviditást és a kínálati rugalmasságot, ezek a platformok elősegítik a termelés optimalizálását és kiegyensúlyozását. A derivatív termékek forgalmazása hozzájárul a hosszú távú kockázatkezeléshez. Az ajánlatok során a kereslet és a kínálat elvét alkalmazzák az ár meghatározásához. A villamosenergia-piac lehetővé teszi a villamos energia kereskedelmét a szállítók és a fogyasztók között. A nagykereskedelmi piac szerepe az, hogy lehetővé tegye a termelők, a kiskereskedők és más pénzügyi közvetítők közötti kereskedelmet mind a villamos energia rövid távú szállítása (spot piac), mind a jövőbeli szállítási időszakok (határidős piac) tekintetében. A hatékony piac az, ahol a villamosenergiával olyan áron kereskednek, amely minimalizálja a termelés költségeit, miközben kielégíti a keresletet. Az általános piaci célok a villamosenergia-termelés hatékony árképzésének biztosítása, a hálózati szolgáltatások ösztönzése és az infrastruktúra fenntartása. A villamosenergia tőzsdék árainak hatása a végfogyasztói árakra közvetlen nem, közvetetten viszont szerepet játszhat a transzparens referenciaárak biztosítása révén. A tőzsde által adott árjelzés a versenypiaci és a szabályozott szegmensre egyaránt jelentős hatással van. A tőzsde segítségével hatékonyabbá és optimálisabbá tehető a termelés, a nagykereskedelmi árakon keresztül képes lehet a végfogyasztói árakat is csökkenteni (Gáspár és Závecz 2011, Hortay és Szőke 2019, Nudell et al. 2019).

A villamosenergiával kapcsolatos nagykereskedelmi ügyleteket egy piaci szereplő vagy egy kizárólag e funkcióval megbízott, speciális célú független szervezet kezeli és rendezi. Az energiapiacok alapvetően két típusát lehet megkülönböztetni a kereskedés időhorizontja alapján, ezek a spot (azonnali) és a határidős ügyletek piaca. A spot piacokon belül elkülöníthetünk napon belüli (intraday market – IDM) és másnapi (day-ahead market – DAM)

aukciós piacokat. A napon belüli aukciók megvalósíthatók határokon átnyúló aukciókként vagy kiegészítő regionális aukciókként is. A másnapi piacok Európa nagy részében több év óta összekapcsolódnak (pl. ENTSO-E), míg a napközbeni piacok csak nemrégiben váltottak át nemzeti szintről európai szintre. A két piactípus között különbség van az árképzés tekintetében is, a másnapi piacokat általában aukciókként szervezik, azaz a keresletet és a kínálatot összesítik, míg a napon belüli piacokat általában folyamatos kereskedésként valósítják meg. Ez utóbbi lehetővé teszi a piaci felek számára a kínálat egyensúlyának megteremtését (Gerse 2014, Ocker és Jaenisch 2020).

A *day-ahead market kereskedés folyamata* során fogyasztóknak rögzíteniük kell, mekkora mennyiséget szeretnének vásárolni a maximális ár megadása mellett. A termelőknek hasonlóan kell eljárniuk, ők a minimális árat szabják meg, amely felett egy adott mennyiséget el szeretnének adni. A mennyiség megawattóra (MWh), az ár pedig €/MWh-ban számolandó el. A beérkezett ajánlatokat a piac üzemeltetője aggregálja. A *napon belüli (intraday) piacon* a kereskedés a DAM folyamatához hasonlóan zajlik, azonban ez a kereskedési folyamat lényegesen jobban hasonlít a hagyományos tőzsdei kereskedéshez. Itt jellemzően órás és negyedórás ajánlatokat lehet tenni és azokra licitálni, majd, ahol ezek az árak és mennyiségek találkoznak, az adásvétel létrejön.

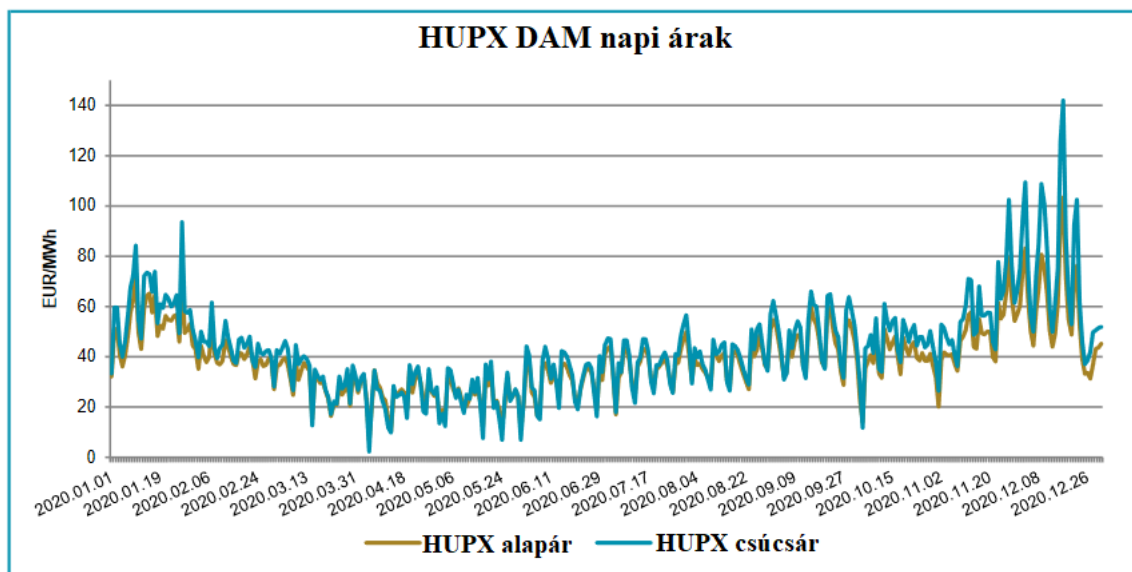
6.1. MAGYARORSZÁG (HUPX)

A MAVIR tulajdonában lévő Magyar Energetikai Társaság (HUPX) a magyar áramtőzsde engedélyes üzemeltetője. A HUPX 2010 júliusában kezdte meg működését a másnapi piac elindításával, ekkor még csak 10 taggal. Jelenleg a tőzsde két piacot kínál: napközbeni piac (HUPX IDM - Intraday market) 42 taggal és másnapi piac (HUPX DAM -Day-ahead market) 62 taggal. A másnapi piacon standard órás és blokk másnapi szállítású termékek kereskedése zajlik. Az IDM piacon órás és negyedórás termékek kereskedése folyik. Az IDM részét képezi a 4MMC piacösszekapcsolásnak. 2012-ben a HUPX összekapcsolódott a cseh és a szlovák piaccal, majd 2014-ben Románia is csatlakozott ehhez a körhöz (így alakult ki a 4MMC). A leginkább meghatározó termék a piacon a másnapi zsinór termék. 2015. december 10-én az energiaszabályozó kinevezte a HUPX-et a villamosenergia-piac kijelölt üzemeltetőjévé (NEMO). Az első teljes évben (2012) a kereskedett mennyiség 6,3 TWh volt. 2016-ban a legtöbb villamosenergia-kereskedelem kétoldalú megállapodások révén történt. Összehasonlításképpen 2016-ban 17,7 TWh spot villamos energiát és határidős termékeket értékesítettek, figyelembe véve, hogy a kereskedési volumen körülbelül 277 TWh volt.

Mindazonáltal a HUPX által kezelt spot kereskedelem volumene a teljes belföldi fogyasztás viszonylag magas arányát képviseli: 2015-ben meghaladta a bruttó hazai fogyasztás 37%-át. 2016-ban az átlagos havi forgalom a HUPX egynapos piacán 1,48 TWh volt. 2018-ban a HUPX-en a teljes kereskedett mennyiség 20 TWh volt. A kereskedett mennyiség és a tőzsde likviditása az elmúlt években folyamatosan növekedett. A napon belül piac hatékonyságának növelése érdekében a HUPX 2019 novemberében csatlakozott a XBID projekthez, mely az egységes napon belüli piacok összekapcsolását, hivatott szolgálni Európában. A teljes magyar áramkereskedelem nagyobb része továbbra is tőzsdén kívüli (OTC) és a határidős piacokon zajlik. A határidős kereskedelem a HUDEX-en zajlik 2018-tól, az MBN felügyelete alatt, a MIFID II. rendelet szabályai szerint. A megújuló energiaforrásból termelt villamosenergia KÁT-mérlegkör szerint értékesítése a HUPX-en zajlik (Csipkés 2019, Kerekes et al 2019, Kácsor et al 2019).

A nagykereskedelmi árak, a HUPX és az európai áramtőzsde (EEX) árai együtt mozognak. A 2008-as válságot követő jelentős árcsökkenést követően, az elmúlt időszakban megint az árak növekedése tapasztalható. Ezzel szemben a fogyasztói árakat (kiskereskedelmi ár) Magyarországon nem a piaci folyamatok, hanem a politikai környezet változása befolyásolta. Hazánkban az árképzésben három fő szabályozási időszakot különböztetünk meg: a 2004 és 2008 közötti átmeneti rendszert, a 2008 és 2010 közötti teljesen liberalizált rendszert, és a posztliberalizált időszak 2010-től a napjainkig. A fogyasztói árakat a kormány a rezsicsökkentés keretében szabta meg, tehát ebben az esetben nem beszélhetünk piaci árakról. A HUPX-en az árakat befolyásolja az általános áramárakat befolyásoló hatásokon (pl.: időjárás, évszakok) túl, az alaperőművek nem tervezett kiesései, a regionális szinten kiugró fogyasztás árfelhajtó hatása. A villamos energia ára a HUPX-en érzékeny a határkeresztező kapacitások mennyiségére, különösen a szlovák és az osztrák határ kapacitáscsökkenése okoz emelkedő árakat. A kínálati oldalon fontos szerepet kap a Balkáni régió, ugyanis az ott jelentkező többlet vagy hiány szintén megjelenik a hazai piacon. Abban az esetben, ha ezek a tényezők közül több is fennáll, az növeli az árakat és árkülönbözetet generál a szomszédos piacokkal (Kerekes et al 2019, Kácsor et al 2019, Szőke et al. 2021).

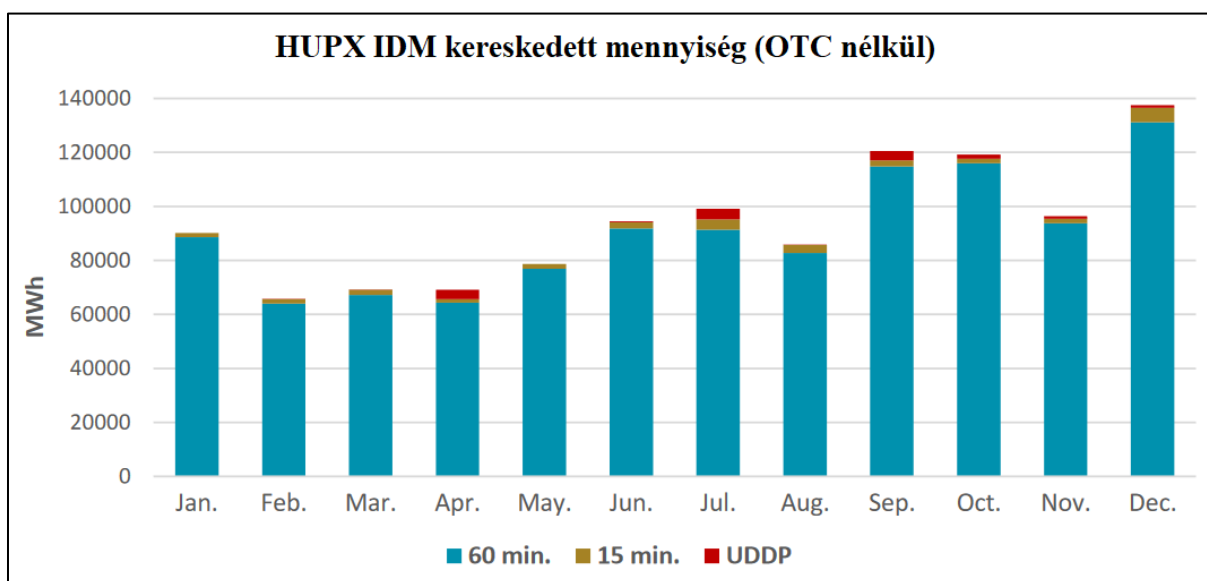
6-1. ÁBRA: MÁSNAPI PIAC VILLAMOSENERGIA ÁRAK A HUPX-EN 2020-BAN



(forrás: HUPX DAM 2020)

A HUPX másnapi piacán 2020-ban a teljes forgalom 13,45%-kal 25.234.486,1 MWh-ra nőtt a 2019-es 22.2434.37,4 MWh-hoz képest. Az átlagos napi forgalom 68.947,8 MWh volt. A legmagasabb napi forgalom 90.323,8 MWh volt 2020.07.20-i szállítási napon, ami napi rekordkereskedés a HUPX DAM piac elindítása óta. A 2020-es év elején az árak 40-60 EUR/MWh között mozogtak, az év közepén 20-40 EUR/MWh közötti árakat láthatunk. Az év végén jelentős növekedés és változékonyság volt tapasztalható villamosenergia árában a csúcs és az alapár tekintetében is (6-1. ábra) (HUPX IDM 2020, HUPX DAM 2020).

6-2. ÁBRA: KERESKEDÉS VOLUMENE A HUPX IDM-EN 2020-BAN



(forrás: HUPX IDM 2020)

A HUPX aznapi piacán 2020-ban a teljes forgalom 126,06 GWh volt, a tőzsdén kívüli teljes forgalom (OTC) 11,40 GWh. A legmagasabb napi forgalom 2020-ban 14,40 GWh. A legmagasabb havi forgalom 2020-ban 137,57 GWh. Az aznapi piacon a legalacsonyabb kereskedelmi ár -43,50 EUR/MWh, a legmagasabb kereskedési ár 321,50 EUR/MWh volt (6-2. ábra) A HUPX aznapi és másnapi piacainak árai jól követik egymást, a két grafikont összevetve jól látható, hogy 2020-ban tavasszal és a nyári hónapokban az árak stagnáltak, majd az év végén jelentős áremelkedés volt tapasztalható (HUPX IDM 2020, HUPX DAM 2020).

6.2. SZLOVÁKIA (OKTE)

A OKTE 2011. január 1-től kezdte meg tevékenységét. OKTE, a szállításrendszer-üzemeltető (TSO) (Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a.s.) leányvállalataként jött létre, amely részvényeinek 100%-át birtokolja. A Szlovák Köztársaság villamosenergia-piacán belül az OKTE, az energiaszektorról szóló törvény értelmében a Hálózati Ipari Szabályozó Hivatal (RONI) szabályozása alá tartozó szervezet, valamint a Szlovák Köztársaság rövid távú villamosenergia-piaci üzemeltetői engedélyének engedélytulajdonosa. A társaság megszervezi és értékeli a Szlovák Köztársaság szervezett rövid távú, határokon átnyúló villamosenergia-piacát. Ezen kívül kiegyenlítési és elszámolási szolgáltatásokat nyújt, valamint központi mérési és számlázási rendszereket működtet. Az OKTE részt vesz a 4MMC együttműködésben. Az OKTE-n másnapi és aznapi kereskedés egyaránt lehetséges. 2020-tól az OKTE felelős a szlovák megújuló energia támogatási rendszer irányításáért, és megkönnyíti a szlovákiai származási garanciák (GO) rendszerének működését. OKTE tevékenysége során aktívan együttműködik több állami intézménnyel (a Szlovák Köztársaság Gazdasági Minisztériumával, a Hálózatipar Szabályozó Irodájával), a Szlovák Köztársaság átviteli rendszerüzemeltetőjével, az elosztórendszer-üzemeltetőkkel, valamint egyéb piaci szereplőkkel. A nemzetközi együttműködésen belül 2011. november 22-től az OKTE tagja a tőzsdék és piacszervezők nemzetközi szövetségének, az EUROPEX-nek. Az EUROPEX szövetség az Európai Unió országainak tőzsdéit és piacszervezőit fogja össze, a villamosenergia-, gáz- vagy kibocsátási kvótákkal történő kereskedés területén (Janicek et al. 2012, OKTE 2020, Shah és Chatterjee 2020).

6.3. LENGYELORSZÁG (POLPX)

A Towarowa Giełda Energii S.A.-t (TGE) 1999 decemberében hozták létre, az európai energiapiacokat liberalizáló átalakulási folyamat során. Már 2000-ben elindult az azonnali

villamosenergia-piac, amely a kétoldalú kereskedelem minden aktív és potenciális résztvevőjének lehetőséget kínált az új kereskedési platform által generált árak összehasonlítására. 2003-ban a TGE volt az első szervezet, amely engedélyt kapott a lengyel pénzügyi felügyeleti hatóságtól árutőzsde működtetésére. 2005-ben a TGE-t bízták meg a megújuló energiaforrásokból előállított villamos energia származási tanúsítvány-nyilvántartásának létrehozásával és fenntartásával, 2007-ben pedig a kapcsolt energiatermeléssel is. 2008-ban a TGE elindította a villamosenergia-árutovábbító eszközök piacát, amely a kereskedelem volumenét tekintve jelenleg a legnagyobb villamosenergia-piac. Itt tranzakciókat lehet kötni a villamos energia fizikai szállítására hosszabb távon, lehetővé téve az eladók és a nagyfogyasztók számára az árak előrejelzését és az értékesítési/vásárlási költségek optimalizálását. 2019 a TGE egy határokon átnyúló SDAC napközbeni piacot indított el az XBID modell alapján. 2021-ben az SDAC részeként létrejött a határokon átnyúló villamosenergia-kereskedelem Németországgal, Csehországgal és Szlovákiával. Az elmúlt 20 évben a társaság tevékenysége az energiatermékek és a tulajdonjogok likvid piacának megteremtését tűzte ki célul. A TGE az elmúlt időszakban folyamatosan bővítette kínálatát, aktívan részt vett az európai energiapiacok integrációjában, valamint tájékoztatási és oktatási tevékenységekben. TGE az egyetlen engedéllyel rendelkező árutőzsde Lengyelországban, amely működését az árutőzsdéről szóló törvény szabályozza. A TGE-t a lengyel pénzügyi felügyelet ellenőrzi. A TGE-n forgalmazott villamos energia és földgáz mennyisége az egyik legnagyobb a régióban. A jogi és szabályozási változások Lengyelországban és az Európai Unióban jelentős hatással voltak a TGE fejlődésére. A TGE az ACER azon platformjainak listáján szerepel, amely a REMIT követelményeinek megfelelően jelenti a tranzakciós információkat (TGE 2019, TGE 2018).

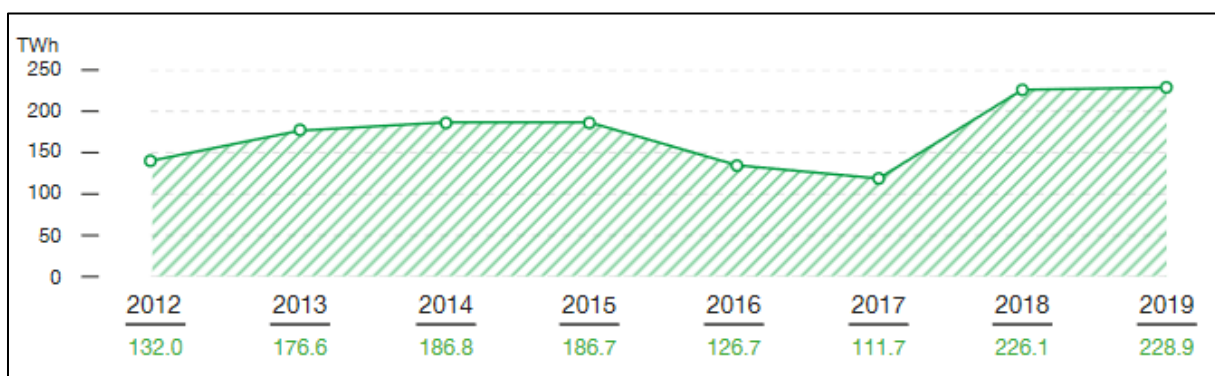
2012 óta a lengyel áramtőzsde a Varsói Értéktőzsde tagja, mely a TGE 100%-os tulajdonosa. Jelenleg a TGE Capital Csoport három szervezetből áll, amelyek együttesen kiegészítik egymást. A TGE által működtetett árupiaci bevételek részesedése a varsói tőzsde tőkecsoportjában 2019-ben elérte a 44,6%-os szintet, ami 0,3 százalékpontos növekedést jelent 2018-hoz képest. 2020-ban a TGE-nek 79 tagja volt, 5 árutípusban volt lehetőség kereskedésre, a villamosenergia-kereskedelem volumene 243,2 TWh, a földgáz-kereskedelem volumene 151,1 TWh volt. A másnapi (DAM) villamosenergia-piac 2000. június 30. óta működik. Ez a villamos energia spot piaca Lengyelországban. A kereskedelem kezdetétől a DAM áraira hivatkoznak a kétoldalú szerződésekben Lengyelországban. A villamos energia másnapi piacon belül óránkénti és blokkszerződések (bázis, csúcs és csúcsidőn kívül) állnak rendelkezésre.

A DAM változásait jelenleg 6 árindex mutatja, amelyek a szállítás napjára és idejére vonatkoznak. A DAM 6 árindexe a következő: TGeBase, TGePeak, TGeOffpeak, TGe24, TGe15, TGe9. A legújabb villamosenergia-piaci index - a TGe24 a pénzügyi eszközök piacán (határidős ügyletek) alkalmazott alapeszköz. A kereskedés a DAM-on egy és két nappal a szállítási időszak előtt történik, a kereskedés hétfőtől-vasárnapig 8:00-14:30 között folyik (TGE 2019, TGE 2018).

A TGE-nél a napközbeni piacon folyamatos kereskedelem zajlik. A kereskedés a másnapi szállítással rendelkező eszközökre vonatkozik, amelyeket a kézbesítést megelőző nap 14:00 órakor kezdnek jegyezni. A tranzakciókat ezen a piacon euróban denominálják. Az XBID 2018-ban indult el 14 ország áramtözsdéinek és szállítási rendszer-üzemeltetőinek (TSO) közös kezdeményezésével, amelynek célja egy integrált, határokon átnyúló, napon belüli piac létrehozása. A kereskedést a Deutsche Boerse AG által kifejlesztett platform teszi lehetővé (TGE 2019, TGE 2018).

A TGE kereskedési struktúráját a derivatív piac dominálja, amelynek részesedése 2019-ben a teljes volumen 85,2 %-át tette ki. A legnagyobb piacnövekedés a spotpiacokat jellemezte az elmúlt években, amely 22,1 % volt a másnapi piacon, és több mint 125 % volt a napon belüli piacon. A TGE-n az azonnali piacokon folytatott kereskedés volumene 2019-ben a lengyel spot piacot az Európai Unió egyik legnagyobb piacává tette. A derivatív piacon folytatott villamosenergia-kereskedelem volumene alapján Lengyelországot az európai élmezőnybe tartozik. A villamosenergia kereskedelem volumenben a 2016 és 2017-es években visszaesés volt tapasztalható, amely a nyilvános kereskedési kötelezettség alacsonyabb hatékonyságával hozható összefüggésbe (6-3. ábra) (TGE 2019, TGE 2018).

6-3. ÁBRA: VILLAMOSENERGIA KERESKEDELEM VOLUMENE A TGE-N



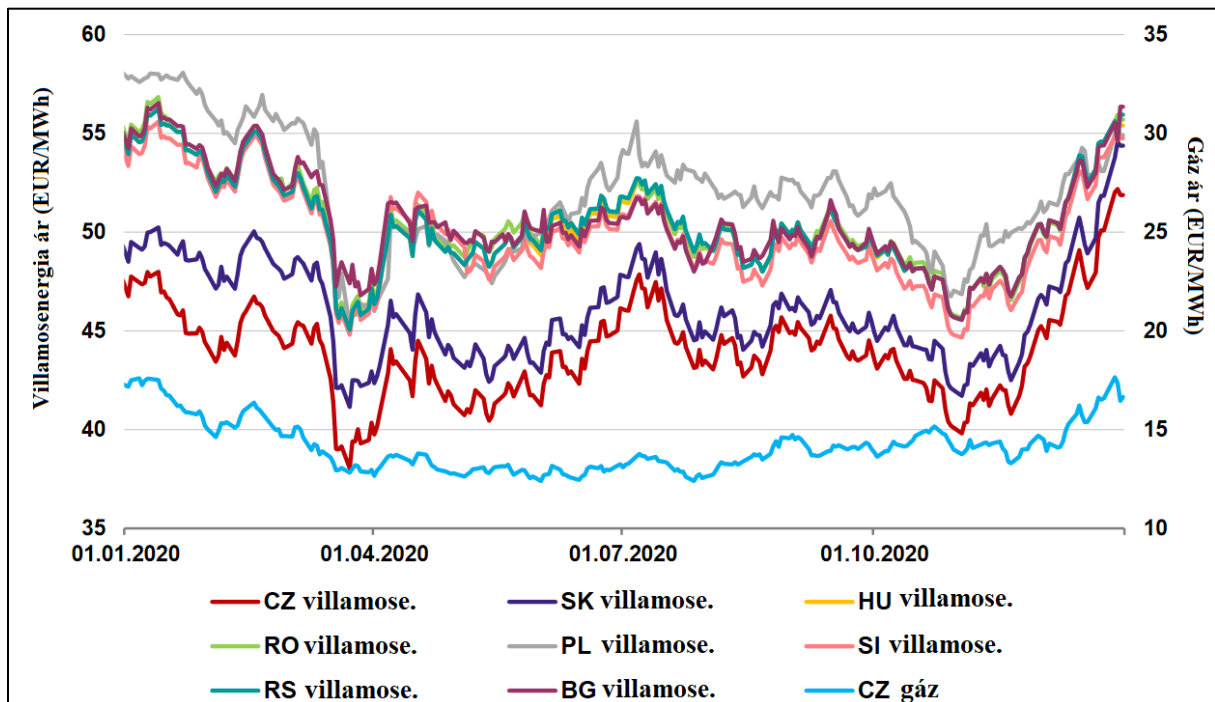
(forrás: TGE 2019)

A villamosenergia árak ingadozását a lengyel piacon az elmúlt években befolyásolta, hogy elfogadták a fogyasztók (végfelhasználók) által fizetett maximális árának felső határát meghatározó törvényt, valamint egy programot a nagykereskedelmi és a kiskereskedelmi árkülönbségek támogatására. Az ECX és az ICE Future Europe CO₂-kibocsátási egységeinek árváltozása szintén hatással van a villamosenergia-árak ingadozására. Megfelelő modellek segítségével a szén-dioxid-piacon és a lengyel áramtőzsdén a magasabb árkövetési időszakok előfordulása előre jelezhető, a két piac közötti összefüggések szinkronizálhatók (Włodarczyk 2015, TGE 2019).

6.4. CSEHORSZÁG (PXE)

A Power Exchange Central Europe (PXE) prágai központú, a közép- és kelet-európai villamosenergia-piacok területén működő szervezet. A PXE-t 2007. január 8-án hozták létre (Energetická burza Praha néven), és jelenleg az EEX Csoport része. Az EEX Csoport a nemzetközi energia- és árupiacokat kapcsolja össze világszerte 38 ország több mint 670 résztvevőjével. A PXE által biztosított termékekkel az EEX kereskedési rendszer platformján kereskednek. Az EEX kereskedés résztvevői a nyugat-európai piacokon kívül hozzáférhetnek a cseh, szlovák, magyar, lengyel, bolgár, román, szlovén és szerb villamosenergia-határidős ügyletekhez is. A PXE földgázkereskedelmet is szervez. 2019-ben 186,40 TWh villamosenergiával és 9,57 TWh gázzal kereskedtek a PXE-n. 2019 júniusában a PXE bolgár, szerb és szlovén határidős villamosenergia határidős szerződésekkel bővítette termékei portfólióját, amelyek kereskedelme az év végéig elérte a 3,18 TWh. 2020-ban 277,81 TWh villamosenergiával és 12,87 TWh gázzal kereskedtek a PXE-n. Mindkét esetben ezek a legjobb eredmények a PXE fennállása óta. 2020 közepén történetében először a PXE a háztartások és az egyéni kereskedők körében a végfelhasználókra is fókuszált, lehetővé téve, hogy a fogyasztók minden évben szabadon választhassák meg a szállítójukat anélkül, hogy fizikai vagy online kommunikációra lenne szükség az energetikai céggel. 2020-ban a PXE-n 84 tőzsdei napon összesen 77 végfelhasználóknak szóló villamosenergia-aukciót szerveztek, melyen összesen 2 125 289 MWh villamosenergia került értékesítésre. Az ügyletek elsősorban 2021-re vásárolták meg az energiát, de a tranzakciók egy része 2022–2024-hez is kapcsolódott (PXE 2019, PXE 2020, Shah és Chatterjee 2020).

6-4. ÁBRA: AZ ÁRAM ÁRÁNAK (ALAPTERHELÉS ÁRA) VÁLTOZÁSA A KÖZÉP-EURÓPAI RÉGIÓBAN 2020-BAN



(forrás: PXE 2020)

Az áramárak 2016-ban kezdődő növekvő tendenciája 2019-ben megfordult. A trend megfordulását elsősorban a szén- és gázárak csökkenése, valamint a kibocsátási jogok semleges alakulása okozta. 2019 folyamán az áramárak körülbelül 16%-kal csökkentek. A cseh villamosenergia-alapterhelés ára az éves maximális 55,77 EUR/MWh értéket 2019. július 23-án elérte el, és az év vége előtt, 2019. december 27-én 44,38 EUR/MWh-ra csökkent. Az árak alakulását tekintve 2020 nagyon ingatag volt, nemcsak a cseh, hanem minden közép-európai piacon (6-6. ábra). Március elején a 2021-es éves cseh villamosenergia-alapterhelés ára több mint 16 %-kal 38 EUR/MWh-ra süllyedt a COVID-19 járvány kitörése miatt. Ezzel egyidőben a többi országban is csökkentek az árak. Az árak csökkenését az oltóanyag-fejlesztésekről szóló hírek állították meg, amelyekre a piac erőteljes növekedéssel reagált. Az áremelkedés másik tényezője a kibocsátási jogok kereskedelme volt, amelyek 2017 óta növeli az árakat. A 2020-as év utolsó hónapjaiban ismét erőteljes növekedés volt tapasztalható a villamosenergia árában (PXE 2019, PXE 2020).

A PXE indexet a PXE hozta létre, és csak tájékoztatási célokat szolgál. A cél nem más, mint számokkal kifejezni a cseh villamosenergia-piac helyzetét, és ezt követően összehasonlítani a történelmi áralakulást. A PXE index kiszámításának kezdeti dátumát 2007. október 1-jén határozták meg; ettől az időponttól kezdve csak standard termékekkel kereskednek a PXE-n. Az indexszámítás az MSCI nemzetközi szabványokon (Morgan Stanley Capital International)

alapul. A PXE indexet mindig a kereskedési nap zárása után frissítik, és az értéket közzéteszik a PXE weboldalon. Az index súlyozott és pontokban van kifejezve. Az indexalapot és a súlyokat úgy határozták meg, hogy a legjobban tükrözzék a Cseh Köztársaság villamosenergia-fogyasztását és a PXE platformon az egyes termékekkel kapcsolatos értékesítési tevékenységeket a cseh villamosenergia-piacon. Az alap tartalmazza mind az alapterheléses, mind a csúcsterhelésű termékeket, valamint a másnapi kézbesítéstől a 2 éven belüli szállítási szerződésig eltelt időintervallumot (PXE 2019, PXE 2020).

6.5. AUSZTRIA (EXAA)

Az EXAA (Abwicklungsstelle für Energieprodukte AG) Ausztria villamosenergia tőzsdéje, központja Bécsben található. A 2001. június 8-án alapított EXAA 2002. március 21-én kezdte meg az azonnali villamosenergia-kereskedelmet. Azóta az EXAA kulcsszerepet játszik a hatékony kereskedelem fejlesztésében Közép-Európa liberalizált energiapiacain. Jelenleg 72 tagja van. A tőzsdei kereskedéssel kapcsolatos szokásos feladatok mellett az EXAA közvetlenül felelős a pénzügyi tranzakciók elszámolásáért (klíringért), és vállalja a partnerkockázatot minden végrehajtott ügylet esetében. Az EXAA 2015-ben sikeresen bevezette az Energiaszabályozó Hatóságok Együttműködési Ügynöksége (ACER) által jegyzett jelentéstételi mechanizmust (RRM), a REMIT rendelet szerinti jelentéstétel érdekében. Az EXAA ingyenesen vállalja a REMIT jelentési kötelezettséget minden EXAA kereskedési tevékenységről. Ezen felül teljes hozzáférést biztosít az általunk FTP-n keresztül létrehozott XML-jelentésfájlokhoz. Az EXAA-nak saját kiegyensúlyozó csoportja van az APG, az Amprion, a TenneT, az 50Hertz és a TransnetBW részvételével. Az Ausztria és Németország energiátőzsdéinek szétválása (2018. október) óta a két árzónához tartozó piaci árakat külön-külön határozzák meg. Az EXAA legnagyobb részvényesei az APCS Power Clearing and Settlement AG (34,55 %), a Wiener Börse AG (WBAG) (25,12 %) és a Oesterreichische Kontrollbank AG (OeKB) (8,06%). A részvények fennmaradó hányadán további 8 társaság osztozik (EXAA 2020, EXAA 2017, Kath és Ziel 2018).

A piacok összekapcsolása révén lehetősége van a befektetőknek hozzáférni a páneurópai piacokhoz. Az osztrák szabályozó hatóság, az E-Control által kinevezett NEMO (Nominated Electricity Market Operator) segítségével, az EXAA lehetővé tette tagjainak, hogy részt vehessenek az MRC-ben (Multi Regional Coupling), a minden nap 12:00-kor történő európai szintű aukción. Erre 2019. július 2-a óta van lehetőség. A 10:15-kor történő EXAA aukció továbbra is működik. 2019-ban a 10:15-ös aukción értékesített villamos energia mennyisége

6,3 TWh volt, míg a 12:00-i aukción 5,7 TWh villamosenergia került értékesítésre. Az EXAA innovatív algoritmusai lehetővé teszik az ajánlatok tételét a határokon átnyúló piacokon, és így ötvözi az egyébként különálló németországi és osztrák aukciók likviditását (EXAA 2020, EXAA 2017).

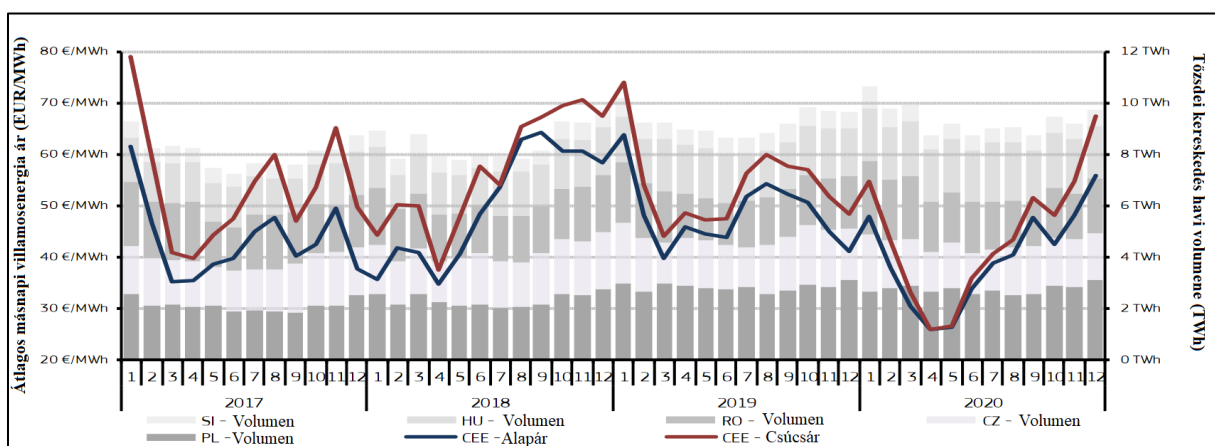
Az EXAA-aukciók áreredményei hatással vannak a kétoldalúan kereskedett ügyletek (tőzsdén kívüli ügyletek) árára. Az EXAA árakat befolyásolja, hogy a megtermelt villamosenergia jelentős hányada megújuló forrásból származik. A megújuló források villamosenergia-hálózatba történő integrálása sztochasztikus termelési jellege miatt kihívást jelent az energiarendszerben. Általánosságban elmondható, hogy a keresleti oldali rugalmasság gazdasági előnyei a villamosenergia-termelők számára (különösen a változó megújuló erőforrások) nagyobbak, mint a fogyasztók számára, ami arra utal, hogy a keresleti oldali rugalmassághoz elosztási problémák társulnak, valamint gyenge háztartási ösztönzők vannak érvényben a rugalmas fogyasztás elfogadásához. A megújuló energiatermeléssel kapcsolatos előrejelzési hibák szintén hatással vannak, különösen a napon belüli piacok áraira. A szél és a napenergia termelés előrejelzési hibáinak mértéke, megfelelő modellek alkalmazásával csökkenthető (EXAA 2017, Terreros et al. 2020, Ziel 2017). A negatív villamosenergia-árakat 2008-ban vezették be az európai energiátőzsdén (EPEX), 2013-ban pedig az EXAA-n. Egy ökonometriai elemzés eredményei arra utalnak, hogy a negatív árak bevezetése a kockázati felárak csökkenéséhez vezetett a pozitív árrendszer időszakához képest (Valitov 2019).

2012 decemberében az EXAA volt az első európai energia-tőzsde, amely további piacot indított kizárólag megújuló víz- és szélenergia-forrásokból származó villamos energia kereskedelmére. A koncepció lehetőséget kínál a zöld energia tőzsdei kereskedésére, és jól integrálódik a meglévő, másnapi spot-piaccal. Az EXAA egy olyan kereskedelmi platformot kínál a megújuló energiák piacának, amely független a német és az osztrák hatóságok által meghatározott tarifáktól. A származási garanciákon (GoO) alapuló kétoldalú kereskedelem és a tőzsdén alapuló villamosenergia-kereskedelem legjobb elemeit ötvözi a fizikai szállítással párosulva. Az EXAA Green Power kizárólag megújuló energiaforrásokból származik, amelyet a jól bevált európai származási garancia (GO) szabvány, az EECs igazol. Az EXAA Green Power származási garanciája tökéletes eszköz a vállalatok számára az energia-mix nyilvánosságra hozatalakor. Az EXAA közvetlenül a központi szerződő félként elszámol, így nincs szükség külön klíringbankra. Az EXAA másnapi piacot biztosít az osztrák és a német vízerőművek számára. Az eladók által bejegyzett erőműveket előzetesen közzéteszik weboldalunkon.

Abban az esetben, ha a megrendeléseket nem lehet teljesíteni, opcionálisan át lehet őket vinni a szürkeáram aukcióra. A vételi és eladási ajánlatokat a zöld és a szürke villamos energia esetében külön megrendelési könyvekben rögzítik. Először a zöld villamos energiát árverezik el, amelyet azonnal a szürke áram követ. A zöld energia többlet opcionálisan átvehető szürke megrendelésként, választható árkedvezményel. A származási garanciák (GoO) átadása a kibocsátást követően történik a nemzeti nyilvántartásokon keresztül (E-Control Ausztriában, UBA HKNR Németországban). Ezt a folyamatot a 6-8. ábra mutatja be. Határokon átnyúló kereskedés esetében az AIB EECS központján keresztül történik a származási garanciák átadása (EXAA 2020, EXAA 2017, Shah és Chatterjee 2020).

A villamos energia szabványosított, határokon átnyúló kereskedelemű árucikk. Különösen Európában, ahol az országok közötti folyamatos piaci integráció gyorsan halad, a nemzeti piacokat nem lehet egyetlen üzletnek tekinteni. A német villamosenergia-piac a legintegráltabb az európai piacok közül. A piacok másnapi aukciójának áreredményei különböző időpontokban mutatkoznak meg, ha ugyanazt a kereskedési időszakot vesszük figyelembe, a piacok között kapcsolat mutatható ki. Ennek eredményeképpen a kereskedők a piacok árinformációit felhasználhatják ajánlattételük módosítására. Az EXAA másnapi aukciós piac ára hatással van a Németországhoz és Ausztriához közvetlenül kapcsolódó régiók villamosenergia-napi másnapi aukciós áraira. A kapcsolt piacok követelményeinek teljesítése elegendő a kereskedési stratégia javításához az EXAA árak felhasználásával (Ziel et al. 2015).

6-5. ÁBRA: A HAVI VILLAMOSENERGIA-TŐZSDEI KERESKEDÉS VOLUMENE ÉS ÁTLAGOS MÁSNAPI ÁRAK KÖZÉP-KELET-EURÓPÁBAN

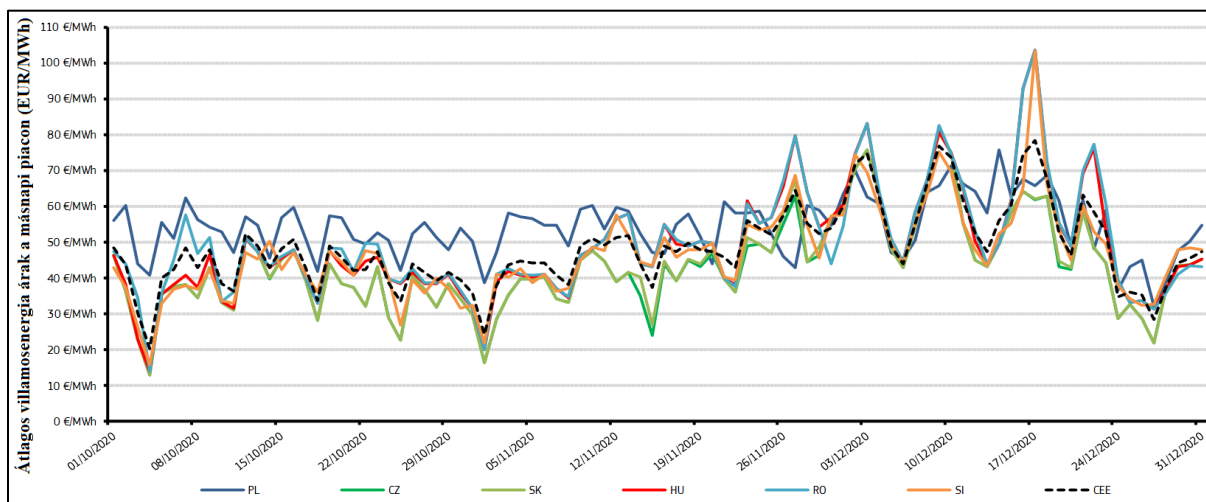


(forrás: EC 2021)

Európában a villamosenergia-piac működésére 2020-ban jelentős hatást gyakorolt a COVID-19 járvány. A Covid-19 világvárvány miatt jelentősen és egyidejűleg csökkent az energia iránti igény Európa több piacán. Ha az egyik országban jelentős keresletcsökkenés tapasztalható - és

ezáltal potenciálisan csökkenő piaci árak - ez a rendelkezésre álló átviteli kapacitástól függően az egész európai piacot érintheti. A 6-9. ábra azt mutatja, hogy a kelet-közép-európai alapterhelés átlagos havi árai októberben lefelé irányuló mozgását mutattak a kelet-közép-európai régióban, mivel a világjárvány második hulláma új lezárásokat hozott. Az árak ezután erőteljesen emelkedtek, 2020 negyedik negyedének második felében 50 EUR/MWh fölé, ez a kínálat-kereslet egyensúlyának és az emelkedő szén-dioxid-áraknak köszönhető. A havi átlagár kétéves csúcstól ért el decemberben mind az alapterheléssel, mind a csúcsterheléssel kapcsolatos szerződések esetében. A referencia-negyedév végén az alapterhelés és a maximális terhelés havi átlagai között 21%-ra nőtt a különbség, mivel a napelemek teljesítménye csökkent és a csúcsterhelés iránti kereslet helyreállt a csökkenő hőmérséklet miatt. A 2019. negyedik negyedévhez képest a referencia-negyedév átlagos alapterhelési ára 7%-kal, 49 EUR/MWh-ra növekedett. A kereskedési volumen nem változott jelentősen az előző negyedévhez képest. Az árakat befolyásolta, hogy Magyarország öt évre előterjesztette szén-dioxid csökkentési tervét, amelynek célja az volt, hogy 2025-ben bezárja a Mátrai erőmű utolsó lignittüzelésű egységét. A kormány azt tervezi, hogy 2030-ra 90%-ban szén-dioxid-mentes villamosenergia-termelést ér el atomenergia-kapacitásának fenntartásával és 5 GW új napelemes kapacitás beépítésével. A 6-10. ábra azt mutatja, hogy a négy kapcsolt piac (Csehország, Szlovákia, Románia, Magyarország) napi átlagos alapterhelési ára viszonylag stabil volt 2020 negyedik negyedének első felében, 50 EUR/MWh alatt maradt, miközben a lengyel piacon az árak 50 EUR/MWh felett voltak. Az árak november vége óta egységesen emelkedtek, ennek oka a változékonyabbá váló időjárás, rendszerösszekötők leállása, valamint a szélenergia rendelkezésre állása által okozott szoros kínálati-keresleti egyensúly alakulása. A lengyel csúcsterhelés iránti kereslet december 10-én minden idők legmagasabb szintjét, közel 27 GW-ot ért el, ez részben annak köszönhető, hogy ekkor a COVID-19 járvány miatt a becslések szerint 3,8 millió diák vett részt online órákon. A növekvő ipari tevékenység is hozzájárult a rekordhoz (EC 2021, IEA 2020b).

6-6. ÁBRA: A VILAMOSENERGIA MÁSNAPI AUKCIÓS ÁRA A KÖZÉP-EURÓPAI RÉGIÓBAN 2020-BAN



(forrás: EC 2021)

A vizsgált országokban a villamosenergia tőzsdék jellemzően az állami tulajdonban álló szállítási rendszer-üzemeltető vállalat leányvállalatként jöttek létre. A vizsgált országok energiatőzsdéi közül a legrégebbi az osztrák EXAA. Az első időkben jellemzően másnapi aukciós kereskedés folyt a tőzsdéken, a napközbeni kereskedés később került bevezetésre. A napközbeni kereskedést a vizsgált országok mindegyikében az XBID modell alapján szervezték meg és ez alapján működik. A tranzakciós információkat a REMIT követelményeinek megfelelően jelentik. A spot és a határidős kereskedés egyaránt zajlik a vizsgált energiatőzsdéken. A magyar villamosenergia tőzsdéről a határidős piac 2018-tól kivált és ma külön működik HUDEX néven. A vizsgált piacokon az elmúlt években jelentős növekedés volt tapasztalható a kereskedési volumenben, különösen a HUPX növekedése volt közép-európai szinten is jelentős. Ez arra utal, hogy felértékelődött az energiatőzsdék jelentősége az elmúlt években, és ezzel párhuzamosan csökkent a tőzsdék kívüli ügyletek (OTC) száma. A 2020-as évben a COVID-19 járvány minden vizsgált piacra jelentős negatív hatással volt, az árak 2020 márciusában jelentős mértékben csökkentek, a járványhelyzet javulása azonban az árak növekedését eredményezte. A piacok összekapcsolása révén lehetősége van a befektetőknek hozzáférni más piacokon forgalmazott termékekhez. A villamosenergia tőzsdei árát jelentős mértékben képesek befolyásolni az olyan exogén tényezők, mint az időjárás, továbbá hatással vannak rá a politikai folyamatok is (pl.: EU ETS szabályozás, megújuló szabályozása). A jövőben várhatóan növekedni fog a meglévő összekapcsoltság, ezáltal pedig az ellátásbiztonság is javul. Hosszabb távon várhatóan az árak tovább csökkennek.

7. EU KIBOCSÁTÁSKERESKEDELMI RENDSZERE (EU ETS)

Az elmúlt három évtizedben a villamosenergia-ágazat világszerte hatalmas változáson ment keresztül. Az energiapiac szereplői egyre több kihívással szembesültek a verseny és más, piacot befolyásoló tényezők miatt. A villamosenergia nem (csak minimális mértékben) tárolható árucikk, ára pedig rendkívül érzékeny a kínálat és a kereslet változásaira. A villamos energia árának alakulása egy átlagárhoz való visszatérést és ciklikus mintákat mutat, rendkívüli volatilitással és viszonylag gyakran előforduló kiugró értékekkel rendelkezik. A napi piaci műveletekhez kapcsolódó kockázat a magas áringadozásból származik. Ez különösen érvényes a spot árakra, ahol a volatilitás napi szinten akár 50%-ot is elérhet, vagyis több mint 10-szer nagyobb, mint más energiatermékek (földgáz és nyersolaj) esetében. Az ár sajátos jellemzői olyan modellek kidolgozását teszik szükségessé, amelyek célja az ilyen árjellemzők egyidejű megragadása az előrejelzés, a kockázatkezelés és a villamos energia által vezérelt származékos termékek értékelése szempontjából. A villamosenergia-árak nagyon változékonyak, kiegyensúlyozatlanok, egyes piacokon óránként, percenként is változnak, a kínálat és a kereslet állandó változásai miatt, és számos paraméter befolyásolja őket, pl. időjárás, napszak, az ellátás megszakadása, karbantartás, szállításrendszer-korlátozások. Az áramigény szezonálisan, a hét folyamán és a nap folyamán külső hatásoknak van kitéve, és szabálytalan események is befolyásolhatják. Az áram iránti igény jelentősen ingadozik a villamosenergia-piacon, ami jelentős kiegészítő költségeket jelent a szállítók számára. A villamosenergia-piacon is vannak szezonális hatások. A villamos energia felhasználása az időjárástól függően változik, mivel a hőmérséklet és a páratartalom változása befolyásolja a helyiségek fűtésének és hűtésének igényét. A lakossági végfelhasználói szektorban a legnagyobb a szezonális eltérés, és minden nyáron és télen jelentős a kereslet. A téli fűtési igény vagy a nyári légkondicionálás miatti nagyobb igény okán az éghajlati szélsőségek idején az áramtermelés általában nagyobb. Ezek a jellemzők arra utalnak, hogy az energiatárolás hatékonyságának növelése fokozódó piaci igény (Božić et al. 2020, Halužan et al. 2020, Prabakaran et al. 2020, Xiong és Mamon 2019).

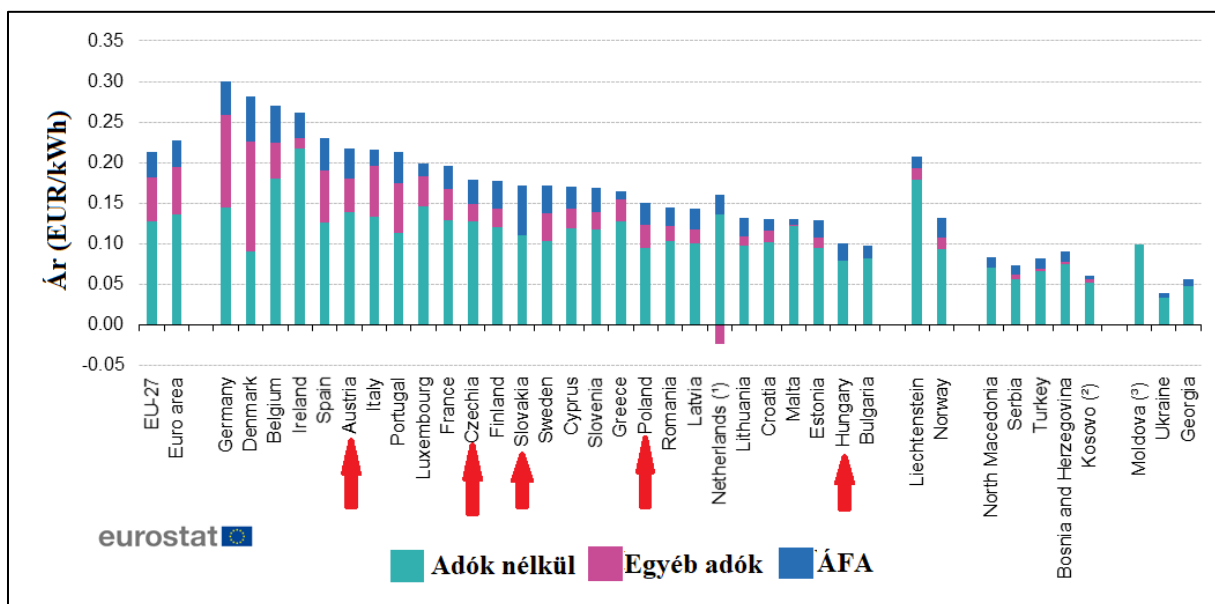
Az energiapiacok liberalizációjának kezdete óta vita tárgyát képezi a kiskereskedelmi verseny iránti igény és annak potenciális előnyei a fogyasztók számára. Joskow (2008) korlátozott szerepet lát a kiskereskedelmi piacok számára az energiaszektorban, mivel a kiskereskedelmi piacok hagyományos szerepei közül sok az energia szempontjából nem releváns szereplő. Ezért azt javasolja, hogy a kiskereskedelmi energiapiacokon a verseny elsősorban kiegészítő szolgáltatások (biztosítás, energiaszolgáltatások) nyújtása szempontjából hasznos, de a szabályozott elosztóhálózat-üzemeltetőknek az energiaszállításhoz egy kiskereskedelmi

alapterméket kell biztosítaniuk, melynek a nagykereskedelmi árat kell alapul vennie. Ezzel a nézettel ellentétben mások szerint a kiskereskedelmi piac az árversenyéről szól, és hogy a kiskereskedelmi piac szükséges a verseny létrehozásához a nagykereskedelmi piacon. A hatékony kiskereskedelmi verseny természetes védelmet teremt a fogyasztók számára azáltal, hogy különböző árszerződéseket dolgoz ki, az árkockázat mérséklése érdekében. Ebben a tekintetben a szerződés szerkezete önmagában fontos a nagykereskedelmi és kiskereskedelmi árak közötti kapcsolat erősségének meghatározásában. Ha a kiskereskedők a nagykereskedelmi piacon bekövetkezett árváltozásokat közvetlenül továbbadják a végfelhasználóknak, akkor a kiskereskedelmi piacot hatékonynak tekintik. Mivel a fogyasztók nem figyelik meg valós időben a háztartási villamosenergia-piac árait, ez lehetőséget nyújt a kiskereskedőknek arra, hogy az árváltozások hatásait aszimmetrikusan közvetítsék a fogyasztók számára. A kiskereskedők ezen stratégiája többek között gyengíti a kapcsolatot a nagykereskedelmi és a kiskereskedelmi piacok között (Marzband et al. 2019, Mulder és Willems 2019, Mirza és Bergland 2012).

Az európai háztartások és vállalatok fogyasztói kosarának jelentős részét az áram, valamint a gáz vagy a finomított kőolajtermékek alkotják. Mivel az energiatermékek szinte minden végtermék és szolgáltatás elengedhetetlen kellékei, az energiaárak bármelyik változása közvetlen hatással van az általános árszintre. A lakossági energiapolitikára, a lakossági árakra Európában hatással van az építőipar energiafelhasználásának csökkenése, a technológiai teljesítmény javulása, az ésszerű energiafogyasztás és a megújuló forrásokra való áttérés. A villamosenergia-piac liberalizációja, a verseny bevezetése csökkenést eredményezett a lakossági árak tekintetében. Azokban az EU országban, ahol a liberalizáció nem vezetett alacsonyabb koncentrációjú villamosenergia-piaci struktúrához, a villamosenergia-árak is magasabbak, szemben a kevésbé koncentrált piacokkal. Az energia ára az EU-27-ben különböző keresleti és kínálati feltételektől függ, ideértve a geopolitikai helyzetet, a nemzeti energiaösszetételt, az import diverzifikációját, a hálózati és környezetvédelmi költségeket, az időjárás viszonyokat, továbbá az adott országban érvényes adózási rendszert. A lakossági villamosenergia-árak (az adókat és illetékeket is beleértve) az EU-ban többé-kevésbé változatlanok voltak 2003-ig. Ezt követően emelkedő tendenciát mutatnak, növekedésük oka az üvegházhatást okozó gázok kibocsátási egységeinek bevezetése az EU kibocsátáskereskedelmi rendszerébe (EU ETS) 2005-ben, valamint az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére vonatkozó politika. Az EU a megújuló energiaforrásokból történő villamosenergia-termelés előmozdításának céljából további díjakat vetett ki, amelyek

szintén emelik a villamos energia végső árát. Az adók és illetékek 1991-ben átlagosan az ár 15%-át tették ki, részarányuk 2011 végén 32% volt, 2015-ben átlagosan 28,5% volt. A fogyasztók által ténylegesen fizetett villamosenergia-árakat befolyásolják a villamosenergia-tarifák és a szerződés szerkezetek, amelyek általában sok tényezőt érintenek, például a megállapított díjakat és az egységárakat, amelyek eltérnek az elfogyasztott villamos energia és a fogyasztás időtartama tekintetében. A lakossági villanyszámlákat befolyásolják az energiahatékonysági politikák, a megújuló energiákkal kapcsolatos politikák, a kibocsátás-kereskedelmi rendszerek és az infrastrukturális beruházásokkal kapcsolatos költségek is. Az EU-27 háztartási fogyasztói számára az áram ára 2020 második felében Németországban volt a legmagasabb (0,3006 EUR/kWh), amit Dánia (0,2819 EUR/kWh) és Belgium (0,2702 EUR/kWh) követ. A legalacsonyabb villamosenergia-árak Bulgáriában (0,0982 EUR/kWh), Magyarországon (0,1009 EUR/kWh) és Észtországban voltak (0,1291 EUR/kWh). A villamos energia ára a háztartási fogyasztók számára Németországban több mint háromszorosa volt a bolgár árának. A vizsgált öt ország közül 2020 második felében a legmagasabb lakossági villamosenergia árakat Ausztriában mérték (0,2167 EUR/kWh), ez közel megegyezik az EU-27 átlagos fogyasztó árával (0,2134 EUR/kWh). Ausztriát a vizsgált országok közül Csehország (0,1795 EUR/kWh), Szlovákia (0,1724 EUR/kWh), Lengyelország (0,151 EUR/kWh) és Magyarország (0,1009 EUR/kWh) követi. Az EU-27 lakossági villamosenergia árait a 7-11. ábra mutatja be (da Silva és Cerqueira 2017, Eurostat 2021, Verbič et al. 2017).

7-1. ÁBRA: FOGYASZTÓI VILLAMOSENERGIA ÁRAK AZ EURÓPAI UNIÓBAN 2020 MÁSODIK FELÉBEN



(forrás: Eurostat 2021)

A kiskereskedők költségmegtakarítást érnek el, ha a gazdaságilag leghatékonyabban optimalizálják villamosenergia-vásárlásaik mennyiségét és ütemezését (Märkle-Huß et al. 2018).

A jövőben a kiskereskedelmi piacra várhatóan jelentős hatással lesz az EU Tiszta Energia Csomagja (EU 2019/944), amely olyan rendelkezéseket vezetett be, amelyek feljogosítják az intelligens fogyasztásmérővel rendelkező összes végfelhasználót arra, hogy dinamikus villamosenergia-szerződéskötést kössenek a piacon legalább egy olyan szállítóval, amelynek 200.000-nél több végfelhasználója van. A dinamikus árak mind a fogyasztók, mind a villamosenergia-rendszer javát szolgálják. A fogyasztók az árjelzésekre reagálva csökkenthetik villanyszámlájukat a fogyasztás kezelésével és kiigazításával. A szolgáltató számára is pozitív, hiszen a rendszer potenciálisan csökkenti a termelésbe és a hálózatokba történő további beruházások szükségességét. 2019 elején dinamikus árképzési szerződések voltak elérhetőek hét EU-tagállamban, és várhatóan más tagállamok is követik ezeket az új követelményeknek való megfelelés érdekében (Albertsen et al. 2020).

A globális felmelegedés az elmúlt évtizedekben az egyik legfontosabb környezeti kérdéssé vált, amely a kutatókon túl, a döntéshozók figyelmét is a környezet védelmének irányába tolta el. A globális felmelegedés által okozott súlyos károk megelőzése/csökkentése érdekében az ENSZ 1997-ben elfogadta a Kiotói Jegyzőkönyvet, amely 2005. február 16-án lépett hatályba. Az Európai Unió kibocsátás-kereskedelmi rendszere (EU ETS) az éghajlatváltozás elleni küzdelemre irányuló uniós stratégia egyik alapja, és fontos eszköz az üvegházhatású gázok (ÜHG) kibocsátásának gazdaságilag hatékony csökkentéséhez. Az üvegház hatású gázkibocsátás (különösen a szén-dioxid (CO₂)) és az éghajlatváltozás szorosan összefügg a gazdasági növekedéssel és a társadalmi fejlődéssel.

A protokoll által meghatározott üvegházhatást okozó gázok csökkentésének egyik fő mechanizmusa a kibocsátási egységek vagy engedélyek, elsősorban a szén-dioxid kereskedelme volt a szervezett pénzügyi piacokon. Így számos nemzeti és regionális kibocsátási piac jött létre, ahol különféle speciális pénzügyi eszközökkel kereskednek. Az Európai Bizottság szerint az EU 2030-ra vonatkozó teljes üvegházhatású gázkibocsátási céljának elérése érdekében az EU ETS hatálya alá tartozó ágazatoknak a 2005-ös szinthez képest 43%-kal kell csökkenteniük kibocsátásaikat. Ezt a célt úgy kell elérni, hogy árat adtak a szén-dioxidnak, és ezáltal pénzügyi értéket adnak minden megtakarított kibocsátás tonnájának. Ez a mechanizmus az áramtermelőket arra készíti, hogy fektessenek be alacsony szén-dioxid-kibocsátású technológiákba (Abate et al. 2021, Azevedo et al. 2011).

Az EU ETS 31 országban több mint 11 000 erőművet és egyéb létesítményt, valamint a résztvevő országok repülőterei közötti járatokat fedi le. Ezek összességében az EU üvegházhatású gázkibocsátásának mintegy 45%-ért felelősek. Az EU ETS a szén-dioxid kibocsátási egységek legnagyobb egységes piaca, amely a globális szén-dioxid piaci érték körülbelül 84 %-át teszi ki és amelynek célja az EU globális felmelegedés elleni küzdelmének támogatása. Az EU-ETS-ben forgalmazott szénterméket az Európai Unió kibocsátási egységének (EUA) nevezik. Az EU ETS felépítése három szakaszból áll: az I. szakasz egy hároméves kísérleti időszakot ölel fel 2005 és 2007 között, a II. Szakasz pedig a 2008 és 2012 közötti időszakra terjedt ki. A II. szakaszban a Kiotói Jegyzőkönyv célkitűzéseit az első szakaszhoz képest szigorúbb felső korlátokkal valósították meg. Az EU ETS meghatároz egy szén-dioxid kibocsátási küszöböt, ez érték felett a vállalatok csak kvóták vásárlásával szennyezhetik a levegőt. Egy CO₂ egység fejében egy tonna CO₂ bocsátható ki a légkörbe. A vállalatok azokat a kvótákat, amiket nem használnak fel, eladhatják a piacon. A kvótákért aukciók keretében kell az érintett vállalatoknak fizetni. Az EU-ETS korlátozott mennyiségű kvótát oszt ki a szén-dioxid-kibocsátásra azoknak a villamosenergia-termelőknek, akik fosszilis tüzelőanyagokat használnak energiatermelésük során. A tagállamok a 2005–2007 közötti kereskedési időszakra irányították az allokációt. A legtöbb tagállam az uniós kibocsátási egységeket ingyen osztotta ki a résztvevőknek, a történelmi kibocsátásuk alapján. A rendszer bevezetés számos torzulást okozott a piacon. Az egyik anomália az volt, hogy a vállalatok váratlan nyereséget termeltek azzal, hogy a költségeket a tényleges költség fölött jelentették. A túltermelés a kvóták árának jelentős csökkenéshez vezetett. A váratlan nyereség gátolta az alacsony szén-dioxid-kibocsátású technológiákba történő beruházásokat, és rosszabb esetben ösztönözte a szén-dioxid intenzív létesítményekbe történő beruházásokat. Az EU-ETS III. szakaszának kezdetén jelentős változást jelentett, hogy az ágazat elmozdult a kizárólagos aukciós alapú rendszer felé. Ennek hatására az energiatermelők a legtöbb tagállamban (kivéve az új tagállamokat, amelyek számára engedélyezett az EU kibocsátási egységeinek (EUA) ingyenes beszerzése,) a szennyező fizet elvvel összhangban vásárolnak kibocsátási egységeket. Az EU ETS hatására a szén-dioxid árak beépültek a villamosenergia-árakba, és az új rendszer hatással volt a nagykereskedelmi villamosenergia-árakra. A Svéd és az Egyesült Királyság piacain a termelők lényegesen jobban integrálták a kiosztott kibocsátási egységek költségeit a villamos energia áraikban, mint a tényleges szén-dioxid intenzitás által indokolt arányos költségnövekedés (Abate et al. 2021, Boersen és Scholtens 2014, Castagneto-Gissey 2014, Keppler és Mansanet-Bataller 2010, Jouvet és Solier 2013).

Az EU 1031/2010 Bizottsági rendelettel összhangban a vállalkozásoknak a kibocsátási egységek egyre nagyobb hányadát kell aukció útján megvásárolniuk. Európában az EEX a vezető ETS aukciós platform. Az EU ETS-ben előtérbe hozott kibocsátási egységek mintegy 90%-át az EEX-en keresztül osztják fel. Az EEX spot piacán rendszeres aukciókat tart az EU általános kibocsátási egységeiről és az EU légitöbblekedi egységeiről. Az EEX az aukciós platform, amely az EU ETS keretében lefedi a teljes aukciós profilt. Az EUA spot és határidős ügyleteinek áraiban 2018-tól emelkedés tapasztalható, mely az egyre erősödő EU-s szén-dioxid kibocsátási politikának köszönhető, csökkenő trend csak 2016 első felében tapasztalható (7-1. ábra). Az EUA határidős ára 2018 előtt általában tonnánként 20 euró alatt mozgott, majd ezt követően tartósan 20 euró fölé emelkedett. A határidős ár magasabb, mint a spot ár, ez elsősorban a határidős piac aktívabb tranzakcióinak köszönhető, a két ár szinte szinkronban változik (Chen et al. 2020).

Az EU kibocsátáskereskedelmi rendszerének (EU ETS) létrehozása javította a globális szén-dioxid kibocsátási ármechanizmust, de új árucikként ártrendje befolyásolja a vásárlók kockázatértékelését. Az empirikus eredmények azt mutatják, hogy az EUA piaca, valamint a brent kőolaj, a szén és a földgáz piaci között nagyfokú volatilitási együttmozgás tapasztalható. Az EUA piac volatilitásának megértése nagyon fontos a befektetési döntések meghozatalához, a volatilitás nagy változásai kedvezőtlen jelzéseket adhatnak a kockázatkerülő befektetőknek. Az EU és a Kínai szén-dioxid kibocsátási engedély piacait összehasonlítva megállapítható, hogy a két piac ingadozásai aszimmetrikusak. Az EUA piaca erőteljesebben reagál a jó hírekre, míg a kínai szén-dioxid kibocsátási piac tőkeáttételi hatást mutatja, amely igazolja, hogy a volatilitás érzékenyebb a rossz hírekre. A kínai piac sokkal dinamikusabb, volatilitása erősebb, hatékonysága gyengébb (Dhamija et al. 2018, Sun et al. 2020).

Az energiahatékonysági politikák által kiváltott villamosenergia-kereslet csökkentése egyértelműen befolyásolja a kibocsátáskereskedelmi rendszert. A rögzített felső korlát módosítása nélkül, a csökkenő villamosenergia-igény csökkenti a szén-dioxid árat anélkül, hogy csökkentené a teljes kibocsátást. A villamosenergia-hatékonysági politikák lehetővé teszik a szén-dioxid határérték jelentős csökkentését. A 2005-ös kibocsátási szinthez képest 2020-ig 30%-os kibocsátás-csökkentést lehet elérni a kibocsátás-kereskedelmi rendszeren belül, hasonló vagy akár alacsonyabb költségekkel az ipari szektor számára (Thema et al. 2013). Az ÜHG kibocsátás csökkentésének másik eszköze a megújuló energiaforrások bővítése. Az időszakos kapacitások, mint például a szél és a napenergia kiépítése hatékony eszköz, amelyet alacsonyabb költségekkel, kevesebb strukturális változtatással lehet megvalósítani a

villamosenergia-ágazatban, mint más ágazatokban. Viták folynak arról, hogy a megújuló energiaforrások fejlesztése és az üvegházhatást okozó gázok elleni uniós kibocsátáskereskedelmi rendszer kidolgozása negatívan hatott egymásra, mivel az EU kibocsátáskereskedelmi rendszere csillapító hatással van a szén-dioxid árára. A megújuló energiaforrásokból származó villamos energiát támogató rendszerek csökkenthetik a villamos energia árát, amelyet az ETS is befolyásolt. A megújuló források bővítése helyettesíti a fosszilis tüzelőanyagokból származó villamos energiát, és ezáltal csökken a szén-dioxid kibocsátás. A kibocsátáscsökkentés iránti igény csökken, ennek következtében a szén-dioxid ár is csökken. Következésképpen a villamos energia nagykereskedelmi ára csökken. A legtöbb megújuló energiát támogató rendszert azonban a villamosenergia-piac finanszírozza, ami megnöveli a kiskereskedelmi árat (Abate et al. 2021, Blanco és Rodrigues 2008, Rathmann 2007).

8. AZ IDŐSORELEMZÉS MÓDSZERTANA ÉS EREDMÉNYEI

Disszertációm módszertan és eredmények blokkjának felépítése némiképp eltér a megszokott struktúrától, melyet a kutatási tématerület interdiszciplináris jellege tesz indokolttá. A későbbi könnyebb érthetőség érdekében az áramtözsdéről származó idősorokat először néhány hagyományos idősorelemzési módszerrel vizsgálom meg, hogy megismerjem azok alapvető tulajdonságait. Azért is célszerű így eljárni, mivel a láthatósági gráf módszertana a nemzetközi szakirodalomban is ritkán alkalmazott eszköz, mindemellett a megjelent cikkek a módszertant és a hálózatelméleti mutatószámokat elméleti síkon jól bemutatják, ám az eredmények tárgyalásánál csak általános megállapításokat tesznek. Nem térnek ki a hálózati topológiai mutatószámok konkrét jelentésére a vizsgált probléma kapcsán, így ezek többségét első körben saját dolgozatom eredményein belül próbálom meg értelmezni. Az idősorelemzés után röviden, egy ide szorosan kapcsolódó folyamatot mutatok be, ez pedig a véletlen bolyongás, ismertebb nevén Brown-mozgás. Az általam generált véletlen bolyongás a gráfelemzés során mintaként szolgál. Ezzel egyidőben a Hurst-index is bevezetésre kerül, melynek két fontos oka van. Egyrészt jól vizsgálható vele az idősor perzisztens/antiperzisztens tulajdonsága, másrészt a szakirodalom a mai napig gyakran alkalmazza (Alhagyan, 2022; Kim et al., 2019; Pasricha & He, 2022; Si & Bishi, 2020), annak ellenére, hogy néhány szerző megkérdőjelezi ennek valid jellegét (Mandelbrot & Hudson, 2005).

Ezek után következik a hálózatelméletet és a hálózatelemzést bemutató fejezet. Itt a topológiai mérőszámok alaplogikáját és számításuk módszertanát ismertetem. A legtöbb számítás és matematikai leírás Estrada (2012) munkájában jól visszakövethető, esetenként részletesebben tárgyaltak, hogy a láthatósági gráf esetében, annak elvontabb logikája miatt könnyebben interpretálhatóak legyenek. Miután bemutattam a főbb mérőszámokat, áttekintést adok néhány alapvető gráfmodell elméleti alapjaiba kezdve a magyar vonatkozású Erdős-Rényi modellel, egészen a szintén magyar gyökerekhez kapcsolódó Barabási-Albert modellig.

A következő fejezetben mutatom be az újfajta elemzési módszert, a *láthatósági gráfot*. Tárgyalása során röviden szemléltetem a horizontális láthatósági gráf módszerét is, mely szorosan kapcsolódik az alapvető modellhez, ám az elemzésem során a horizontális változatot terjedelmi és egyéb okokból kifolyólag nem alkalmazom. (Ezekből terveim szerint a későbbiekben folyóiratcikkek készülnek.) A módszertan matematikai alapjainak leírását követően néhány olyan idősoron tesztelem az eljárást, melyek a valóságban nem, vagy csak korlátozottan megfigyelhetők, azonban egyszerűségükben rejlik hasznosságuk – könnyedén

szemléltetik az idősorból generált láthatósági gráfok néhány, főként vizuális tulajdonságait. A matematikailag komplexebb szimulált idősorok láthatósági gráfként történő elemzését disszertációmban nem végzem el, mivel ezek kidolgozásához számos további kutatás és programozási ismeret szükséges. Az ilyen jellegű kutatómunkát doktori tanulmányaimat követően szeretném végezni és az eredményeket cikksorozatokban publikálni. Végül, de nem utolsó sorban az áramtőzsde gráffá alakított idősorainak elemzésével zárom a fejezetet. A vizsgált idősoros adatok minden esetben az áramtőzsdék másnapi piaci árait tartalmazzák.

8.1. AZ ÁRAMTŐZSDÉK ÁLTALÁNOS JELLEMZÉSE

Egy tőzsdei idősor vizsgálata leggyakrabban a piaci kockázatok megítélésében és a termékek árának helyes pozicionálásában lehet a szakemberek segítségére. Marossy (2010) a vállalatok gyártási folyamatának energiaigényessége szempontjából úgy közelíti meg az áramtőzsde vizsgálatának fontosságát, hogy feltételezi, a vállalat előre ismeri a felhasználandó energiamennyiséget az elkövetkező három évben. Ekkor az előre szerződés lehetőségére úgy tekint, mint egyfajta kockázatkezelési eszközre, melynek paramétereit az éppen aktuális piaci ár alapján határozza meg. Ezzel szemben, ha egy vállalat kevésbé kockázatkerülő, akkor szereplőként jelenik meg a villamos energia spot piacán, ezzel azonban kockázatos döntés hoz, hiszen az árak előre nem ismertek, a mindenkori piaci folyamatoknak vannak kitéve. Gyakran előfordul, hogy fölös kapacitásaikat az áramtermelő szektor szereplői is spot piacokra viszik, így a piac ismerete nem csak a felhasználó és a fogyasztó, hanem a termelő oldaláról nézve is fontos. Ilyenkor van szükségünk arra, hogy különböző matematikai-statisztikai eszközökkel leírjuk a piaci folyamatokat a múltbéli adatok alapján.

Idősoron az egymást követő, azonos tartalmú megfigyelések sorozatát értjük, és

$$Y_1; Y_2; Y_3; \dots Y_t \dots Y_n$$

módon jelöljük és az egymást követő megfigyelés közti távolságot azonosnak tekintünk. Ekkor ekvidisztans idősorról beszélünk (Koop 2008). Átlagát az alábbi formulával számíthatjuk:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{t=1}^n Y_t}{n}$$

Az áramtőzsdéket leíró alapstatisztikák eredményeit az 1. táblázatban foglaltam össze. Az adatok a vizsgált országok DAM piacának aukciós adataira vonatkoznak. Az adatok napi átlagárakra vonatkoztak €/MWh mértékegységben. Az adatok elérhetőek az egyes országok áramtőzsdéinek oldalán. A véletlen bolyongás (BW) egy mértékegység nélküli idősor, melynek generálásakor az országok átlagértékeit és szórásértékeinek átlagát vettem alapul.

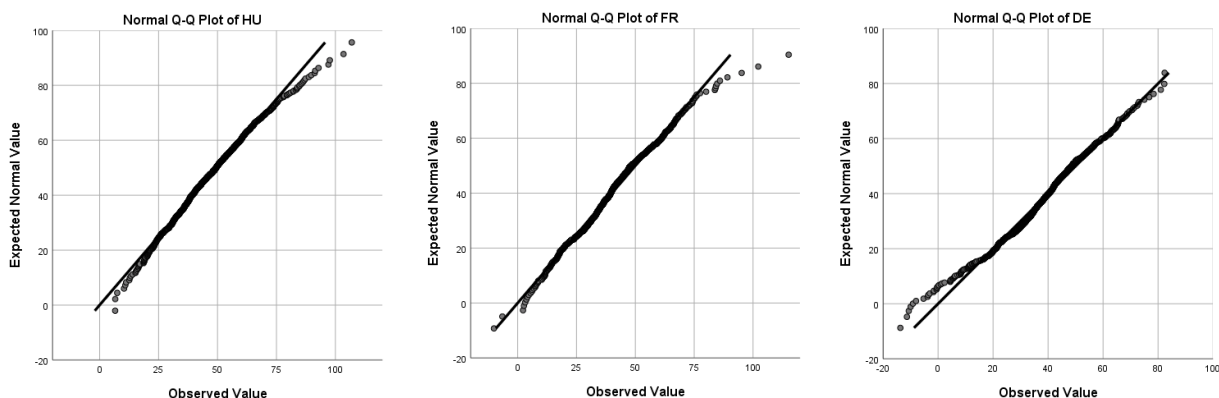
1. TÁBLÁZAT: AZ ÁRAMTŐZSDÉK ADATAINAK STATISZTIKAI MUTATÓSZÁMAI

| | HU | SK | CZ | RO | AU | DE | FR | SP | SLO | IT | BW |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| ÁTLAG | 46,78 | 41,33 | 39,95 | 45,42 | 39,84 | 37,56 | 40,59 | 46,30 | 49,94 | 50,77 | 42,52 |
| STD SZÓRÁS | 15,02 | 14,43 | 13,29 | 15,68 | 13,70 | 14,24 | 15,32 | 13,95 | 14,62 | 14,18 | 14,37 |
| ÁTLAG STD HIBÁJA | 0,45 | 0,44 | 0,40 | 0,47 | 0,41 | 0,43 | 0,46 | 0,42 | 0,44 | 0,43 | 0,43 |
| FELSŐ 95% ÁTLAG | 47,67 | 42,18 | 40,74 | 46,35 | 40,65 | 38,41 | 41,50 | 47,13 | 50,80 | 51,61 | 43,37 |
| ALSÓ 95% ÁTLAG | 45,89 | 40,47 | 39,16 | 44,49 | 39,03 | 36,72 | 39,68 | 45,47 | 49,07 | 49,93 | 41,67 |
| MINIMUM | 6,57 | -18,70 | -19,10 | 3,01 | -10,00 | -13,73 | -10,10 | 1,94 | 10,42 | 10,38 | -6,24 |
| MAXIMUM | 106,94 | 86,91 | 83,72 | 122,10 | 84,75 | 82,37 | 115,13 | 75,93 | 107,78 | 107,17 | 89,34 |
| MEDIÁN | 45,91 | 40,70 | 39,94 | 43,85 | 39,48 | 38,08 | 39,91 | 47,07 | 50 | 51 | 42,35 |
| MÓDUSZ | 42,94 | 21,45 | 32,74 | 37,78 | 37,00 | 38,25 | 39,94 | 60,69 | 56 | 51 | - |
| 5% TRIMM. ÁTLAG | 46,45 | 41,23 | 39,97 | 44,97 | 39,77 | 37,79 | 40,42 | 46,71 | 49,85 | 50,81 | 42,54 |
| TERJEDELEM | 100,37 | 105,61 | 102,82 | 119,09 | 94,75 | 96,10 | 125,23 | 73,99 | 97,36 | 96,79 | 95,58 |
| N | 1096 | 1096 | 1096 | 1096 | 1096 | 1096 | 1096 | 1096 | 1096 | 1096 | 1096 |

forrás: saját szerkesztés

A piac volatilitásának vizsgálatakor az árak terjedelmének számbavétele kiemelten fontos. A vizsgált országok adatai alapján, 2018-2020 között a terjedelem tekintetében 125,23€ értékkel a francia tőzsde az első. Ezt követi 119,09€ értékkel Románia, majd Szlovákia, Csehország és Magyarország. A legalacsonyabb érték a spanyol piacon figyelhető meg. A vizsgált időszak alatt a legmagasabb érték Franciaországban, a legalacsonyabb minimális ár pedig Csehországban volt mérhető (1. táblázat). Mindez azonban nem ad választ arra, hogy ezek a szélsőségek mikorra valószínűséggel következnek be.

8-1. ÁBRA: Q-Q PLOT



forrás: saját szerkesztés

A 8-1. ábrákon néhány áramtőzsdei adatsor (HU, FR, DE, a további országok ábrái a mellékletben található) ún. Q-Q plot ábrája látható, melyeken az elméleti és tapasztalati eloszlásfüggvény jelenik meg. A jó illeszkedés esetén a tapasztalati pontok rajta fekszenek az elméleti szórásból adódó egyenesen. Ezeket vizsgálva egyből szembetűnik, hogy a megjelenített tőzsdék eloszlását tekintve minden piacra kivétel nélkül a vastagfarkú (fat tail) eloszlás jellemző, ami egyben azt eredményezi, hogy a normál eloszlásra vonatkozó statisztika szignifikáns eltérést fog jelezni (2. táblázat). Ezért az áramtőzsdéken nagy valószínűséggel fordulnak elő szélsőséges kilengések, ami a piac kiszámíthatóságát tekintve nem feltétlenül pozitív jelenség. A francia áramtőzsdén a magasabb árak jellemzőek, a német piacon pedig az alacsonyabb – ún. lefelé mutató – ártüskék. A magyar piacon mindkét eset gyakrabban fordul elő. Ezt a ferdeségi és csúcossági mutatószámok is alátámasztják. Az, hogy ezek a kilengések milyen időintervallumon zajlanak le a tőzsdéken, a későbbi perzisztencia-vizsgálat válaszolja meg.

2. TÁBLÁZAT: NORMALITÁSVIZSGÁLAT, FERDESÉG ÉS CSÚCSOSSÁG

| | Kolmogorov-Smirnov | | | Shapiro-Wilk | | | Jarque-Bera | | |
|-----|--------------------|------|----------|--------------|------|----------|-------------|----------|---------------------|
| | Statistic | df | Sig. | Statistic | df | Sig. | Skewness | Kurtosis | |
| HU | 0,030432 | 1096 | 0,018428 | 0,992269 | 1096 | 1,7E-05 | 0,36 | 0,39 | 31.955* |
| AU | 0,042553 | 1096 | 7,75E-05 | 0,99242 | 1096 | 2,1E-05 | 0,09 | 0,64 | 19.429* |
| DE | 0,052252 | 1096 | 1,98E-07 | 0,987991 | 1096 | 8,02E-08 | -0,27 | 0,82 | 42.993* |
| SK | 0,037099 | 1096 | 0,001195 | 0,994117 | 1096 | 0,000264 | 0,08 | 0,54 | 14.161* |
| CZ | 0,034753 | 1096 | 0,003377 | 0,993011 | 1096 | 4,91E-05 | -0,08 | 0,89 | 35.705* |
| RO | 0,043768 | 1096 | 3,96E-05 | 0,983219 | 1096 | 6,32E-10 | 0,54 | 1,10 | 109.76* |
| FR | 0,04578 | 1096 | 1,24E-05 | 0,991395 | 1096 | 5,13E-06 | 0,27 | 0,74 | 39.096* |
| SP | 0,035806 | 1096 | 0,00214 | 0,985926 | 1096 | 8,77E-09 | -0,39 | -0,15 | 27.981* |
| SLO | 0,029 | 1096 | 0,026 | 0,995 | 1096 | 0,002 | 0,09 | 0,26 | 4.4988 ^x |
| IT | 0,044 | 1096 | 0,000 | 0,994 | 1096 | 0,044 | -0,03 | 0,28 | 3.5645 ^x |
| BW | 0,021 | 1096 | 0,200 | 0,998 | 1096 | 0,021 | 0,01 | 0,21 | 2.0458 ^x |

Jarque-Bera: * a szignifikanciaszint rendre $p < 0,001$; x a szignifikanciaszint $p > 0,05$

forrás: saját szerkesztés

A leginkább változékonny (volatilis) piacok mindezek alapján a román, a magyar és a francia tőzsdék, mivel itt nagyobb a pozitív irányba történő kilengések valószínűsége. Ezzel szemben az árzuhanás a spanyol, a német, valamint a cseh piacon a legvalószínűbb. A piaci szélsőségek a relatív szórással is vizsgálhatók. Általában *a magasabb kockázatú piacokat a volatilitás tekintetében magasabb relatív szórási együttható is kíséri*. Megjegyzem azonban, hogy ebben az esetben a relatív szórás a kevésbé veszélyes, sőt olykor kifejezetten pozitív hozadékkal járó áreséseket is figyelembe veszi, ezért nem javasolt a relatív szórás önmagában történő értelmezése a piaci változékonyság megállapítására.

3. TÁBLÁZAT: RELATÍV SZÓRÁS

| | HU | SK | CZ | RO | AU | DE | FR | SP | SLO | IT | BW |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CV | 32,10 | 34,91 | 33,26 | 34,52 | 34,39 | 37,91 | 37,74 | 30,13 | 29,28 | 27,93 | 33,78 |

forrás: saját szerkesztés

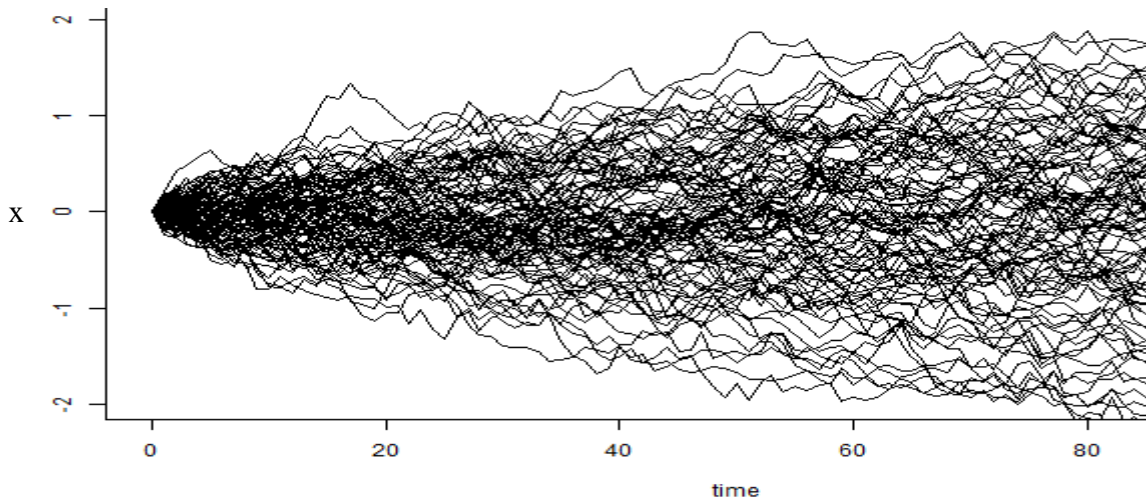
A kiugró értékek azonban az áramtőzsde esetében nagy jelentőséggel bírnak, hiszen, mint minden tőzsde esetében, itt is a nyereségszerzés szempontjából kulcstényezőnek számítanak, valamint a magas veszteségek realizálásának elkerülése érdekében is kiemelkedő szereppel bírnak. Az adatbázisból történő kizárásukat ennek kapcsán nem tartom célravezetőnek.

Ugyanakkor a láthatósági algoritmussal történő adatvizsgálatnál is fontos szerephez jutnak az outlier adatok. Marossy (2010) munkájában ugyancsak arra az eredményre jutott, hogy az ártüskék korrelációs szempontból vizsgálva éppen úgy viselkednek, mint az átlagos időszak árai, tehát monofraktál folyamatnak tekinthetők és a vastagfarkú eloszlás részei.

8.2. VÉLETLEN BOLYONGÁS (BROWN-MOZGÁS) ÉS A HURST-INDEX

Az idősorok későbbiekben vizsgált perzisztens jellegének kapcsán szükséges a véletlen bolyongás, mint referenciapont bevezetése. A véletlen bolyongás (Brown-mozgás) a láthatósági gráfként való elemzés során is megjelenik, ezért ezt a részt részletesebben tárgyalom.

Brown, botanikusként 1827-ben a virágpollenek vízben történő mozgását figyelte meg, melynek során azt észlelte, hogy a pollenszemcsék a nyugodt folyadékban is látszólag kaotikus, random mozgást végeznek. Később gáznemű elegyekben is ugyanilyen eredményekre jutott. Ezek alapján alkotta meg modelljét. A véletlen bolyongás nagy számú elemek legtöbbször véletlenszerű, szüntelenül zajló rendszertelen mozgásaiból adódó ütközéseket és az innen eredő véletlenszerűséget írja le. Az efféle mozgás számos dimenzióban vizsgálható. Több tanulmány is bizonyította, hogy a véletlen bolyongás a gazdasági idősorok vizsgálatában is sikerrel alkalmazható, hiszen időben folytonos, sztochasztikus folyamat (Davis & Etheridge, 2006; SU & WANG, 2017; Szűcs, 2012; Yang et al., 2020). A 8-3. ábrázolt véletlen bolyongás erős hasonlóságot mutat a tőzsdei idősorok – látszólag – véletlenszerű mozgásával. Az alkalmazott matematikában, a műszaki jelfeldolgozásban és a közgazdaságtani elemzésekben is nagy jelentőséggel bír az ún. fehér zaj szimulációjában és martingál kutatásokban. Ez utóbbi olyan szimulációt jelent, ahol a múltbéli információ semmilyen körülmények között nem segíti elő a jövőbeli nyerő pozíciót. Ezzel ellentétben, ha egy folyamat nem martingál, akkor a következő időpontban bekövetkező várható érték egyenlő lehet az előző folyamat várható értékével, de az előző kimenetel ismerete csökkentheti a jövőbeli kimenet bizonytalanságát. Ebből adódóan tehát a martingál folyamat egy fair játék tökéletes modellje.



forrás: saját szerkesztés R Studio és Matlab szimulációval

A hatékony piac elmélete szerint a tőzsdéken, az oda beszivárgó információ azonnal a kereskedési magatartás befolyásoló tényezőjévé válik. Ezek az információk az árakban, azok volatilitásában csapódnak le. Ennek okán a múltbeli információk nem feltétlenül hatnak a jövőbeli kereskedési mintázatokra, azonban a nap folyamán bekövetkező gazdasági változások annál inkább hatnak rájuk. A múlttól való függetlenségnek tehát egyfajta adaptációja lehet, hogy a tőzsdei idősorok véletlen bolyongást követnek. A hatékony piac modellje leginkább a pénzügyi piacok sajátja (Delcey, 2019; Rossi & Gunardi, 2018), ám számos esetben bírálták is a modellt, mondván, csak viszonyítási alapként használható (Malkiel, 2003).

A véletlen bolyongás modellként használható számos különböző jelenség esetében. Ez egy időben folytonos, sztochasztikus folyamat. Minden részecske t időpontbeli pozíciója tehát W_t , a következő matematikai tulajdonságokkal (Medvegyev 2008; Marossy 2010):

- I. $W_H(0) = 0$
- II. A folyamat stacioner növekményű, a növekmények pedig normális eloszlást követnek, nulla várható értékkel
- III. minden $0 < t_1 < t_2 \dots t_n$ véges halmazban a változók egymástól függetlenek
- IV. az értékek közti kovariancia:

$$\text{cov}(w_H(t), w_H(s)) = R_H(t, s)$$

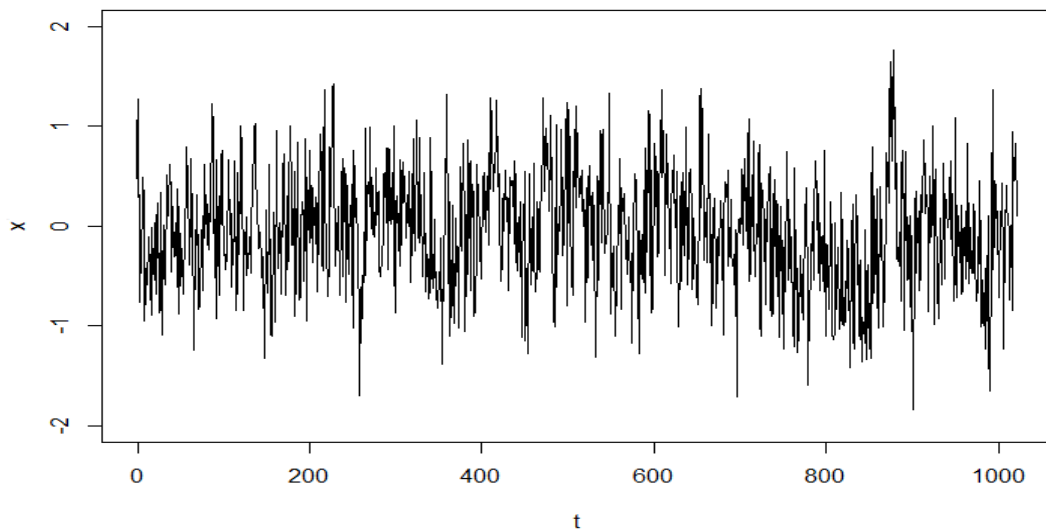
ahol

$$R_H(t, s) = \frac{1}{2}(|t|^{2H} + |s|^{2H} - |t - s|^{2H}), 0 < H \leq 1$$

- V. trajektóriái folytonosak.

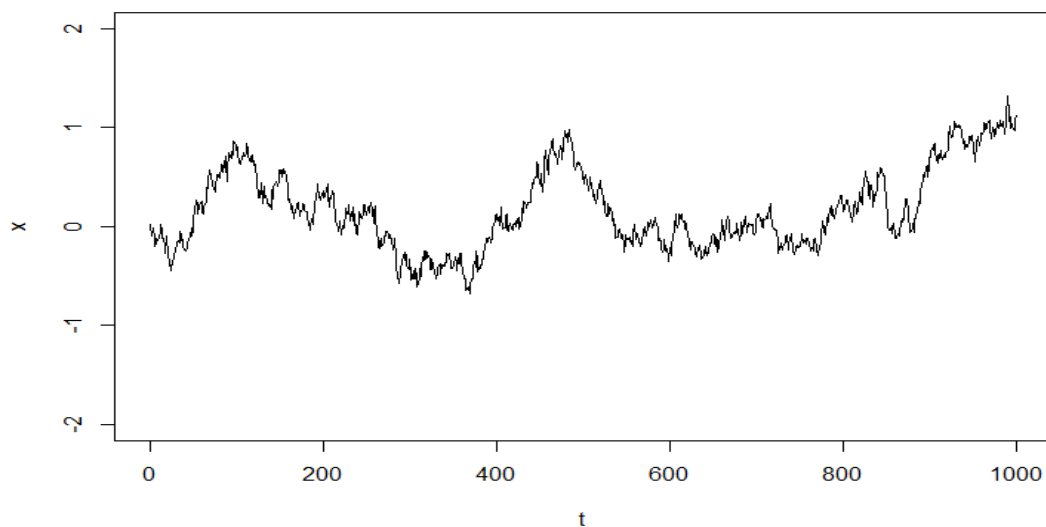
(Durrett, 2019; Dyson, 1962; Mandelbrot & Van Ness, 1968; Yang, 2020). Az egyenlet H paramétere a következő szakaszban tárgyalt Hurst-kitevő.

8-3. ÁBRA: VÉLETLEN BOLYONGÁS 2.



forrás: saját szerkesztés

8-4. ÁBRA: BROWN-MOZGÁSBÓL LÉTREHOZOTT IDŐSOR



forrás: saját szerkesztés

A fenti ábrán egy véletlen bolyongást leíró vonaldiagramot ábrázoltam, ún. fehér zajt, alatta pedig annak határozott integrálját. Figyeljük meg az idősor látszólagos vizuális hasonlóságát a valós tőzsdei idősorokkal. Megjegyzendő azonban, hogy számos ellenpélda is olvasható a szakirodalomban, melyek megkérdőjelezzik a véletlen bolyongás mind elméleti, mind pedig tapasztalati hasonlóságát a tőzsdei idősorok tekintetében (Mandelbrot & Hudson, 2005; Mandelbrot & Van Ness, 1968).

Az áramtőzsde vizsgálata során felmerül a kérdés, hogy a vizsgált idősorban a ciklusok miként viselkednek. Előfordulnak esetek, amikor egy anomália hosszabb ideig fennáll, ekkor perzisztens folyamatról beszélünk. Számos szerző állítja ennek ellenkezőjét, tehát, hogy az idősorok antiperzisztensek (Popovska & Gospodinov, 2019; Simonsen, 2003). Ennek értelmében, ha egy sokkhatás lép fel a tőzsdén, aktivizálódnak bizonyos piaci mechanizmusok, melyek korrigálják a folyamatot és visszahúzzák azt az átlaghoz közeli, „nyugodt” állapotba. A legvégső esetben, amikor egy sokkhatást követően egy piac soha nem tér vissza a múltbéli állapotba, integrált folyamatra következtethetünk (Marossy, 2010). Az előbbieket tesztelésére a Hurst kitevőt alkalmazom. A szakirodalmi információk és az idősorok jellege alapján az alábbi két hipotézist állítom fel:

H₁: Az egyes országok áramtőzsdéinek idősorai perzisztens jellemezővel bírnak.

H₂: Az országok áramtőzsdéinek ársorai önaffin jellemezővel bírnak.

A Hurst-kitevő becslésére az ún. *R/S* (újraskálázott terjedelem-analízis, angolul: Rescaled Range Analysis) analízist alkalmazom.

A Hurst kitevővel kapcsolatban három megállapítás tehető:

ha $H < \frac{1}{2}$, akkor az idősor növekményei *negatív korrelációban állnak* egymással (antiperzisztens);

ha $H = \frac{1}{2}$, akkor a folyamat növekményei *korrelálatlanok*, melynek esetén véletlen bolyongást kapunk eredményül; végül

ha $H > \frac{1}{2}$, akkor a növekmények *pozitívan korrelálnak* egymással (perzisztens).

Egy olyan folyamatban, melynek Hurst-indexe $H=0.8$, az idősor t időpontbeli megfigyelése nagy valószínűséggel pozitív irányba befolyásolja az őt követő értéket. Egyszerűen fogalmazva, a Hurst-index egyidejűleg ragadja meg az idősor volatilitását és annak hosszú távú memóriáját (Marossy 2010).

Az újraskálázott terjedelem-analízis számításának lépései:

Először is bevezetünk egy $x(t)$ $1 \leq t \leq T$ idősort T hosszúsággal. Ezt követően osszuk fel az $x(t)$ idősort $N_s = \text{int} \frac{T}{\tau}$ egymást át nem fedő τ hosszúságú részidőszakokra. Minden k részidőszak átlagát jelöljük \bar{u}_k -val szórását pedig S_k -val a következők szerint:

$$S_k = \left(\sum_{t=1}^{t=\tau} (x(t) - \bar{u}_k)^2 / \tau \right)^{\frac{1}{2}}$$

Ezután egy új sorozat, nevezetesen a számtani középértéktől való halmozott eltérést kell kiszámítani az alábbiak szerint:

$$U(i) = \sum_{t=1}^{t=i} (x(t) - \bar{u}_k) \quad (1 \leq i \leq \tau)$$

A részidőszakok terjedelme az alábbiak szerint alakul:

$$R_k = \mathbf{max}(U(i)) - \mathbf{min}(U(i))$$

Végül:

$$\frac{R}{S} = \frac{\sum_k R_k}{\sqrt{\sum_k S_k^2}}$$

A számítás végén az idősort log-log skálán megjelenítve annak k hosszúságú része, terjedelme és szórásának hányadosa egy Hurst-indexszel megegyező meredekséggel rendelkező lineáris transzformáció (Marossy, 2010; Weron & Misiorek, 2006), tehát $R/S \propto \tau^H$. Az egyenlet Shen (2017) munkájában ellenőrizhető.

Bár a Hurst-kitevő számítására még számos további eljárás is ismert a szakirodalomban³ Granero et al. (2008) munkássága alapján az általam vizsgált idősor kellő hosszúságúnak tekinthető a fenti módszer alkalmazására. Rövid időszakok (T) esetében az átlag és szórás nagy eltéréseket mutat, azonban a javasolt 10-20 adatot tartalmazó időszakok elegendőek a vizsgálatához. A Hurst kitevőt már az 1970-es években is alkalmazták tőzsdei idősorok leírására, a szakirodalom pedig azóta is folyamatosan bővül a témában (Greene & Fielitz, 1977; Jin, 2016; Lo, 1991; Rejichi & Aloui, 2012).

A Hurst-index egy idősor önaffin jellegének vizsgálatára is alkalmas. Egy idősor önaffin abban az esetben, ha annak egy részét kiemelve az eredeti idősorral azonos tulajdonságokat tudunk kimutatni. A szakirodalomban az önhasonlóság és az önaffinitás gyakran egymás szinonimájaként szerepelnek, azonban ez a felcserélhetőség a matematikai értelmezés szerint nem helytálló (Zhang et al., 1990).

³ Anis Lloyd; GM1; GM2; AWC, DFA, ARFIMA

A Hurst-kitevő nem stacioner idősorokra érzékeny, ezért első körben ennek fennállását kell tesztelni (Liu et al., 2019).

4. TÁBLÁZAT: STACIONARITÁS TESZTELÉS EREDMÉNYEI

| | HU | SK | CZ | RO | AU | DE | FR | SP | SLO | IT | Brown mozgás |
|----------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|--------------|
| ADF test | -4,1892 | -3,8914 | -4,0125 | -4,0831 | -4,441 | -5,5613 | -3,927 | -3,7024 | -3,7357 | -3,7945 | -6,4757 |
| p-value | 0,012 | 0,014 | 0,011 | 0,010 | 0,010 | 0,009 | 0,013 | 0,023 | 0,02221 | 0,01927 | 0,01 |

H_1 : az idősor stacionárius

forrás: saját szerkesztés

Az eredmények alapján minden idősor kivétel nélkül stacioner, tehát egységgyököt nem tartalmaz. Most már számítható az idősorok Hurst-kitevője.

5. TÁBLÁZAT: HURST-KITEVŐ

| | HU | SK | CZ | RO | AU | DE | FR | SP | SLO | IT | Brown mozgás |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Hurst-kitevő | 0,812 | 0,805 | 0,798 | 0,801 | 0,782 | 0,768 | 0,817 | 0,847 | 0,838 | 0,834 | 0,5 |

forrás: saját szerkesztés

Tézis₁: Az egyes országok áramtőzsdéinek idősorai rendre perzisztens tulajdonsággal bírnak, tehát növekményeik pozitív korrelációban állnak.

Ezt követően az idősort egymást nem átfedő, azonos hosszúságú időszakokra bontva azt vizsgáltam, hogy az egyes szakaszok Hurst-kitevői milyen mértékben térnek el a teljes idősoron kapott kitevőtől. Minden esetben az eredeti kitevőhöz közel eső értéket kaptam, így az áramtőzsdék idősorait önaffin jellemzővel bíró sorozatoknak tekintem.

Tézis₂: Az egyes országok áramtőzsdéinek idősorai különböző időszakokra bontva a teljes adatsorhoz közel eső Hurst-kitevővel rendelkeznek, ezért önaffin jellemzővel bírnak.

Az utolsó tézis alapján feltételezhető, hogy az áramtőzsdéken jelenlévő szereplők a múltbéli történések alapján hoznak döntéseket bizonyos gazdasági behatások függvényében. Amennyiben az energia árfolyama egy adott pillanatban emelkedik, akkor a következő időszakban valószínűleg folytatódik az emelkedés. Befektetőként a piacon technikai elemzés végezhető, és a technikai elemzésen alapuló kereskedési döntéshozatali módszerek irányadó szerepet játszhatnak. A befektetők vélhetően a piacon lévő releváns információkat felhasználják további hozamok eléréséhez. E tekintetben az áramtőzsde folyamatai nem teljesen felelnek meg

a hatékony piac feltételrendszerének. Mint azt a szakirodalmi áttekintésben is említettem, egyes piacokon a szereplők megkülönböztetésmentes alapon széles körű hozzáférést kapnak a villamosenergia-értékesítés különféle formáihoz, valamint a villamosenergia nagykereskedelmi piacon történő szerződéses és értékesítési volumenére vonatkozó információkhoz egyaránt. Ezt az empirikus kutatási eredményim is alátámasztják. Az áramtőzsdék esetében a relatíve alacsony számú piaci szereplő miatt, a piaci folyamatok gyakran mikroökonómiai oldalról ragadhatók meg és csak közvetve mutatható ki makrogazdasági hatás (rövid távon).

Az áramtőzsdék idősorainak statisztikai áttekintése után disszertációm a hálózatelmélet témakörével folytatom, amely bevezető elméleti kerete a további kutatásomhoz szorosan kapcsolódik.

9. HÁLÓZATELMÉLETI ALAPOK

A különféle hálózatok szerkezetének megértése fontos annak érdekében, hogy az ezekben a rendszerekben lezajló funkcionális és statikus vagy dinamikus folyamatokat megérthessük. A hálózatelmélet témakörét az utóbbi évtizedekben egyre több tudományterület kezdte interpretációs keretként és leírási modellként alkalmazni (Szarvas, 2016). *Az interdiszciplináris jellegét épp az adja, hogy az egyes területeken megfigyelhető összefüggések és kapcsolathálózatok nagyon hasonló tulajdonságokat mutatnak.* A hálózatelmélet tehát ezeknek a rendszereknek a szerkezetét vizsgálja. Disszertációmban egy *újabb alkalmazási lehetőséget* mutatok be, *az idősorok elemzésének lehetőségét, hálózatelméleti módszerekkel.*

A hálózatok matematikai modelljei az ún. gráfok, melyek pontokból (csúcsok) és az őket összekötő vonalakból (élek) álló alakzatok. A gráfok lehetővé teszik az entitások közötti kapcsolatok grafikus megjelenítését és vizuális, illetve matematikai-statisztikai elemzését, ahol az entitás lehet személy, esemény, tranzakció, jármű vagy bármi egyéb. Az entitások *csúcspontokként* vannak ábrázolva, az entitások közötti kapcsolatok pedig vonalakként, amelyeket *éleknek* nevezünk. (Nemes Nagy 2009). Egy G gráf egy $G = (V, E)$ rendezett pár, ahol $V \neq \emptyset$ véges halmaz, E pedig a V halmaz elemeiből képezett párok halmaza. V elemeit a gráf csúcsainak (vagy csúcspontjainak), E elemeit a gráf éleinek nevezzük. A $G' = (V', E')$ gráfot a $G = (V, E)$ gráf részgráfiának nevezzük, ha $V' \subseteq V$ és $E' \subseteq E$ (Temesi & Varró 2014, Gerócs & Vancsó 2018).

9.1.1. A szomszédsági mátrix

A szomszédsági mátrix tulajdonképpen nem más, mint egy teljeskörű leírása a hálózatban megfigyelhető kapcsolati hálónak, ahol minden egyes pontot egyesével jelölünk. A mátrixban $A_{ij} = 1$ abban az esetben, ha az i és j pontok között kapcsolat áll fenn, azaz él húzható a két pont közé, és $A_{ij} = 0$, ha a két pont között nincs kapcsolat. Ezen kívül számos egyéb szomszédsági mátrix ismert, munkám szempontjából azonban az alapeset ismertetése elegendő. Egy szomszédsági mátrixban, irányítatlan gráf esetén, ahol az éleken történő haladás kétirányú, egy adott csúcspont fokszáma megegyezik a saját sorának/oszlopának elemösszegével, tehát

$$k_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} = \sum_{i=1}^N A_{ji}$$

9.2. TOPOLOGIAI MÉRŐSZÁMOK

A későbbiekben bemutatásra kerülő láthatósági gráfként való megjelenítés és elemzés megértéséhez fontosnak tartom a hálózatelméleti alapfogalmak összefoglalását és esetenként részletesebb magyarázatát a könnyebb érthetőség érdekében. Elsőként a hálózatok topológiai mérőszámait mutatom be, azok közül is az elemzésem szempontjából releváns mutatókat sorakoztatom fel.

9.2.1. Fokszám-mérőszámok és eloszlás

A hálózatok vizsgálatának egyik legfontosabb mérőszáma a fokszámeloszlás. Megmutatja a gráf egy adott csúcspontjának a hálózat többi szereplőjével való összekapcsoltságát. Irányítatlan hálózatban A és B pont szimmetrikus kapcsolatban állnak egymással, míg irányított hálózatban ez a feltétel nem feltétlenül áll fenn. Az utóbbi hálózati típusban az egyes csúcspontoknak lehet ki- és belépő éle egyaránt, így az információ nem szimmetrikusan halad a két pont között. Kutatásom során, a láthatósági gráfoknál irányítatlan gráfokkal dolgozom. Az élek száma (L) irányítatlan gráfban az alábbi matematikai formulával írható fel:

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N k_i$$

Az $\frac{1}{2}$ -del való szorzás azért szükséges, mivel minden kapcsolat kétszer kerül az egyenletbe, a kapcsolatok szimmetrikusak, tehát A épp olyan minőségű kapcsolatban áll B-vel, mint B A-val. Mindezek alapján az átlagos fokszám is kiszámítható.

Definíció: Egy irányítatlan gráfban a csúcsok éleinek átlagát átlagos fokszámnak nevezzük. Formálisan:

$$\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i$$

Az átlagos fokszám az alábbi formában is felírható:

$$\langle k \rangle = \frac{2L}{N}$$

A kettes szorzó mutatja, hogy egy él két csúcs között irányítatlan, így minden él kétszer jelenik meg a hálózatban, majd ezt osztjuk a csúcspontok számával.

Definíció: A fokszámeloszlás p_k annak valószínűségét mutatja meg, hogy a hálózathoz egy véletlenszerűen kiválasztott pont fokszáma éppen k . Ekkor:

$$\sum_{k=1}^{\infty} p_k = 1$$

9.2.2. Asszortativitás

A fokszám-asszortativitás (degree assortativity) nem más, mint egy Pearson féle korrelációs mutató. Segítségével választ kaphatunk arra, hogy az azonos nagyságrendű csúcspontok összekapcsolódnak-e egymással, vagy pedig a nagy fokszámú csúcspontok az alacsony fokszámú csúcspontokkal keverednek-e. Az asszortativitás számításának folyamata tehát Pearson korrelációval történik az alábbi egyenlet szerint (Estrada, 2011):

$$r_k = \frac{\frac{1}{m} \sum_{(i,j) \in E} k_i k_j - \left\{ \frac{1}{m} \sum_{(i,j) \in E} \frac{1}{2} [k_i + k_j] \right\}^2}{\frac{1}{m} \sum_{(i,j) \in E} \frac{1}{2} [k_i^2 + k_j^2] - \left\{ \frac{1}{m} \sum_{(i,j) \in E} \frac{1}{2} [k_i + k_j] \right\}^2}$$

ahol k_i, k_j az i és j (i, j) $\in E$ csúcspontok fokszámai, m pedig az élek száma.

Abban az esetben, ha $r > 0$ a hálózat asszortatív, $r < 0$ esetén disszortatív, míg $r = 0$ a csúcspontok korrelálatlanságát jelzi (M. E. J. Newman, 2002). Az asszortativitás az egyik legfontosabb strukturális mérőszám a hálózatok tanulmányozásához, megmutatja, hogy a hálózatba kapcsolt rendszerek dinamikája, beleértve a szinkronizálást, a perkolációt, a szerveződést, a hálózat robusztusságát egyaránt befolyásolja. (Ohtsuki et al., 2006; Strogatz, 2001). Statisztikailag egy hálózat asszortativitása három strukturális tényező egyensúlyától függ: a tranzitivitás (klaszterezettség), az intermoduláris kapcsolódás és az elágazás mértékétől. Az első két tényező pozitívan járul hozzá a hálózat asszortativitásához, míg az elágazás inkább a disasszortatív hálózatok ismérve (Estrada, 2011). Az információkat a korrelációs mátrixban rögzítjük, ahol e_{ij} annak valószínűsége, hogy egy véletlenszerűen kiválasztott pont éppen i és j fokszámmal rendelkezik (M. E. Newman, 2002). Mivel valószínűségről van szó, ezért

$$\sum_{i,j} e_{ij} = 1$$

Az asszortativitás a k fokszámmal rendelkező csúcspontok és szomszédjainak átlagos fokszámának korrelációs együtthatójával is közelíthető (Pastor-Satorras et al., 2001).

9.2.3. A hálózat átmérője (diameter)

Definíció: Egy hálózat átmérője egyenlő a legrövidebb útvonalhosszúság maximumával, azaz ebben a szakaszban $\rho_g^{max}(i, j)$. Azt a legnagyobb „ugrást” jelenti, amely a két legtávolabbi csúcspont közti út hosszát jelöli. A kis átmérőjű hálózatok jellemzően kisvilág tulajdonsággal rendelkeznek.

9.2.4. Átlagos útvonalhossz (average path length)

A hálózatban útnak nevezzük azon pontokat és az őket összekötő élek sorozatát, melyek lehetővé teszik, hogy az általunk kiválasztott két végpont között szakadás nélkül végig tudjunk haladni. Formálisan: az általunk kiválasztott i és j pontok között létezik útvonal, ha az alábbi feltétel fennáll: $i = i^0, i^1, \dots, i^M = j$ melyek estén $g_{i^m i^{m+1}} \neq 0, \forall m = 0, \dots, M - 1$.

Egy irányítatlan hálózatban a legrövidebb útvonal hossza $d(i, j)$ két pont u és v között az őket összekapcsoló élek száma a hálózatban a lehető legrövidebb úton. Abban az esetben, ha szakadás alakul ki a hálózatban, tehát nem összefüggő, akkor definíció szerint a hálózat átlagos útvonalhossza $d(i, j) := \infty$. Az átlagos útvonalhosszúság a következő módon számítható. Első lépésben a mátrix ún. sorösszegét kell meghatározni, amely távolságösszegnek is tekinthető, hiszen összegzi egy adott pont összes kapcsolatát.

$$s(i) = \sum d(i, j)$$

Ezt követően az ún. félösszeg kiszámítása következik, melynek bevezetése Wiener (1947) munkásságához kapcsolódik, aki a szénhidrogének kapcsolódásainak vizsgálatokor alkalmazta először ezt a számítást. Leginkább Wiener-index néven hivatkoznak rá a szakirodalmakban (Allen-Perkins et al., 2017; Cohen et al., 2010; Estrada, 2012).

$$W(G) = \frac{1}{2} \langle 1|D|1 \rangle = \sum_{i=1}^n S(i) = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j d(i, j)$$

Ebből pedig a Wiener-indexszel kifejezhető a hálózat legrövidebb úthossza:

$$\bar{l} = \frac{2W(G)}{n(n-1)}$$

Az átlagos útvonalhosszúság ekkor $1 \leq \bar{l}(G) \leq \frac{n+1}{3}$.

Definíció: Egy hálózat legrövidebb útvonalhosszúsága a hálózat összes pontja közötti útvonalak hosszának átlaga.

Az útvonalak témakörénél fontos megemlíteni, hogy a topológiai vizsgálatok további fontos kérdése, hogy egy hálózat összefüggő-e. Abban az esetben, ha a hálózat bármely két pontja között létezik a hálózat éleiből álló útvonal, a hálózat összefüggő, ellenkező esetben nem összefüggő és a $\rho_g(i, j) = \infty$ összefüggés áll fenn.

9.2.5. Sűrűség (density)

Definíció: Egy hálózat sűrűsége a megvalósult kapcsolatok száma az elméletileg lehetséges összes kapcsolat arányában.

A lehetséges összes kapcsolat száma irányítatlan gráf esetében $n * (n - 1)$.

$$\delta(G) = \frac{2m}{n * (n - 1)} = \frac{\bar{k}}{n - 1}$$

ahol $m = |E|$ a hálózat éleinek száma, \bar{k} pedig az átlagos fokszám.

9.2.6. Klaszterezettségi együttható (clustering coefficient)

A klaszterezettségi együttható az egyes csúcspontok kapcsolódásának struktúrájából indul ki.

Definíció: Annak mértékét, hogy egy hálózat elemének szomszédjai milyen mértékben kapcsolódnak egymáshoz, klaszterezettségi együtthatónak nevezzük.

Amennyiben háromszögek (tripletek) jönnek létre a hálózatban, megindul egyfajta csoportosulás. Ha egy csúcspont kapcsolódik másik két csúcsponthoz, melyek azonban egymással nem állnak kapcsolatban, részleges tripletről beszélünk (Opsahl & Panzarasa, 2009; Panzarasa et al., 2009). Mivel a klaszterezettség a tripletek kialakulásával kezdődik, ezért számításának alapja is erre épül.

$$C_i = \frac{2|C_3(i)|}{k_i(k_i - 1)}$$

ahol k_i az i -edik elem fokszáma, $C_3(i)$ az i -edik elemhez kapcsolódó tripletek száma. Jelölje τ_i az i -edik elem környezetét a szomszédsági mátrixban, ekkor $\tau_i = \{j | a_{ij} = 1\}$. Így tehát L_i , mint az i -edik elem fokszáma, $L_i = \tau_i$. A klaszterezettség jól használható mutató a hálózaton belül egy adott lokáció vizsgálatára és ahogy azt arra az angol elnevezés is utal, lokális mutatószám. Amennyiben a klaszterezettségi együttható értéke 1, az adott elem és szomszédjai teljes gráfot alkotnak, míg 0 esetén nincsenek kapcsolatban egymással (Estrada 2011).

Ebből levezethető a hálózat átlagos klaszterezettsége (global clustering coefficient), amely tulajdonképpen a teljes hálózatra értelmezett mutató:

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$$

Az átlagos klaszterezettségi együttható egyfajta valószínűségi mutató. Értéke megmutatja, hogy egy véletlenszerűen kiválasztott elem és annak véletlenszerűen kiválasztott két közvetlen szomszédjai kapcsolatban állnak-e egymással.

9.2.7. Közelség (Closeness Centrality)

Néhány esetben nem kizárólag a központi szerep játszik fontos szerepet egy hálózatban. Bizonyos helyzetekben nem csupán azok a csúcspontok kerülnek fókuszba, amelyek központi szerepet játszanak a kapcsolataik száma alapján, hanem azok is, amelyek viszonylag közel vannak a hálózat összes többi csúcspontjához. Ennek leginkább az információáramlás vizsgálatoknál van kiemelt szerepe. Ezekben az esetekben egy csúcspont centralitásának megfelelő mérőszáma a szóban forgó csúcspont és az összes többi csúcspont közötti legrövidebb útvonal távolságösszegének inverze a hálózat többi csúcspontjához viszonyítva. Ezt a centralitásmértéket közelség-centralitásnak is nevezzük (Wasserman & Faust, 1994).

Definíció: A hálózat egy adott csúcsából a gráf összes többi csúcsába vezető utak összegének reciproka az adott i csúcspont közelsége. Formálisan:

$$CC(i) = \frac{n-1}{s(i)}$$

ahol $s(u)$ a korábban már definiált kapcsolatok összege:

$$s(i) = \sum_{v \in V(G)} d(i, j)$$

9.2.8. Közöttiség (betweenness centrality)

Gyakran egy csúcspont relatív fontosságát vizsgáljuk a többi csúcspontpár közötti kommunikációban. Ezek a csúcspontok elősegítik vagy gátolják a hálózat más csúcspontjai közötti kommunikációt. Ezek a centralitási mértékek az adott csúcsponton keresztül áthaladó információ arányát veszik figyelembe a hálózatban a gráf más csúcspárjainak kommunikációjában.

Definíció: A hálózat egy adott csúcspontján áthaladó információk/legrövidebb utak áthaladását méri.

$$BC(i) = \sum_{s \neq t \neq i} \frac{d_{st}(i)}{d_{st}}$$

ahol d_{st} az s és t csúcspontok közti legrövidebb utak száma, $d_{st}(i)$ pedig az adott s és t csúcspontok közötti legrövidebb utak száma, melyek az adott i ponton áthaladnak.

9.2.9. Modularitás (modularity)

Modularitás esetében azt vizsgáljuk, hogy az adott hálózaton belül mennyivel van több kapcsolat, mint amennyi hasonló karakterisztikákkal rendelkező hálózat esetében a véletlenszerűen létrejövő kapcsolatok esetében is várható lenne. Értékének maximuma 1, mely esetén a hálózatok tagjai tökéletesen elkülönülnek. Ha a modularitás értéke 0, a csúcspontok megfelelnek a véletlenszerű kapcsolódás elvének. A mutató minimuma -0,5, mely azt jelzi, hogy a kapcsolatok száma a véletlenszerűen várható értéktől is alacsonyabbak (Clauset et al., 2004). Ha figyelembe vesszük a kapcsolatok tényleges sűrűségét egy hálózatban, akkor annak lényegesen nagyobbak kell lennie, mint az általunk várt sűrűség, ha a hálózatban lévő kapcsolatok véletlenszerű folyamat eredményeként jönnének létre Estrada (2012).

9.2.10. Sajátvektor központiség (eigenvector centrality)

Sajátvektor központiség esetében egy adott csúcspont kapcsolatainak számát viszonyítjuk az összes kapcsolathoz (Freeman et al., 1979). Számításának alapja az ún. Katz-index.

Definíció: a szereplők centralitása azon szereplők centralitásainak függvénye, akikkel kapcsolatban állnak.

Adott egy gráf A_{ij}^k szomszédsági mátrixa, ekkor az i -edik elem saját fokszám centralitása

$$c_i = \sum_j A_{ij}^k$$

Amennyiben a szomszédos csúcspontok minőségét is figyelembe vesszük, a sajátvektor centralitást a szomszédos csúcsok „minőségével” korigáljuk.

$$c = \left(\sum_{k=1}^{\infty} \alpha^{1-k} A^k \right)$$

Majd a szomszédsági mátrix spektrális dekompozíciójával írható fel a centralitási mutató.

$$A^k = \sum_{j=1}^n |\varphi_j\rangle\langle\varphi_j| \lambda_j^k$$

$$\mathbf{c} = \alpha \left(\sum_{j=1}^n \frac{\lambda_j}{\alpha - \lambda_j} |\varphi_j\rangle\langle\varphi_j| \right)$$

Ha $\alpha \rightarrow \lambda_1$ akkor megközelíti a szomszédsági mátrix legnagyobb sajátértékéhez tartozó sajátvektort, azaz $\lim_{\alpha \rightarrow \lambda_1} \mathbf{c} = \lambda_1$.

9.3. ALAPVETŐ GRÁFMODELLEK

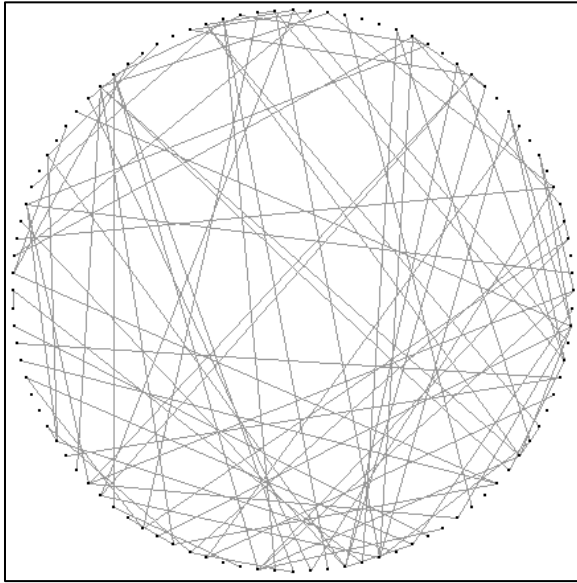
Ahhoz, hogy megértsük, hogyan épülnek fel a hálózatok, milyen tulajdonságokkal rendelkeznek, milyen részhalmozokra oszthatók és köztük milyen kapcsolatrendszerek állnak fenn, szükséges az alapvető gráfmodellek és struktúrák megismerése. Mindez a topológiai mérőszámok egyszerűbb értelmezését is segíti.

9.3.1. Erdős-Rényi modell

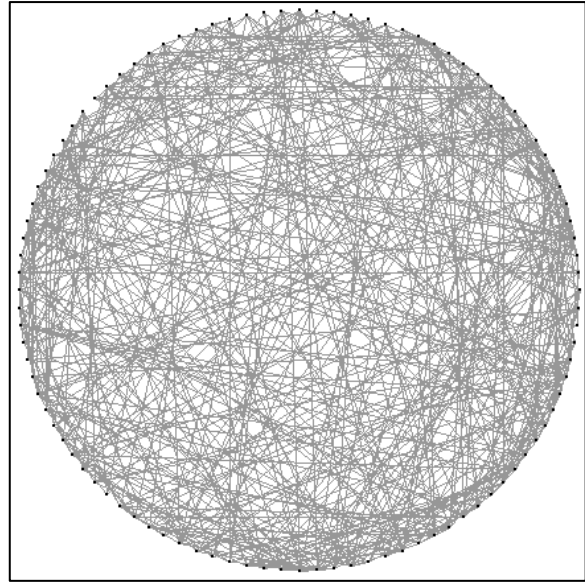
A gráfelmélettel foglalkozó tudományos munkákban több magyar vonatkozású név is megjelenik. Az egyik legfontosabb König Dénes és megjelent könyve, amely 1936-ban született meg *Theorie der endlichen und unendlichen Graphen: Kombinatorische Topologie der Streckenkomplexe* címmel (König, 1936). Erdős Pál és Rényi Alfréd, mint neves matematikusok, sokak számára ismertek lehetnek. Nevükhöz egy olyan hálózat megalkotása fűződik, melyet a mai napig alkalmazunk a valós hálózatok leírásához. Az általuk megalkotott véletlen hálózatok (Erdős & Rényi, 1959, 1960) olyan N elemszámú ponthalmazok, melyekben minden egyes elemet p valószínűséggel kapcsolunk össze. Korábban minden valós hálózatot véletlen hálózatnak tekintettek, a kapcsolatok kialakulását a véletlenszerű folyamatoknak tulajdonították. Ennek alapján egy $G_{(n,p)}$ gráfnak várhatóan $\binom{n}{2}p$ éle van az egyes pontok fokszámeloszlása pedig binomiális eloszlást követ, formálisan:

$$p(\text{deg}(v) = k) = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k}$$

9-1. ÁBRA: ERDŐS-RÉNYI VÉLETLEN GRÁFOK



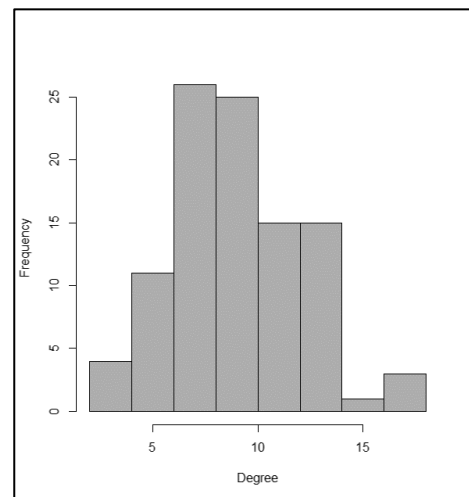
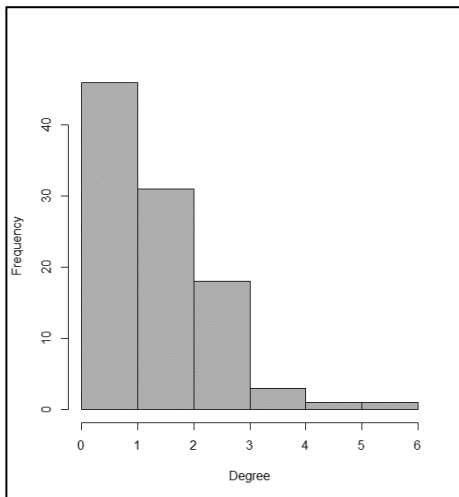
$N = 100; p = 0,02$



$N = 100; p = 0,1$

forrás: saját szerkesztés

9-2. ÁBRA: A FENTI GRÁFOK FOKSZÁMELOSZLÁSA

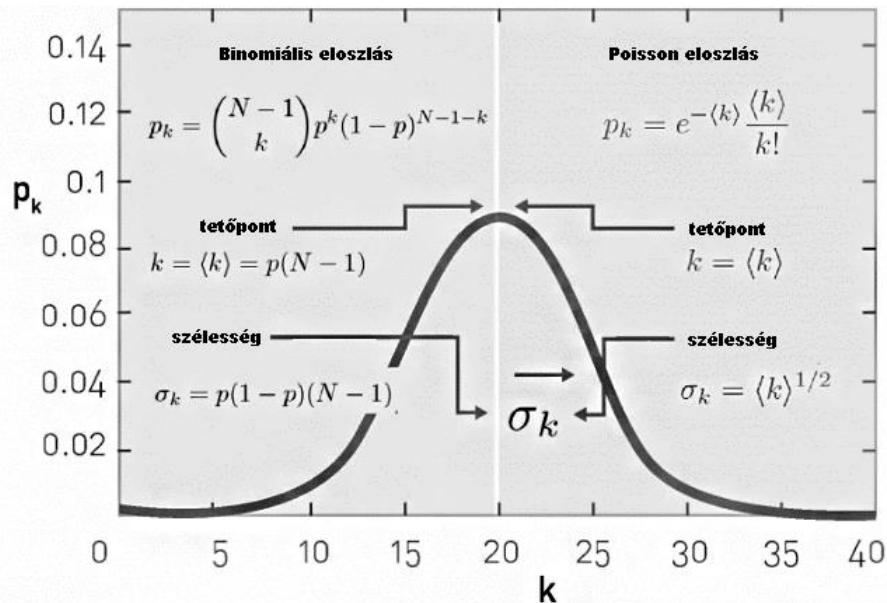


forrás: saját szerkesztés

A jobb oldali hálózat átlagos fokszáma 1.7, átlagos klaszterezettsége pedig 0.017, míg a bal oldali esetében ezek rendre 10 és 0.089. Az átlagos távolság 5.27 és 2.2, melyekkel értelemszerűen az átlagos útvonalhossz mindkét esetben megegyezik. A két gráf természetesen

nem izomorf. A hisztogram alapján az élek számának növekedésével a fokszámeloszlás binomiális eloszláshoz közelít. Ebben az esetben a szélsőséges fokszámértékek valószínűsége alacsony. Az Erdős-Rényi modell egy közeli változatát alkotta meg Gilbert (1959), aki az élek létrejöttének valószínűsége helyett egy előre meghatározott élmennyiség elosztásának valószínűségétől tette függővé egy hálózat létrejöttét.

9-3. ÁBRA: ELOSZLÁSFÜGGVÉNYEK



forrás: Barabási (2013) alapján saját szerkesztés

A skálafüggetlen hálózatok felfedezése óta kiemelt jelentőséggel bír, hogy egy hálózat fokszámeloszlásának tulajdonságait feltárjuk, mivel információval szolgálhat a hálózatban rejlő folyamatokról, elrendeződésekről (Barabási & Bonabeau, 2003; Hein et al., 2006). Binomiális eloszlás esetén véletlen hálózatról beszélünk, míg hatványfüggvény-eloszlás (power law) esetében skálafüggetlen tulajdonsággal bír a hálózat, ez utóbbi formálisan $P(K) \sim k^{-\gamma}$ (Barabási 2013). Ezzel szemben a hálózatok csak nagyon ritkán követik a fenti modellben leírt Erdős-Rényi féle véletlenszerű hálózatosodást és annak legtöbb tulajdonságát. Az élek egyforma valószínűségű létrejötte a gyakorlatban megfigyelt gráfok esetében igencsak valószínűtlen. Ugyanakkor az Erdős-Rényi gráfok átmérője $O(\log N_v)$ érték körüliek és klaszterezettsége sem tesz eleget a valós hálózatokban megfigyelt tulajdonságoknak, mivel a modelljükben a klaszterezettség N_v^{-1} érték körüli. A véletlen hálózatok egy valóságot jobban közelítő sémája az ún. Watts-Strogatz modell (Béta modellként is említik), amely kisvilág tulajdonságokkal rendelkező gráfot eredményez, rövid átlagos úthosszúsággal és magas klaszterezettséggel.

Ez sokkal inkább megfelel a valóságban megfigyelhető társadalmi hálózati szerveződésnek, a lokális csoportkialakulásoknak és a rövid elérési útvonalaknak⁴.

9.3.2. Watts-Strogatz modell

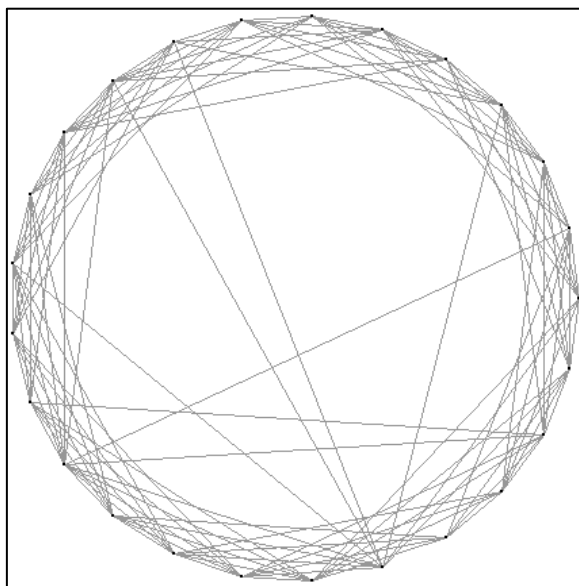
A Watts-Strogatz gráf (továbbiakban: WS) minden eleme része a hálózatnak, nincsenek különálló csúcspontjai.

A W-S modell alapja egy körgyűrű, melynek pontjait ezt követően mindkét irányban $\frac{k}{2}$ szomszédjaival kötünk össze. A béta modell elnevezés onnan ered, hogy a gráf kialakítása során, minden él nagyobb sorszámú végpontját β valószínűséggel cseréljük. Így kialakul egy kisvilág tulajdonsággal rendelkező hálózat, melynek $\beta = 0$ esetén az átlagos útvonalhossza $\frac{N}{2k}$, klaszterezettsége $\frac{3(k-2)}{4(k-1)}$, $\beta = 1$ esetén pedig rendre $\frac{\ln N}{\ln k}$ és $\frac{k}{N}$. Fokszámeloszlása $0 < \beta < 1$. Barrat and Weigt (2000) tanulmánya alapján:

$$p(k) \approx \sum_{n=0}^{f(k,K)} \binom{k}{\frac{k}{2} + n} (1 - \beta)^n \beta^{\frac{k}{2} - n} \frac{(\frac{\beta K}{2})^{k - \frac{k}{2} - n}}{(k - \frac{k}{2} - n)!} e^{-\frac{\beta K}{2}}$$

Ebből adódóan a hálózat topológiája viszonylag homogén, ennek eredményeképp a valós hálózatokhoz viszonyítva a fokszámeloszlás nem realiztikus. β növekedésével egy bizonyos pont után az átlagos útvonalhossz jelentősen lecsökken, magasabb β értéknél a klaszterezettség is erős csökkenésnek indul. A W-S modellel tehát egy kezdetleges gráfból az élek egy bizonyos valószínűség melletti átkötésével a kisvilág hálózatok jól közelíthetők. Hátránya azonban, hogy főként magasabb β értékek esetén a fokszámeloszlás Poisson-eloszlást követ. Kisvilág hálózatról beszélünk, ha a csúcsok számához viszonyítva az átlagos útvonalhosszúság alacsony.

⁴ Id. Bacon-szám (a színészek közös munkáján alapul), Erdős-szám (a tudományos munkák szerzőségi kapcsolathálózata alapján), 5 lépés távolság (a társadalmi kapcsolatokban)



forrás: saját szerkesztés

9.3.3. Barabási-Albert modell

A véletlen hálózatok és a skálafüggetlen hálózatok közti egyik leglényegibb különbség a „HUB”-ok megjelenése, melyek tulajdonképpen egyfajta centrumokat képeznek a hálózatokban. A skálafüggetlen elnevezés itt arra utal, hogy nincs egy jól megragadható központi szereplője, értéke (átlagos fokszám), ami jól leírná a hálózat struktúráját. Míg az Erdős-Rényi modell feltételezi, hogy egy véletlen hálózatban a csúcspontok száma állandó (N), addig a valós hálózatok esetében ez korántsem igaz. Az elemek folyamatosan változnak, rendszereik, kapcsolataik folyamatosan fejlődnek. Mégis elgondolkodtató azonban, hogy a több millió évvel ezelőtt létrejött kapcsolatrendszerek (fehérje-fehérje kölcsönhatások, kémiai reakciók stb.) és a fiatal hálózati rendszerek (internet, tudományos, színészi együttműködési kapcsolatok stb.) hasonló hálózati topológiával rendelkeznek (Barabási, 2013). Ezt a lényes tulajdonságot egy bibliai idézettel is jól meg lehet ragadni:

„Mert akinek van, annak adatik, és akinek nincs, attól az is elvétetik, amije van.”

(Márk evangéliuma 13.)

A gráfelmélet nyelvén mindez annyit jelent, hogy az újonnan belépő tagok – csúcspontok – lényegesen nagyobb valószínűséggel kapcsolódnak olyan, már a hálózat részét képező csúcspontokhoz, melyeknek nagyobb számú élkapcsolódásai vannak (társadalmi hálózatok esetében a baráti kapcsolatok hálózatában a közvetlen emberek). Ezt a folyamatot preferenciális

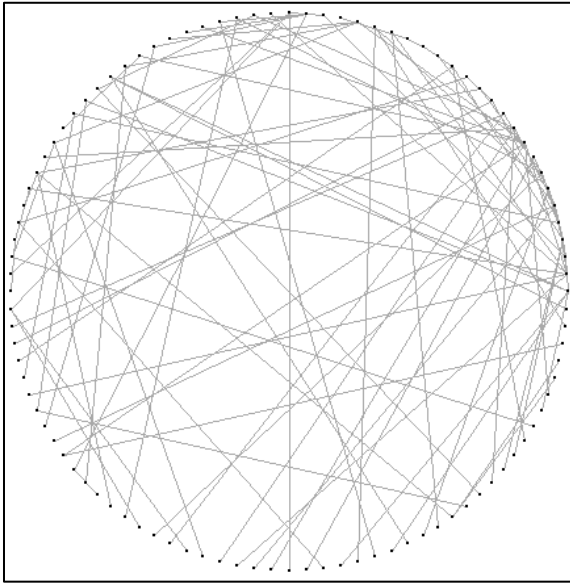
kapcsolódásnak is nevezzük. Az Erdős-Rényi modellben feltételeztük, hogy a csúcspontok véletlenszerűen kapcsolódnak más csúcspontokhoz, ami hamis képet rajzol a hálózatok ezen tulajdonságáról. Valóban léteznek olyan hálózatok, melyek például fokszámeloszlás tekintetében hasonlítanak az általuk leírt modellre (autópálya hálózat), azonban még ezek sem véletlenszerűen alakulnak ki, hiszen a gazdaságilag „preferált” területeken haladnak keresztül és a nagyobb jelentőségű területeken hoznak létre hub-okat.

A Barabási-Albert modellt a következőképpen definiálhatjuk: kiindulunk egy adott m_0 számú csúcspontból, és addig adunk tetszőlegesen a hálózathoz új éleket, amíg minden elem a hálózat tagjává nem válik (Barabási, 2013; Newman et al., 2011). A modellnek azonban alapvető hiányossága volt, hogy nem ad pontos instrukciót a kezdeti konfigurációhoz, valamint, hogy milyen módon rendeljük hozzá a kapcsolatokat az egyes csúcspontokhoz. Ezért Bollobás et al. (2011) további kiegészítéseket hajtott végre az alapmodellen. Ennek következtében a folyamat egy $G_1^{(0)}$ üres gráfban kezdődik. Ezt követően $G_1^{(t-1)}$ gráfból v_t és v_i csúcspontok közé élt illesztünk, létrehozva a $G_1^{(t)}$ gráfot, melyben a v_i csúcspont kiválasztásának valószínűségét az alábbiak szerint definiálhatjuk:

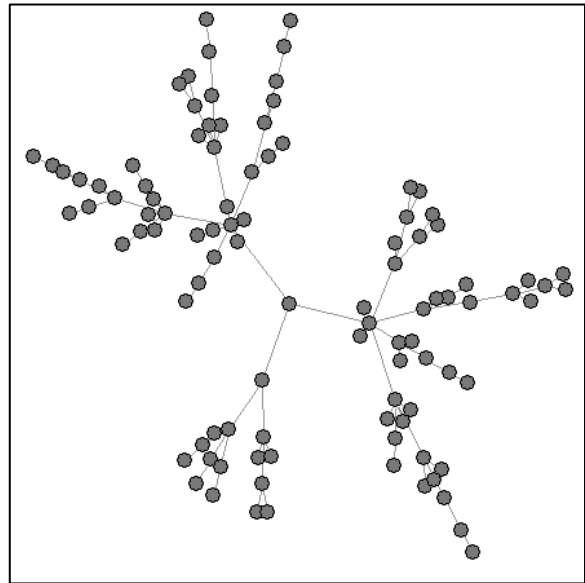
$$p = \begin{cases} \frac{k_i}{2t-1}, & \text{ha } 1 \leq i \leq t-1 \\ \frac{1}{2t-1}, & \text{ha } i = t \end{cases}$$

A fenti egyenlet értelmében v_t és v_i csúcspontok között $\frac{k_i}{2t-1}$ valószínűséggel jöhet létre kapcsolat, amely már v_t fokszámának mértékét emeli. Eredményeképp v_t azonban $\frac{1}{2t-1}$ valószínűséggel hurkot is alkothat a hálózaton belül, tehát a fenti feltétel megengedő az önhurok létrehozása tekintetében, ugyanakkor ezek száma $t \rightarrow \infty$ határérték mellett elhanyagolható.

9-2. ÁBRA: BARABÁSI-ALBERT HÁLÓZAT

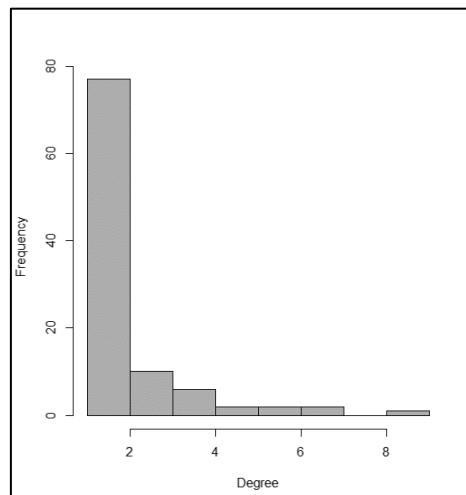


forrás: saját szerkesztés



A bal ábra első ránézésre úgy tűnhet, hogy nem teljes gráf, azonban nincs különálló csúcspontja, minden elem tagja a hálózatnak. Mindezek mellett a fokszámeloszlása is kisvilág tulajdonságra utal, hatványfüggvény eloszlást követ.

9-3. ÁBRA: BARABÁSI-ALBERT HÁLÓZAT FOKSZÁMELOSZLÁSA



forrás: saját szerkesztés

A véletlen hálózatokkal szemben a skálafüggetlen hálózatok jobban leírják a valós hálózatok tulajdonságait és egy veszélyre is felhívják a figyelmet. Ezek a hálózatok nagyon sérülékenyek lehetnek. A véletlen támadásokkal szemben (véletlenszerűen kiiktatunk egy-egy csúcspontot a

hálózatból) nagyon ellenállóak ezek a rendszerek. Abban az esetben viszont, ha direkt módon egy-egy nagyobb HUB-ot veszünk célba, gyorsan el tudjuk érni, hogy a hálózatunk szétessen. Ez a tulajdonság hívta fel a világ figyelmét arra, hogy az olyan rendszerek, melyek világunkat működtetik (internet, gazdaság, elektronikai eszközök, informatikai hálózatok) a véletlen meghibásodásokat szinte „meg sem érzik”, ezzel szemben egy közvetlen támadás a rendszer összeomlásához vezet. A 2001. szeptember 11-i terrortámadás során is a rendszer ezen tulajdonságára fókuszáltak a támadók. Megpróbálták az Egyesült Államok azon HUB-jait kiiktatni, melyek a teljes gazdasági rendszert és annak védelmét működtetik.

10. AZ ALAP LÁTHATÓSÁGI (VG) ÉS HORIZONTÁLIS LÁTHATÓSÁGI GRÁF (HVG)

Az idősorok összetett hálózattá alakítása lehetővé teszi a hálózat topológiai tulajdonságainak vizsgálatát a rendszer viselkedésének kikövetkeztetésére, amelyek nem minden esetben láthatók a nyes idősorokban. A láthatósági gráf (visibility graph) olyan idősorok vizsgálatára alkalmazható sikerrel, amelyek időben gyakori méréseket tartalmaznak, például tőzsdei árak és hozamok vizsgálatára, villamos energia és gázárak alakulásának leírására, légszennyezettségi adatok feltérképezésére és így tovább. A kulcstényező tehát a nagyszámú megfigyelés. A disszertációmban vizsgált idősorok is területenként 1 096 megfigyelést tartalmaz, melynek ciklikusságát, trendjeit stb. a hagyományos grafikus szemrevételezéssel még havi bontásban is nehéz lenne megvizsgálni. Mint látni fogjuk, a láthatósági gráf az idősor topológiai tulajdonságait „tapogatja” le. *Az eljárás előnye abban rejlik, hogy a sorozat idősorrendjét a csúcspontok sorrendjében tartja meg, bemutatva az eredeti idősor egyszerű geometriai szerkezetét* (Lacasa et al., 2008; Zhuang et al., 2014). A láthatósági gráf jól kiegészítheti a már jelenleg is alkalmazott idősorelemzési technikákat. Segítségével már a kutatás korai szakaszában összetettebb adatmanipuláció nélkül feltérképezhetővé válik az idősor szerkezete, mely a későbbi pontos, mélyebb adatelemzést is könnyebbé teheti.

A láthatósági gráf a hálózatelmélet és a statisztika egyik új, közös ága, amely komplex rendszereket ír le hálózati struktúrákká konvertálással és hálózati mutatószámok elemzésével. A gráf az idősor számos tulajdonságát örökli a belső adottságaiban (Lacasa et al., 2008; Lacasa et al., 2009; Xiao & Wang, 2014; Xu et al., 2008; Zhang & Small, 2006).

10.1. ALAP LÁTHATÓSÁGI GRÁF

Az eljárás során az idősort x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) egy gráfba konvertáljuk, ahol $G = \langle V, E \rangle$ melyben $V = \{v_i \mid i = 1, 2, \dots, N\}$ a csúcspontok halmaza, E pedig az élek paramétere. Ebben az esetben minden v_i az adott x_i érték csúcsa a létrehozott gráfban.

Első lépésben az x_t diszkrét idősort egy gráfba konvertáljuk, melyben minden időpontbeli megfigyelés egy csúcspontot jelent a hálózatban, majd a láthatósági kritérium alapján felépítjük a köztük lévő kapcsolatot.⁵

A láthatósági algoritmus az idősort $\{x_i\}_{i=1,\dots,N}$ gráffá alakítja $G = \langle V, E \rangle$, ahol $V = \{v_i\}_{i=1,\dots,N}$ a csúcsok halmaza, itt v_i csúcspont az eredeti idősor x_i adatpontjának megfelelő elem. $E = \{e_{ij}\}_{i=1,\dots,N}$ a gráf szomszédsági mátrixa, melynek elemei $e_{ij} = 1$, ha a következő feltétel teljesül:

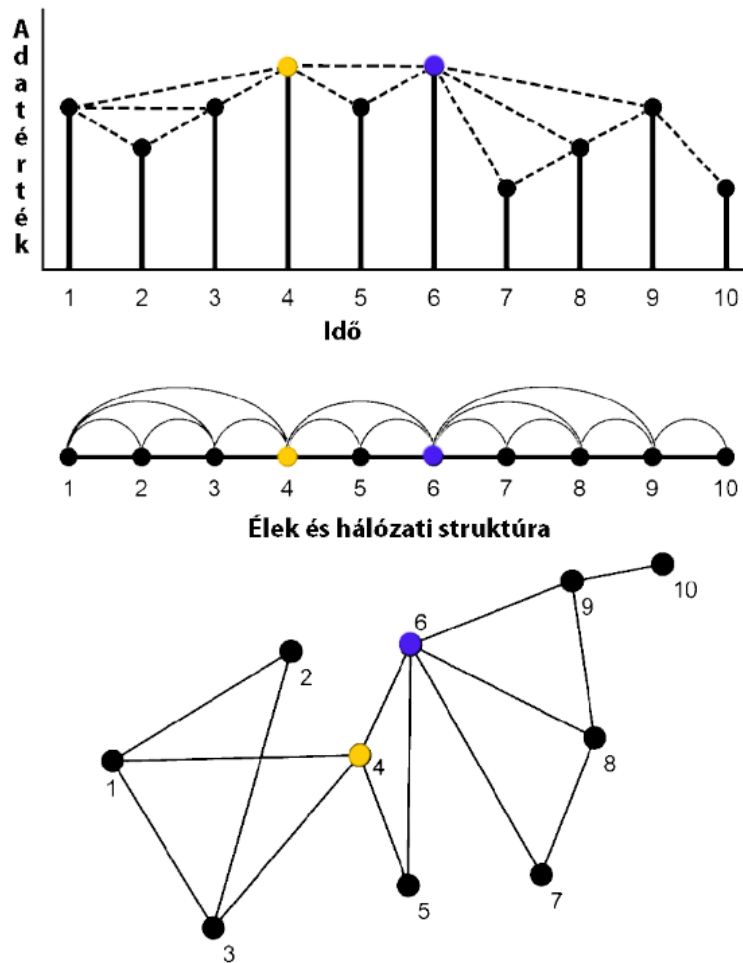
$$\frac{x_i - x_n}{i - n} > \frac{x_i - x_j}{i - j} \quad \forall n | i < n < j$$

minden más esetben $e_{ij} = 0$; tehát kapcsolat esetén a mátrix e_{ij} adat értéke 1, kapcsolat hiányában 0. Az n pedig az i és j közti időintervallum hossza. Egyszerűen fogalmazva, ha két adatpont egy szakadatlan egyenessel összeköthető az oszlopdigramban, akkor a hálózatban kapcsolat létesül közöttük. Amennyiben ezt az összekapcsolást egy köztes (magasabb) érték akadályozza a két érték között, a gráfban az él nem alakul ki (ld. 10-1 ábra).

Amint az látható, az idősor oszlopdigramjának (10-1 felső ábra) minden függőleges oszlopának magassága jelöli az egyes idősorok adatait, továbbá minden oszlop egy csúcspontot jelent az alsó ábra megfelelő grafikonján. Ennélfogva az alsó gráf két csúcspontja össze van kapcsolva, vagy kötést kell hozzáadni, ha a két adat között szakadatlan egyenes húzható felső diagramon.

⁵ Pár mondatban összefoglalva tehát, a láthatósági gráf eljárást úgy kell elképzelni, hogy az idősorok minden egyes rekordját oszlopdigramon ábrázoljuk, majd gondoljunk minden oszlopra egy-egy magas épületként. Amennyiben az egyik ilyen „épület” tetejére kiállunk, mely másik „épületeket” láthatjuk onnan egy kétdimenziós térben? Visszatérve az eredeti gondolatmenethez, ettől fogva azokat az időpontokat, melyek egymás számára láthatóak, tehát közéjük folytonos egyenes vonal húzható, összekapcsoljuk. Ők egy éllel összekapcsolt pontpárt alkotnak a létrejövő gráfban. Minden időszori megfigyelési érték a létrejövő hálózatban egy-egy csúcspontként jelenik meg.

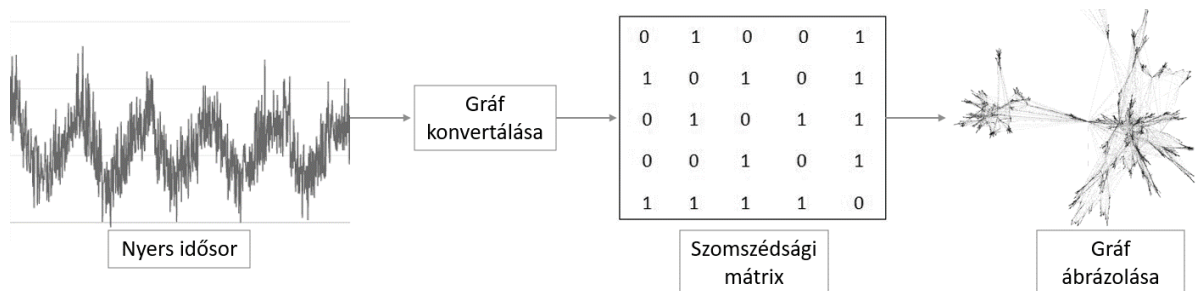
10-1. ÁBRA: AZ ALAP LÁTHATÓSÁGI GRÁF KIALAKÍTÁSÁNAK LÉPÉSEI



forrás: (Lacasa et al., 2008; Chowdhuri et al. 2021; Iacobello et al. 2021) munkája alapján

A kapott hálózatok alapján létrehozhatjuk a szomszédsági mátrixokat a megfelelő idősorokhoz vagy láthatósági gráfokhoz, majd a hálózattudomány módszereit és mutatószámait alkalmazhatjuk az idősorok adatainak elemzésére.

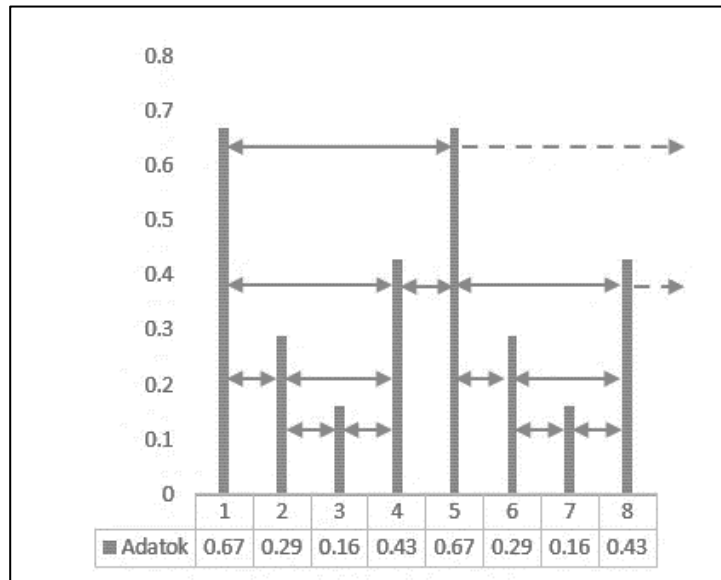
10-2. ÁBRA: AZ IDŐSOR GRÁFFÁ KONVERTÁLÁSÁNAK LÉPÉSEI



forrás: saját szerkesztés

A láthatósági gráfnak van még egy speciális formája, a *horizontális láthatósági gráf* (HVG). A vízszintes láthatósági gráfok (HVG) egyszerűbb algoritmussal rendelkeznek a láthatóság meghatározásához. Ennek grafikus ábrázolása a következő.

10-3. ÁBRA: A HORIZONTÁLIS LÁTHATÓSÁGI GRÁF



Forrás: saját szerkesztés

Geometriai leírása:

$\{i, j\} \in E(G)$ akkor és csakis akkor, ha $x_i, x_j > x_n$ minden n esetén, ha $i < n < j$.

Mivel a horizontális láthatósági gráf geometriai értelemben egyszerűbb, mint az alap láthatósági gráf (VG), ezért a HVG csúcspontjainak száma kisebb lesz, mint VG csúcspontjainak száma. Ennek következtében HVG nem más, mint VG egy részgráfja. Egy idősor láthatósági (VG), vagy horizontális láthatósági gráffá (HVG) történő átalakítása ily módon bizonyos értelemben invariáns, mégpedig VG affin transzformáció alatt, míg HVG monoton transzformáció alatt invariáns (Hasson et al., 2018). Látható, hogy a gráf magas fokszámú csúcspontjai, azaz a leginkább összekapcsolt csúcspontok a legnagyobb értékű adatokat reprezentálják az eredeti idősorból, azaz a sorozat globális és lokális maximumai. Ez a megállapítás a horizontális láthatósági gráfok esetén is kivétel nélkül fennáll (Zhang & Small, 2006) A gazdasági idősorok gráffá történő konvertálása elkerülhetetlenül adatvesztéssel is jár, azonban újabb mutatók bevezetését is lehetővé teszi (Zhang et al., 2007; Zhang & Small, 2006).

10.1.1. Adatmagasság, mint befolyásoló tényező

Érdeemes megvizsgálni, hogy egy idősor adatmagassága miként befolyásolja a gráfá alakított adathalmazban a foks számok alakulását. Ennek érdekében szükséges definiálni $P(k|x)$ értékét, mint feltételes valószínűségét annak, hogy egy adott csúcspont éppen k foks számmal rendelkezik, miközben magassága éppen x . Ezek alapján:

$$P(k|x) = \sum_{j=0}^{k-2} \frac{-1^{k-2}}{j! (k-2-j)!} [1 - F(x)]^2 \{[1 - F(x)]^{k-2}\}$$

Az egyenletből látható, hogy $\sum_{k=2}^{\infty} P(k|x) = 1$ bármekkora értéket is vesz fel x . Most már meghatározható egy adathoz tartozó csúcspont fokának átlagos értéke, amely az x magasságú csúcsponthoz tartozik:

$$K(x) = \sum_{k=2}^{\infty} kP(k|x) = 2 - 2\ln [1 - F(x)]$$

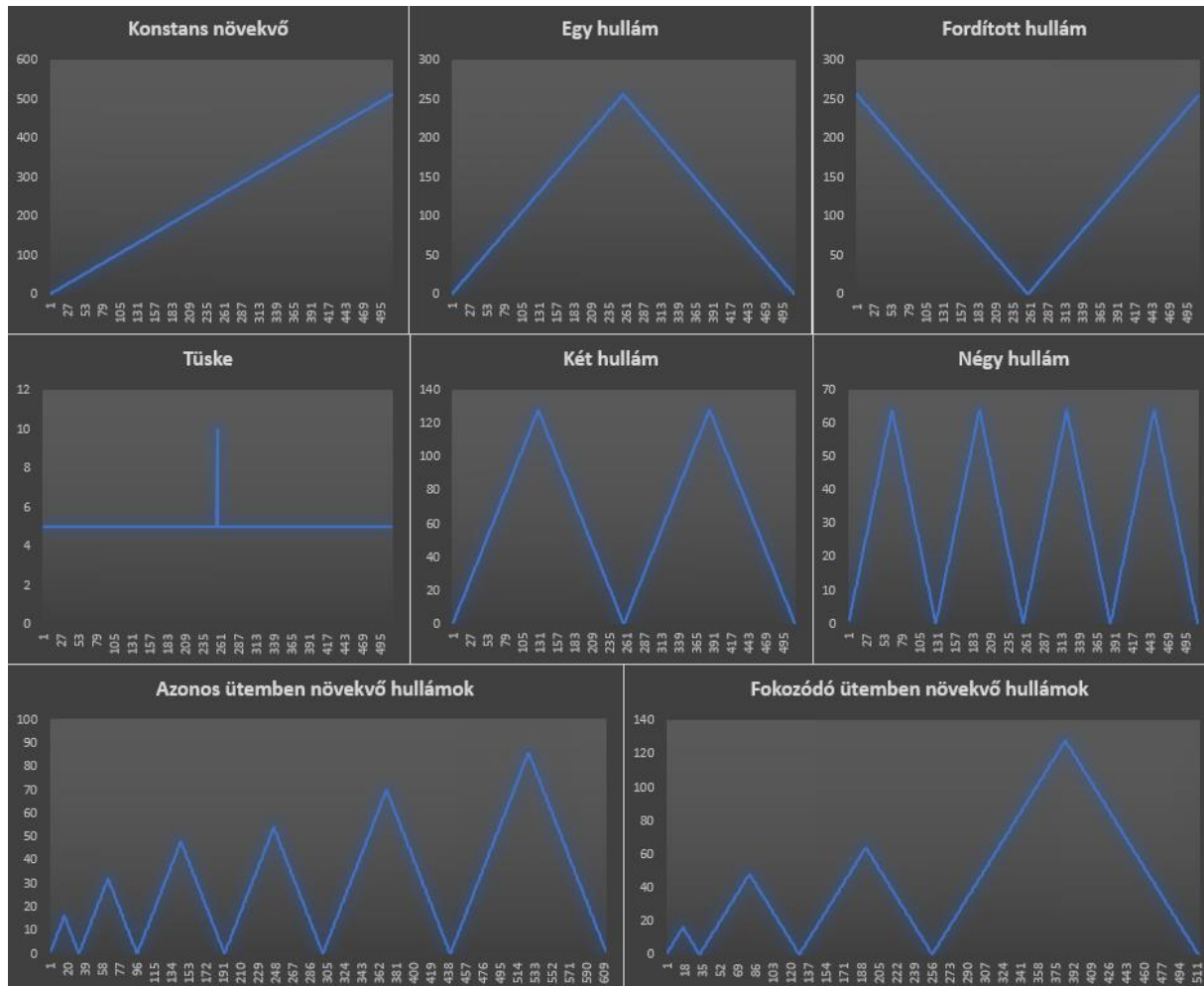
Mivel $F(x) \in [0,1]$ és $\ln(x)$ monoton növekszik, ezért $K(x)$ is monoton növekvő lesz. Fontosnak tartom azonban megjegyezni, hogy az áramtőzsde idősorát tekintve az ártüskéről nem feltétlenül beszélhetünk outlier adatként, hiszen, ha részletesen megvizsgáljuk az idősor eloszlását, akkor jól látható, hogy ezek a látszólag kiugróan magas értékek az eloszlásfüggvény vastagfarkúságából erednek.

Az áramtőzsdén, a pénzpiaccal ellentétben a hozam korlátozottan értelmezhető. Egy részvénnyel való kereskedés során egy adott vállalat részvényét t napon megvásárolhatom és egy bizonyos áron el tudom adni a $t + 1$ -edik napon vagy lényegesen később. Ilyenkor ugyanazon részvény két időpontbeli árkülönbsége adja a pozitív vagy negatív profitot (hozamot). A villamos energia esetében azonban ez nem ilyen egyszerű. Az első nehézség a termék tárolhatatlanságából adódik. Az az árammennyiség, amit tegnap megvásároltam, ma már nem áll rendelkezésre, hiszen szinte azonnal felhasználásra került. Ebből adódik, hogy a mai napon megvásárolt áram „új” terméknek minősül, hiszen a tegnapit már felhasználtam.

10.2. MODELL IDŐSOROK ÉS TESZTELÉSÜK LÁTHATÓSÁGI GRÁFELEMZÉSSEL

Annak érdekében, hogy a valóságot leíró piaci idősorokból létrehozott gráfokat érdemben értelmezni tudjam, szükség van a normál piaci szituációk leírására talán kevésbé megfelelő, ám lényegesen egyszerűbb modell idősorokon való tesztelésére. Ez segít a későbbiekben kapott topológiai mutatószámok értelmezésében. Ilyen elméleti idősorokat tartalmaz az 10-4. ábra.

10-4. ÁBRA: ELMÉLETI IDŐSOROK



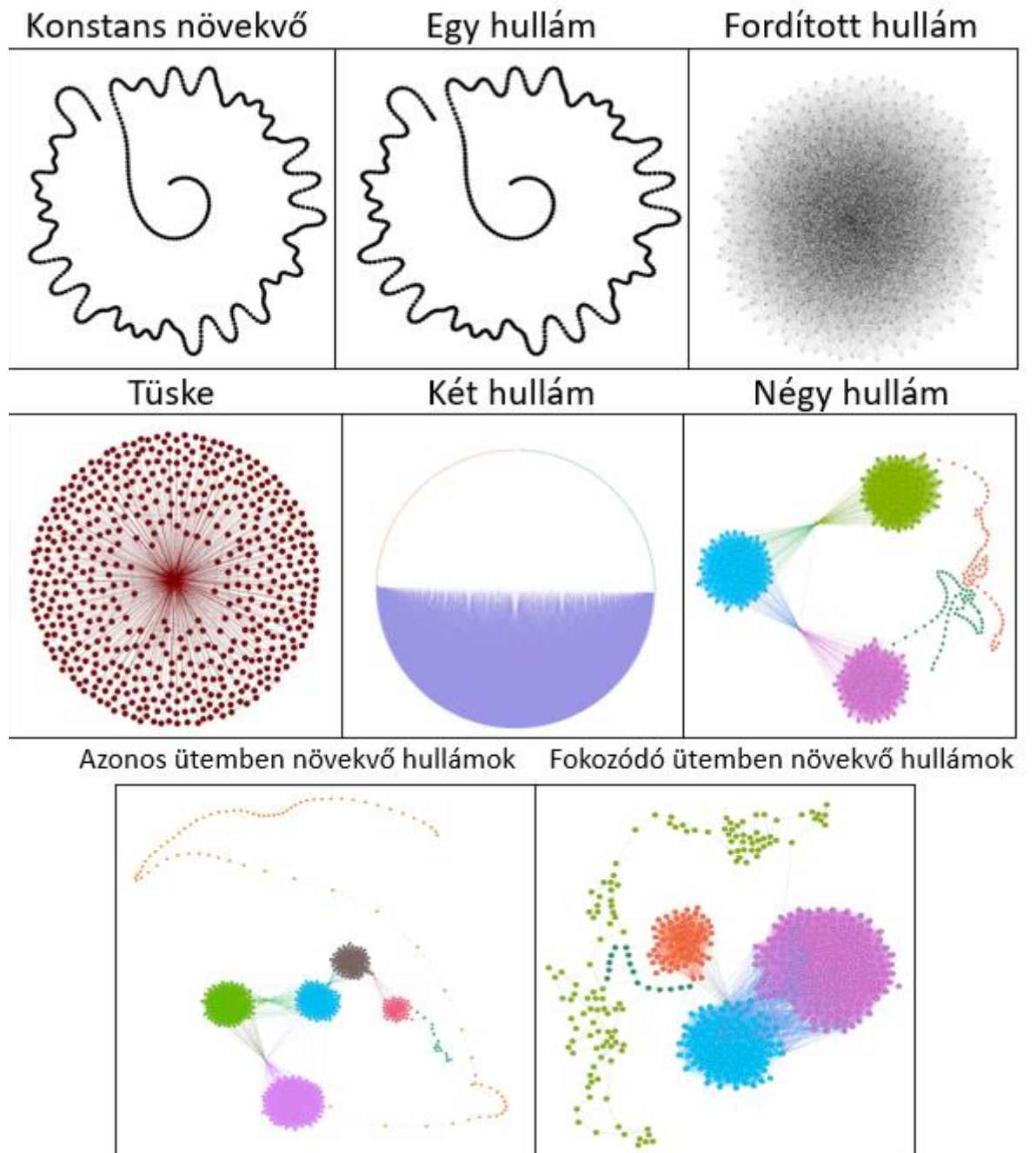
Minden idősor (a 7. kivételével) $n = 512$ elemet tartalmaz!

forrás: saját szerkesztés

Az első (konstans növekvő) idősor $t_n = t_{n-1} + 1$ ütemben növekszik $[1; 512]$ intervallumban. A gráf fájtörténet alakítás során azt az eredményt kaptam, hogy a láthatósági gráfjának topológiája teljes mértékben megegyezik a konstans függvény láthatósági gráfjával. Ugyan erre az eredményre jutottam a második idősor kapcsán is, amely ugyanebben az ütemben emelkedik, majd azonos $t_n = t_{n-1} - 1$ mértékben csökken vissza a kiindulási értékig. Ezeknek a soroknak a gráfja egy egyszerű hierarchikus (fa-) struktúra, melynek az első és utolsó pontja kivételével mindegyik pontja a vele szomszédos adatpontokkal áll kapcsolatban. Értelemszerűen az első

pont a tőle jobbra, míg az utolsó a tőle balra elhelyezkedő időpont gráfbeli csúcspontjával áll kapcsolatban. Így a hálózat 512 pontból és 511 élből áll. Ebből adódik, hogy a hálózatok átlagos fokszáma 1.99, átmérője 511, a minimális feszítőfa 511 pontot érint és egyetlen klasztert találunk, mely a teljes gráf maga. Mindkét gráf modularitása 0.91. Ezt a gráfípust egyszerű lánc alakzatban is ábrázoltam, melyet az összes idősorral együtt a 10-5. ábra mutat be.

10-5. ÁBRA: AZ IDŐSOROK GRÁFALAKJAI

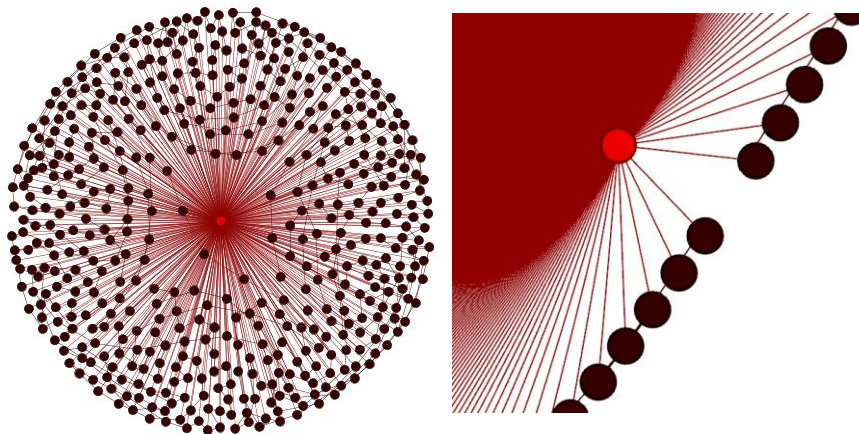


forrás: saját szerkesztés

A harmadik ábrán a második idősor inverze látható. A gráf ugyancsak 512 csúcsponot tartalmaz, ám ezek mindegyike kapcsolatban áll a vele szemben lévő oldal összes tagjával, saját oldalán pedig két közvetlen szomszédjával, így 65 791 él szeli a gráfot. A hálózat átlagos fokszáma 256, átmérője 2, a minimális feszítőfa pedig értelemszerűen 512. Klaszterek tekintetében ugyancsak egy klasztert alkot a teljes gráf. A hálózat modularitása 0.005, tehát szinte véletlen gráf struktúrával rendelkezik, míg az előző két eset ezzel teljesen ellentétes felépítésű.

Lényegesen érdekesebb a negyedik, „ártüskét” ábrázoló idősor gráfja. Ebben az esetben a tüske osztópontként működik a hálózatban. A tuskétól balra és jobbra található szakaszok szomszédsági mátrixa – amennyiben a tüske törlésre kerül a gráfból – megegyezik a konstans idősorból kapott eredményekével, tehát minden pont csak a közvetlen szomszédjával áll kapcsolatban. Amikor a tüske megjelenik, az előbbi struktúra megmarad, azonban minden pont egy plusz éllel gyarapodik, mely a tuskével kapcsolja őt össze. A bal, illetve jobb oldali szakaszok között azonban csak a tuskén keresztül lehet közlekedni. A modularitásának mértéke 0.35.

10-6. ÁBRA: AZ ÁRTÜSKE GRÁFJA ÉS BELSŐ STRUKTÚRÁJA



forrás: saját szerkesztés

Ennek eredményeképp az 512 pontot tartalmazó gráf 1 020 élet tartalmaz, melynek átlagos fokszáma 3.99, átmérője 2, valamint a gráf most már 2 klasztert tartalmaz. Ez a két klaszter különíti el az idősor jobb és bal szakaszát. A minimális feszítőfa azonban a korábbiakkal azonos.

6. TÁBLÁZAT: AZ ELMÉLETI IDŐSOROK GRÁFJAINAK TOPOLOGIAI MÉRŐSZÁMAI

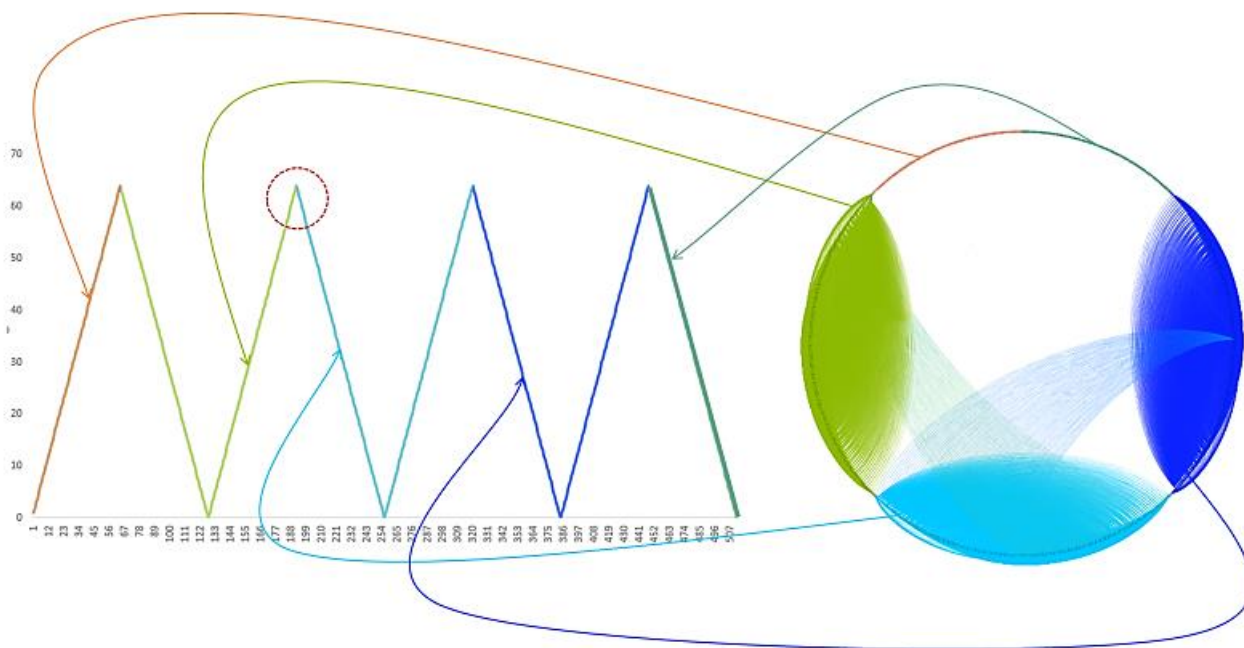
| | <i>Konstans</i> | <i>Egy hullám</i> | <i>Fordított hullám</i> | <i>Tüske</i> | <i>Két hullám</i> | <i>Négy hullám</i> | <i>Azonos ütemben növekvő hullám</i> | <i>Fokozódó ütemben növekvő hullám</i> |
|-------------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------------|--------------|-------------------|--------------------|--------------------------------------|--|
| <i>Élek</i> | ↓ 511 | ↓ 511 | ↑ 65 791 | ↓ 1 020 | ↔ 16 893 | ↓ 12 799 | ↔ 15 091 | ↓ 12 957 |
| <i>Átlagos fokszám</i> | ↓ 1.99 | ↓ 1.99 | ↑ 256 | ↓ 3.98 | ↔ 65.9 | ↓ 49.99 | ↓ 49.39 | ↓ 50.613 |
| <i>Átmérő</i> | ↑ 511 | ↑ 511 | ↓ 2 | ↓ 2 | ↔ 256 | ↔ 130 | ↓ 103 | ↔ 145 |
| <i>Átlagos úthossz</i> | ↑ 171 | ↑ 171 | ↓ 1.49707 | ↓ 1.9922 | ↔ 54.684 | ↓ 17.245 | ↓ 14.007 | ↓ 29.4200709 |
| <i>Sűrűség</i> | ↓ 0.004 | ↓ 0.004 | ↔ 0.053 | ↓ 0.008 | ↑ 0.129 | ↔ 0.098 | ↔ 0.081 | ↔ 0.099 |
| <i>Modularitás</i> | ↑ 0.91 | ↑ 0.91 | ↓ 0.006 | ↔ 0.354 | ↓ 0.03 | ↔ 0.663 | ↔ 0.705 | ↔ 0.449 |
| <i>Klaszterek száma</i> | ↓ 1 | ↓ 1 | ↓ 1 | ↓ 2 | ↔ 3 | ↔ 5 | ↑ 7 | ↔ 5 |
| <i>Klaszterezettségi együttható</i> | ↓ 0 | ↓ 0 | ↓ 0.025 | ↑ 0.668 | ↓ 0.02467 | ↓ 0.072 | ↓ 0.103 | ↓ 0.08646809 |
| <i>Sajátvektor centralitás</i> | ↓ 0.00334 | ↓ 0.0033 | ↓ 8.31E-07 | ↓ 0.0108 | ↓ 4.22E-04 | ↓ 0.007 | ↑ 0.1638 | ↔ 0.074668 |
| <i>Minimális feszítőfa</i> | ↑ 511 | ↑ 511 | ↑ 511 | ↑ 511 | ↑ 511 | ↑ 511 | - | ↑ 511 |

forrás: saját szerkesztés

A következő generált idősor, amelynek gráfja érdekes esetre világít rá, a két hullámot ábrázoló sorozat. Ebben az esetben egy kezdeti felfutást követően az idősor leszálló ágba fordul, majd ugyanez ismétlődik. A folyamat olyan topológiát idéz elő, melyet az egy hullámmal rendelkező sorozat nem fedett fel. Az egyes „időszakok” a hálózati szerkezetben külön klaszterekben csoportosulnak és különülnek el egymástól. E gráf klasztereinek száma három, amely a kezdeti felszálló, a végső hanyatló, valamint a köztes – két csúcs közötti – időszakokból tevődik össze. Természetesen joggal tehető fel a kérdés, hogy egy hanyatló, majd újabb felszállóágat tartalmazó időszak miért kerül egy klaszterbe? Erre egy másik kérdéssel lehet a legjobban felelni: Milyen piaci folyamatok zajlottak le a két kiemelkedő csúcs által lehatárolt időintervallumban? Egyrészt belátható, hogy az eljárásnak vannak bizonyos alkalmazási korlátjai,⁶ másrészt a válasz attól is függ, milyen perspektívából tekintünk a vizsgált idősora. A klaszterek kialakulásának folyamatát szemlélteti a 10-7. ábra.

⁶ Melyek természetesen a későbbi kutatások alkalmával és programozási finomításokkal kiküszöbölhetők, korrigálhatóvá válhatnak az adott idősor szerkezetétől függően.

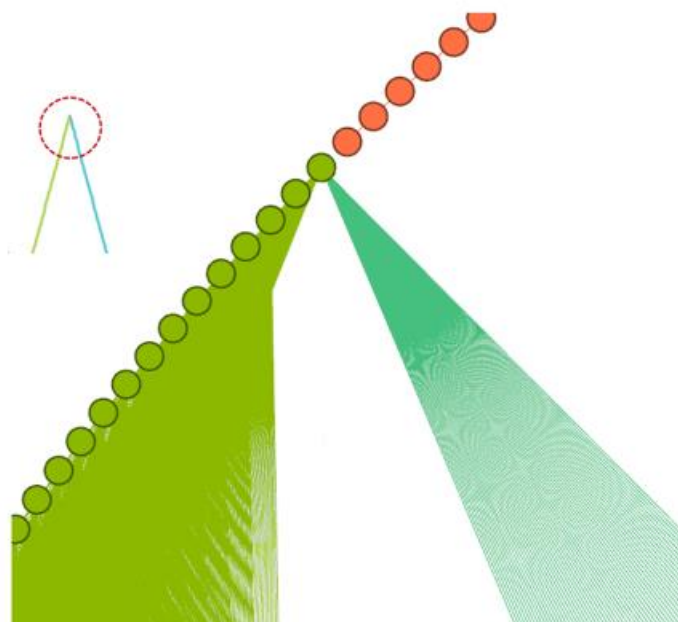
10-7. ÁBRA: A KLASZTEREK KIALAKULÁSÁNAK GRAFIKUS BEMUTATÁSA



forrás: saját szerkesztés

Jól látható tehát, hogy két csúcsidőszak közötti időszakok képeznek egy-egy klasztert a gráfban. Vannak azonban átfedések és szakadások a klaszterek között, melyet a 10-8. ábra szemléltet.

10-8. ÁBRA: ÁTFEDÉSEK ÉS SZAKADÁSOK A KLASZTEREK KÖZÖTT



forrás: saját szerkesztés

Az ábrán megfigyelhető, hogy elkülönül egy világoszöld klaszter, amely nem áll kapcsolatban a narancssárga klaszterrel, melynek oka a konstans idősorból generált gráf struktúrájára vezethető vissza. Másrészt a világoszöld klaszter egy csúcspontja – mely az idősorban a második hullám csúcsidezési adata, kapcsolatban áll a következő időszak felszálló ágával. Ez arra enged következtetni, hogy az idősor memóriával rendelkezik, tehát a korábbi gyors felfutási időszak hatással van a későbbi gyors felfutású időszakra. *Ez az áramtözdék esetén a korábbi piaci szerkezetből, információkból adódó magatartásként, előzetes várakozásként is értelmezhető.* Egy korábban hirtelen, magas növekedést produkáló időszak eredményeképp a piaci befektetők egy újabb hasonló időszakra számíthatnak, amely további hajtóerőként hathat a piaci árakra. Hasonló, visszatekintő folyamat figyelhető meg az 10-8. ábrán a sötétkéssel jelölt szakaszban, amely azonban a hanyatló ággal áll kapcsolatban. A négy hullámból álló idősor esetében az öt, azonos logikával levezethető klaszter ugyancsak tökéletesen elkülönül.

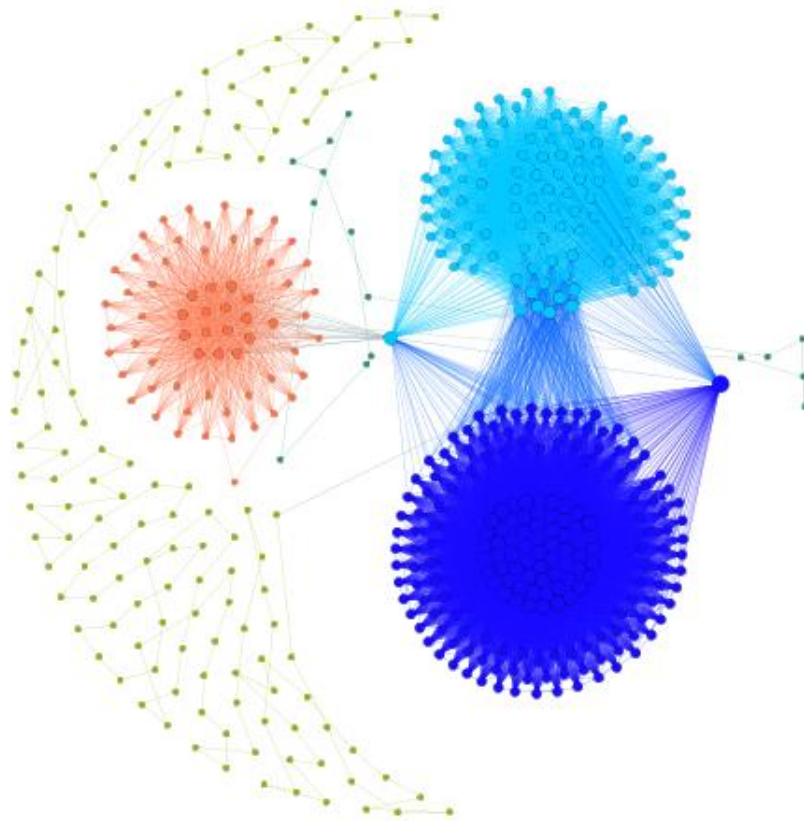
E folyamat folytatásaként következik a növekvő hullámzást ábrázoló grafikon. Az első esetben, amikor a hullámzás egyenlő mértékben emelkedik, a hét klaszter ugyancsak elkülönül egymástól, azzal a különbséggel, hogy a növekvő csúcspontok „rálátanak” a korábbi csúcsidezésekre és az azokat érintő időben közeli adatpontokra. Ez egyrészt a hálózatban – a négy azonos hullámot tartalmazó idősorral összevetve – számlálható élek számának emelkedését eredményezi, másrészt piaci elemzési szempontból azt is jelentheti, hogy a vizsgált gazdasági terület adataiban az idő előrehaladtával újabb globális maximumok várhatók.

Továbbá, az élek számát tekintve az figyelhető meg, hogy a növekvő léptékben emelkedő idősor gráfjának fokszáma és klaszterezettsége is alacsonyabb az egyenlő mértékben emelkedő idősor gráfjájénál. Ennek feltehetően az a kiváltó oka, hogy egy hosszabb, valós piaci idősor esetében ezek a hullámzások egy hosszabb időszak volatilis emelkedésének szakaszát írják le. Érthető mindez úgy is, mintha mindössze kiragadtam volna egy felszálló időszakot egy később zuhanó tendenciát mutató idősor grafikonjából. Ezen idősor klaszterezettsége is alacsonyabb, hiszen az algoritmus is egyfajta emelkedést mutató piaci időszakként kezeli ezt a szakaszt. Mivel az idősor autokorrelációja is magasabb, ezért a hosszabb „visszatekintés” miatt a hálózat átmérője és átlagos útvonalhossza is csökken.⁷ Ezen idősor gráfjának klaszterek szerinti elrendeződését szemlélteti az 10-9. ábra. Látható, hogy a növekvő hullámzás egyre nagyobb hálózati klasztereket eredményez, ami segíthet egy időszak hosszának grafikus értelmezésében is.

⁷ Ez utóbbiak értelmezése a konstans és az azzal azonos topológiát mutató gráfoknál nem volt célravezető, mivel ezek is csupán egy részidőszak gráfjai lehetnének.

A fejezetben tárgyalt idősorok természetesen egyszerű vonaldiagramként való szemrevételezéssel is könnyedén vizsgálhatóak lettek volna. A fejezet célja azonban az idősorok gráffá történő átalakításának és topológiai mérőszámainak könnyebb értelmezését segíti elő. Egy hosszú, számos elkülönülő időszakot ábrázoló, sűrű, volatilis idősornak (ld. később 10-16. ábra) az elemzése már korántsem lenne ilyen egyszerű feladat, melynek esetében viszont lényegesen megkönnyítheti a kutató dolgát az értekezésemben tárgyalt módszertan alkalmazása.

10-9. ÁBRA: AZ EMELKEDŐ ÜTEMBEN NÖVEKVŐ IDŐSOR LÁTHATÓSÁGI GRÁFJÁNAK KLASZTEREZETTSÉGI TOPOLOGIÁJA



forrás: saját szerkesztés

10.3. EREDMÉNYEK

Az elméleti tesztidősorok eredményei alapján már körvonalazódni látszik, hogy a láthatósági gráf eljárás legfőképp az idősorok trendjének, ciklusainak azonosításában lehet a kutatók segítségére. A rövidebb szakaszok még inkább nehezen detektálhatók egy magas frekvenciájú, hosszú idősorban. Ennek grafikus feltérképezésében rejlik a módszertan egyik erőssége. Az árkilengéseket és a völgyidőszakokat reprezentáló idősorok rávilágítanak, hogy a fokszámmérőszámok (átlagos foksám, foksámeloszlás) a globális és lokális maximumértékek felderítésében játszanak szerepet. A gyakorlatban számos esetben szükséges az idősorok szakaszolása annak érdekében, hogy különböző függvényeket illeszthessünk az idősorra annak előrejelzése érdekében. Emellett a ciklusok azonosítása segít feltárni a vizsgált idősorra ható gazdasági tényezőket is. Ennek kapcsán, a következő, az eredményeket tárgyaló szakaszban arra keresem a választ, hogy milyen mértékben alkalmazható a láthatósági gráf eljárás a vizsgált áramtőzsdei adatok ciklusainak azonosítására és a területi különbségek feltárására.

10.3.1. Hálózati topológia és területi különbségek

A 7. táblázat az idősorokból algoritmussal létrehozott láthatósági gráfok topológiai mérőszámait mutatja az előző fejezetben bemutatott módszertan alapján.

7. TÁBLÁZAT: AZ ÁRAMTŐZSDE IDŐSORAIBÓL LÉTREHOZOTT GRÁFOK TOPOLÓGIÁI

| | HU | SK | CZ | RO | AU | DE | FR | SP | SLO | IT | Brown mozgás |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|--------------|
| Élek | ↑ 4 541 | ↔ 4 271 | ↔ 4 189 | ↑ 4 583 | ↑ 4 541 | ↑ 4 541 | ↑ 4 815 | → 4 150 | ↔ 4 270 | ↔ 4 207 | ↓ 3 228 |
| Átlagos foksám | ↑ 8.286 | ↔ 7.794 | ↔ 7.644 | ↑ 8.363 | ↑ 8.286 | ↑ 8.286 | ↑ 8.786 | → 7.573 | ↔ 7.792 | ↔ 7.677 | ↓ 5.891 |
| Átmérő | → 10 | ↓ 9 | → 10 | → 10 | → 10 | → 10 | → 10 | ↑ 11 | ↓ 9 | ↓ 9 | → 10 |
| Átlagos úthossz | ↔ 4.651 | ↔ 4.652 | ↔ 4.938 | ↔ 4.52 | → 4.729 | → 4.758 | ↓ 4.282 | ↑ 5.29 | ↓ 4.467 | ↓ 4.412 | ↑ 5.137 |
| Sűrűség | ↑ 0.0076 | ↔ 0.0071 | → 0.0069 | ↑ 0.0076 | ↑ 0.0076 | ↑ 0.0076 | ↑ 0.008 | → 0.0069 | ↔ 0.0071 | ↔ 0.007 | ↓ 0.0054 |
| Modularitás | ↔ 0.785 | ↔ 0.783 | ↔ 0.78 | ↔ 0.778 | ↓ 0.737 | ↓ 0.738 | ↓ 0.748 | → 0.802 | ↔ 0.822 | ↔ 0.815 | ↑ 0.861 |
| Klaszterek száma | ↔ 15 | ↓ 13 | ↑ 19 | ↓ 14 | ↔ 18 | ↑ 20 | ↔ 15 | ↓ 14 | ↓ 14 | ↓ 14 | → 16 |
| Klaszterezettségi együttható | → 0.736 | ↔ 0.731 | ↔ 0.731 | → 0.737 | ↓ 0.72 | ↓ 0.719 | ↔ 0.727 | → 0.738 | ↔ 0.746 | ↑ 0.748 | ↑ 0.753 |
| Sajátvektor centralitás | ↔ 0.05 | ↔ 0.054 | ↔ 0.05 | ↓ 0.045 | → 0.059 | → 0.064 | ↓ 0.036 | ↑ 0.091 | → 0.067 | ↔ 0.077 | → 0.06 |

forrás: saját számítások

Az algoritmust módosítottam oly módon, hogy annak outputja nem egy szomszédsági mátrixként jelenik meg, hanem egy ún. forrás-cél táblázatként a könnyebb kezelhetőség érdekében. A kimeneti forrás-cél táblázat a szomszédsági mátrixszal ellentétben mindössze két oszlopból álló táblázat, az első oszlop a hálózatban megfigyelhető él kiindulópontja, a célérték

pedig az adott él végpontját jelöli. Ez leginkább informatikai szempontból előnyös, mivel egy szomszédsági mátrix országonként akár 1 300 000 cellát is tartalmazhat, ami a szoftveres feldolgozás során erőforrásigényes. A forrás cél táblázatban ennél egyszerűbb szerkezeti leképezése jelenik meg a hálózatnak. Ebben az adathalmazban minden egyes időszori megfigyeléshez egy ID azonosítót rendeltem és ezen azonosítók mentén került listázásra, hogy az egyes napok megfigyelései, mely más napok megfigyelési értékeivel állnak kapcsolatban. Egyszerű példával illusztrálva, ha az első nap adata az idősorban az öt követő négy nap adatával kapcsolható össze a láthatósági kritérium alapján, akkor a forrás cél táblázat az alábbi módon kezdődik: [1-2; 1-3; 1-4; 1-5;2-3;3-4;4-5]. A példában szereplő utolsó három rekord pedig abból adódik, hogy az egyes megfigyelések az idősorban a láthatósági kritérium alapján a közvetlen szomszédjaikkal mindig kapcsolatban állnak. Ezzel az egyszerűsítéssel lényegesen egyszerűbbé válik a szoftveres feldolgozás, hiszen jelen esetben országonként mindössze 2 200 cellára csökkent a táblázat. Kikacsoltam a hálózati súlyozást is, hiszen jelen esetben a kapcsolatok számából adódó élsúlyok alkalmazásának nincs értelme.

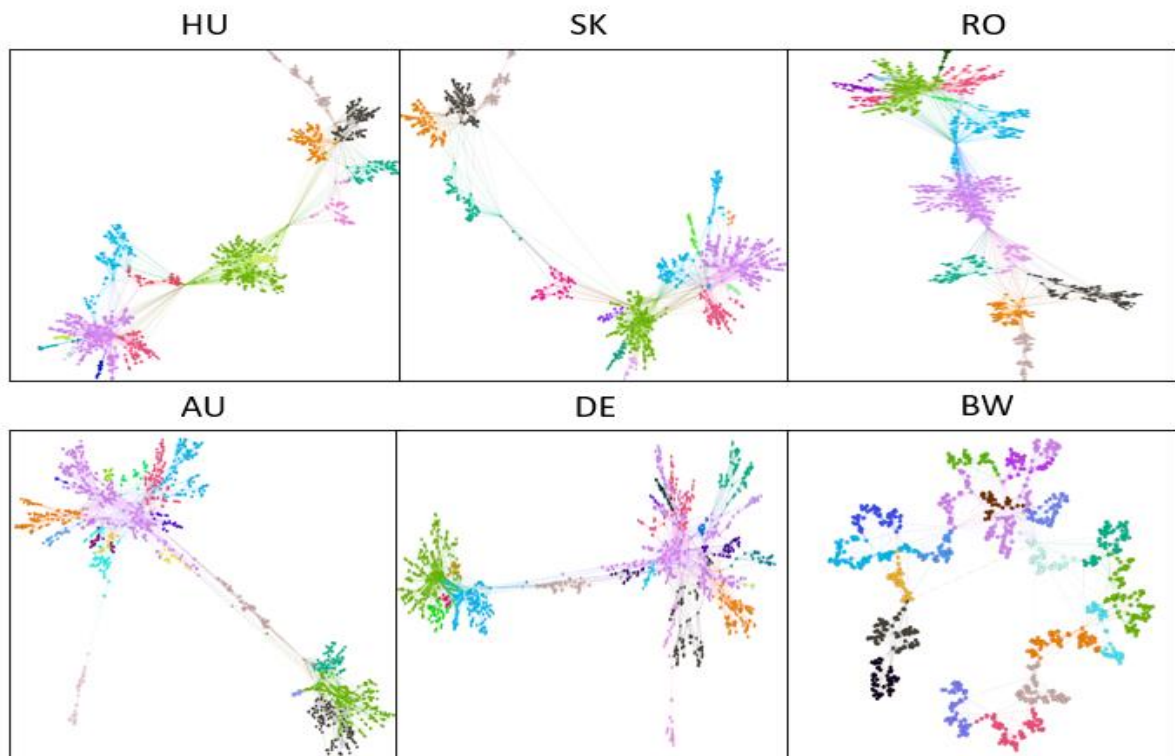
8. TÁBLÁZAT: AZ IDŐSOROK ÉS AZOK LÁTHATÓSÁGI GRÁFTOPOLÓGIÁINAK KORRELÁCIÓS ÉRTÉKEI

| | ÁTLAG | STD SZÓRÁS | ÁTLAG STD HIBÁJA | FELSŐ 95% ÁTLAG | ALSÓ 95% ÁTLAG | Min | MAX | MEDIÁN | MÓDUSZ | 5% TRIMM. ÁTLAG | TERJEDELEM |
|--|---------|------------|------------------|-----------------|----------------|---------|---------|---------|---------|-----------------|------------|
| ÉLEK | -0.1252 | 0.3494 | 0.3605 | -0.1215 | -0.1289 | -0.0121 | 0.3764 | -0.1719 | -0.2753 | -0.1448 | 0.4475 |
| ÁTLAGOS FOKSZÁM | -0.1251 | 0.3494 | 0.3606 | -0.1214 | -0.1288 | -0.0120 | 0.3765 | -0.1718 | -0.2754 | -0.1447 | 0.4476 |
| ÁTMÉRŐ | -0.3140 | -0.0964 | -0.1677 | -0.3137 | -0.3138 | -0.1263 | -0.3498 | -0.2862 | 0.2408 | -0.2980 | -0.3020 |
| ÁTLAGOS ÚTHOSSZ | -0.2141 | -0.5623 | -0.5936 | -0.2187 | -0.2092 | -0.2291 | -0.7858 | -0.1384 | 0.1705 | -0.1814 | -0.7237 |
| SŰRŰSÉG | -0.1290 | 0.3540 | 0.3639 | -0.1252 | -0.1327 | -0.0035 | 0.3694 | -0.1749 | -0.2544 | -0.1484 | 0.4322 |
| MODULARITÁS | 0.6033 | -0.0200 | -0.0210 | 0.6015 | 0.6049 | 0.4597 | 0.0486 | 0.6198 | 0.5455 | 0.6126 | -0.3241 |
| KLASZTEREK SZÁMA | -0.7001 | -0.5206 | -0.5630 | -0.7031 | -0.6965 | -0.5435 | -0.4745 | -0.6431 | -0.2581 | -0.6883 | -0.1015 |
| KLASZTEREZETTSÉGI EGYÜTHATÓ SAJÁTVEKTOR CENTRALITÁS | 0.7477 | 0.1409 | 0.1390 | 0.7471 | 0.7481 | 0.6261 | 0.2791 | 0.7449 | 0.5810 | 0.7502 | -0.1939 |
| | 0.4380 | -0.4883 | -0.4635 | 0.4325 | 0.4438 | 0.3948 | -0.4916 | 0.5508 | 0.6792 | 0.4827 | -0.8982 |

forrás: saját szerkesztés

A megfigyelt piacok nagyon hasonlóak a hálózati struktúra tekintetében (7. táblázat), tehát a láthatósági gráfok a hálózatok tulajdonságai tekintetében rendelkeznek néhány közös vonással. Az egyes markerek a táblázatban a vizsgált piacok átlagához való viszonyát jelenítik meg vizuálisan. Az árampiaci idősorok alapján létrehozott láthatósági gráfok az átlaghoz viszonyítva eltérő tulajdonságokat jeleznek, tehát eltérő politikai vagy reformmintázatok feltételezhetők az egyes területeken, amelyek összefüggésben lehetnek a gazdasági, földrajzi vagy politikai tényezőkkel.

Az élek száma és az átlagos fokszám alapján az adatokból kiolvasható, hogy a spanyolországi áramtőzsde a piaci forgalom alapján kevésbé volatilis a többi területhez képest, ami az árakban is megjelenik például a szórási értékben. Ez az összefüggés az idősorok adatainak és a hálózatok topológiai mérőszámainak korrelációs értékeivel (8. táblázat) is alátámasztható. Amennyiben az idősor szórása növekszik, az átlagos útvonalhosszúság lecsökken, az élek száma és az élsűrűség pedig emelkedik. A terjedelem növekedése ugyancsak csökkenő hatást eredményez az átlagos útvonalhosszúságban a hálózaton belül. Az alacsony volatilitás abból is adódhat, hogy a kereskedés során ritkán alakulnak ki ártüskék, extrém elmozdulások. Ezt a következtetést az adatok eloszlásfüggvénye is alátámasztja, Spanyolország piacának eloszlása laposabb a normálgörbénél. Az adatok szórása a többi országhoz hasonló, sőt, némileg alacsonyabb. Spanyolország energiamixében a legmagasabb a megújuló energiaforrások aránya, ami a természeti folyamatoknak való magas kitettséget jelent, ez pedig „rángatja” az energia árát. Ezek az elmozdulások némileg lassabb folyamatok, tehát *trendszerűek*, ezért *nem figyelhető meg ártüske* (Az ártüske egy rövid ideig jelenlévő, kiugró érték, tehát időnként jelentősen megnövekszik a villamos energia ára (Marossy 2011)). A magas fokszámú csúcspontok emellett azt is megmutatják, hogy a megfigyelések ezen értékei esetében, *milyen mértékű lecsengésről, ártüskéről vagy trendszerű folyamatról van-e szó*. Néhány ország és a véletlen bolyongás láthatósági gráfját szemlélteti a következő ábra. Az összes ország láthatósági gráfja a mellékletben megtekinthető.



forrás: saját szerkesztés

Azokban az országokban, ahol az atomenergia (Franciaország, Szlovákia, Szlovénia) vagy a megújuló energia részaránya magasabb, ott az átlagos fokszám és az élek száma is csupán kismértékben emelkedik feljebb az átlagtól. Átlagtól alacsonyabb értéket csak a véletlen folyamat sorozatában tudtam kimutatni, ami arra utal, hogy *a fokszám-mérőszámok jól jellemzik a piacot az extrém elmozdulások, ártüskék jelenlétéről vagy hiányáról*. Az átlagostól lényegesen magasabb fokszám és átlagos fokszámértéket mutató piacok túlnyomórészt fosszilis tüzelőanyagból nyerik az energiát, amelynek áringadozásai viszont extrém kilengéseket okoznak. Az idősorok megfigyeléseinek gyakoribb kilengései a láthatósági gráfokban magasabb élsűrűséget, ezáltal rövidebb átlagos útvonalhosszúságot eredményeznek.

Ennek folyamán a *kisebb volatilitású piacokon* (Spanyolország vagy a generált véletlen bolyongás) *magasabb átlagos útvonalhosszúság alakul ki*, ami a „hubok” alacsony számát jelenti, ez pedig szoros kapcsolatban áll a fokszámeloszlással és a klaszterezettséggel.

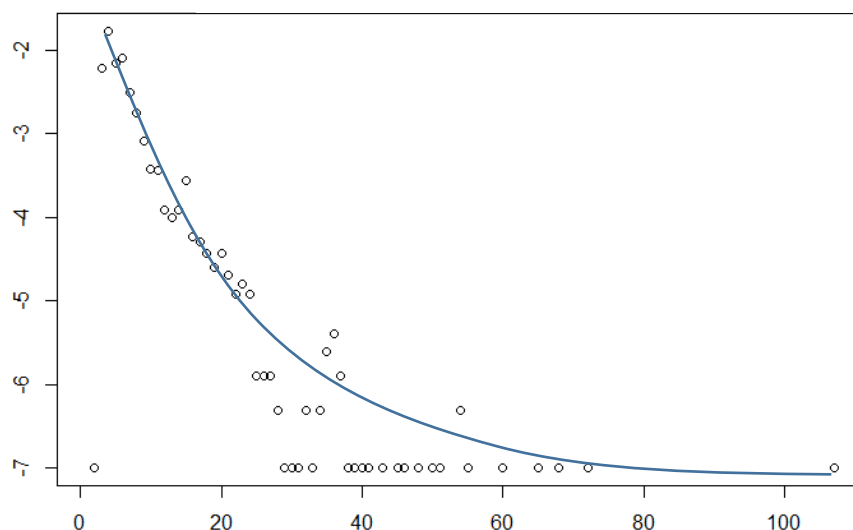
Ami a klaszterezettséget illeti, a klaszterezettségi együtthatók csupán minimális mértékben térnek el egymástól. A klaszterezettségi együttható közepesen erős korrelációban áll az idősorokban mért átlaggal, azonban ennek a kapcsolatnak a mibenléte nem nyilvánvaló a vizsgált piacok esetében. Az összefüggés vizsgálatához további kutatás szükséges. A koefficiensek alakulását leíró függvényalak *a hierarchikus hálózatokban megfigyelhető struktúrát követi*, amely Ravasz and Barabási (2003) munkájában nyert először igazolást.

10.3.2. Skálafüggetlenség

A következőkben azt vizsgálom meg, hogy az érintett piacok adatsoraiból generált láthatósági gráfok skálafüggetlen hálózati tulajdonságokkal rendelkeznek-e. Ennek megválaszolásához a gráfok fokszámeloszlását szükséges ábrázolni kétdimenziós $x = \log(k); y = \log(p_k)$ koordinátarendszerben. Abban az esetben, ha az eloszlás hatványfüggvény alakú, a hálózat vélhetően kisvilág tulajdonsággal bír. Ekkor csupán néhány olyan csúcspont van jelen a hálózatban, amely magas fokszámmal rendelkezik, a pontok döntő többsége alacsony fokszámmal bír. Ez a tulajdonság részben az eredeti idősor volatilitási tulajdonságából fakad. Egy bizonyos tartományban tehát a nagy láthatósággal rendelkező csúcspontokat nagymértékben befolyásolják a korábbi áringadozások, vagy jelentős hatással vannak – előrejelzés estében lehetnek – a későbbi áringadozásokra. A magyarországi HUPX tőzsde adatait a 10-11. ábra szemlélteti, a 9. táblázat pedig az egyes tőzsdékhez tartozó

fokszámeloszlások együtthatóit, annak Kolmogorov-Smirnov statisztikáját és a próba szignifikanciáját tartalmazza.

10-11. ÁBRA: A HUPX ÁRAMTŐZSDE FOKSZÁMELOSZLÁSA



forrás: saját szerkesztés

9. TÁBLÁZAT: FOKSZÁMELOSZLÁSOK ÉS AZOK STATISZTIKAI PRÓBÁI

| | HU | SK | CZ | RO | AU | DE | FR | SP | SLO | IT | Brown mozgás |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| γ | 3.2642 | 3.1628 | 2.6137 | 2.7877 | 2.6429 | 2.4852 | 2.8300 | 2.5137 | 3.3482 | 3.2458 | 3.1212 |
| K-S statistics | 0.0397 | 0.0460 | 0.0361 | 0.0592 | 0.0419 | 0.0458 | 0.0587 | 0.0379 | 0.0451 | 0.0384 | 0.0446 |
| p-value | 0.9345 | 0.8537 | 0.5011 | 0.2603 | 0.3756 | 0.1978 | 0.3022 | 0.2994 | 0.9572 | 0.9350 | 0.5639 |

forrás: saját szerkesztés

A vizsgált áramtőzsdék *mindegyike skálafüggetlen* tulajdonsággal rendelkeznek, melyet a hatványeloszlás log-log transzformációba történő illesztése grafikusán is alátámasztott. A statisztikai próbák kivétel nélkül *a nullhipotézis elutasításának hiányát* vonták maguk után, tehát az eredeti gráfok rendre skálafüggetlenek. Szembetűnő jelenség, hogy a nagyobb piacok, mint a franciaországi és német piacok alacsonyabb együtthatóval rendelkeznek, mint a kisebb, például szlovák vagy magyar áramtőzsdék. Ezek mértékének azonban jelen esetben konkrét jelentésük nincs, a skálafüggetlenség azonban arra utal, hogy az elemzett ársorozatok hosszú távú korrelációval rendelkező fraktál idősorok. Az arany árfolyamának hasonló módszerrel történő elemzésénél Long (2013) egyik kutatásában hasonló eredményekre jutott.

10.3.3. A hálózatok asszortativitása

Az asszortativitás a láthatósági gráfok egyik kritikus mutatószáma. A tőzsdék értékeit a 9. táblázat foglalja össze. A vizsgált piaci szerkezetekből adódóan a hálózatok döntő többsége asszortatív, néhány – főként a kisebb, kevésbé fejlett piacok – esetében azonban (negatív előjel) disszortatív jelleg mutatható ki. Asszortativitás esetében a magas fokszámú csúcspontok főként ugyancsak magas fokszámú pontokhoz kapcsolódnak, disszortativitás esetében ez a kapcsolódás a magas fokszámú csúcspontok esetében gyakran alacsony fokszámmal keveredik.

10. TÁBLÁZAT: ASSZORTATIVITÁSI EGYÜTTTHATÓK

| | <i>HU</i> | <i>SK</i> | <i>CZ</i> | <i>RO</i> | <i>AU</i> | <i>DE</i> | <i>FR</i> | <i>SP</i> | <i>SLO</i> | <i>IT</i> | <i>Brown mozgás</i> |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|---------------------|
| <i>AST</i> | 0.1837 | 0.1236 | 0.2758 | -0.1610 | 0.2884 | 0.2351 | 0.3043 | 0.3470 | -0.1440 | 0.1488 | -0.1864 |

forrás: saját szerkesztés

Az erős asszortatív gráfokhoz tartozó piacok esetében ez a mérőszám arra enged következtetni, hogy a piacon erős információáramlás feltételezhető a kereskedők között és ez okozza az árak erőteljes ingadozását.⁸ Tehát az erős asszortativitási mutató arra utal, hogy meghatározó információk keveredése befolyásolja a piacot. Hosszú távon a kereskedési stratégiák mivoltát is leírhatja, milyen a piaci szereplők magatartása, mennyire hatékony stratégiát folytatnak a kereskedési folyamatokban. A kisebb piacok alacsonyabb asszortativitási eredményei akár a nem megfelelő, vagy kevésbé hatékony információcserére is utalhatnak. Ilyen esetben az idősorok csúcspontjai további csúcspontokkal állnak kapcsolatban.

Ezzel szemben a negatív előjel már a disszortatív szerkezetre utal. Az ilyen paraméterekkel rendelkező piacokat nem hatékony piacoknak is nevezzük (Fan et al., 2019; Humphries & Gurney, 2008). A megállapítást az is alátámasztja, hogy egy véletlen folyamat (Brown mozgás) modellezése is végigkíséri az elemzési folyamatokat, ami akár egy nem hatékony piacról származó idősornak is tekinthető és e „piac” hálózati topológiája ugyancsak a nem hatékony piacra utaló paraméterekkel rendelkezik. Ilyen esetekben a kimagasló időszakok főként további nyugalmi időszakokkal állnak kapcsolatban – jobban preferálják azt (Kundu et al., 2021).

⁸ Megjegyzem azonban, hogy ez nem minden esetben igaz kivétel nélkül, hiszen alacsony termelési időszakban az ár kiugróan magas értékét az is okozhatja, ha a megtermelt mennyiség többségét egy olyan licitáló szerzi meg, aki extrém magas vételárat adott meg. Hasonló logika mentén a termelő szempontjából a fordított forgatókönyv is elképzelhető a kiugróan alacsony árak esetében.

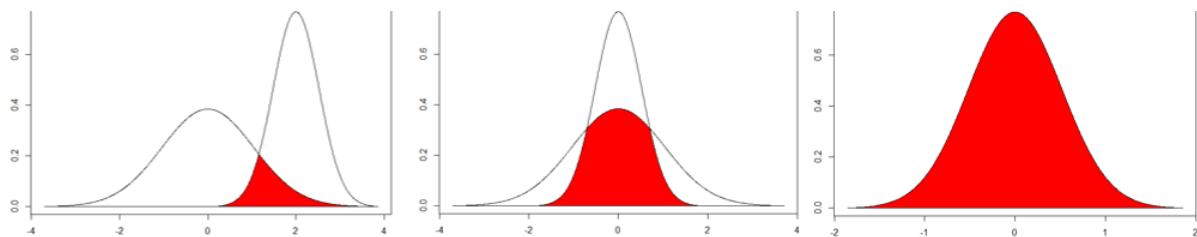
10.3.4. Területi összehasonlítás a módosított Jaccard hasonlóság segítségével

A legtöbb tudományos munkában, ahol a gráfok hasonlóságát vetik össze, legfőképp a közelmúltban megjelent munkákban a *Jaccard hasonlósági mérőszámot* alkalmazták. Ekkor a hasonlóságot a halmaz méreteként határozzuk meg. Az A halmaz és a B halmaz metszete (azaz a közös elemek száma) az A halmaz és a B halmaz uniójának mérete (azaz az egyedi elemek száma) felett. Formálisan:

$$js(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

Meg kell azonban említenem, hogy a Jaccard mérőszámának egyik hibája, melyet nem tartanak szem előtt, hogy elrejtje az átfedéseket. Olyan esetben amikor $A \subseteq B$, a Jaccard együttható ezt nem fed fel, félrevezető lehet, főként, ha $\forall \alpha \in A : \alpha \in B$. Mivel a hasonlóság vizsgálatok a fókuszeloszlások átfedéseit veszem alapul, ez a lehetőség számottevő lehet az eredmények szempontjából. A problémát grafikusán az 10-12. ábra szemlélteti.

10-12. ÁBRA: AZ EL- ÉS ÁTFEDÉS PROBLÉMÁJÁNAK GRAFIKUS SZEMLÉLTETÉSE



(Az eloszlásfüggvények csupán szemléltetésül szolgálnak az elfedési problémára, nem a valós hálózatok eloszlásfüggvényei)

forrás: saját szerkesztés

Az előbbi hiba kiküszöbölésére a következő módosítást javaslom. A fenti egyenlet korrekciója szükséges olyan értelemben, hogy a viszonyítás alapja mindig a kisebb halmaz (vizsgálatom esetében az eloszlás területe) legyen, nevezzük elfedési együtthatónak (EE), ekkor

$$EE(A, B) = \frac{|A \cap B|}{\min(|A|, |B|)}$$

Mivel kutatásom szempontjából a fedésben lévő és elkülönülő csúcspontok egységenként nem lényegesek, az egyenlet további finomítása nem indokolt. Az eloszlásfüggvények a csúcspontok és a hozzájuk közvetlenül kapcsolódó csúcspontok élszámának összegéből adódnak.

11. TÁBLÁZAT: HASONLÓSÁGI MÁTRIX

| | HU | SK | CZ | RO | AU | DE | FR | SP | SLO | IT | Brown mozgás |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|
| HU | 1.00 | | | | | | | | | | |
| SK | 0.90 | 1.00 | | | | | | | | | |
| CZ | 0.86 | 0.85 | 1.00 | | | | | | | | |
| RO | 0.89 | 0.87 | 0.84 | 1.00 | | | | | | | |
| AU | 0.88 | 0.88 | 0.85 | 0.88 | 1.00 | | | | | | |
| DE | 0.90 | 0.91 | 0.83 | 0.89 | 0.91 | 1.00 | | | | | |
| FR | 0.86 | 0.82 | 0.80 | 0.86 | 0.85 | 0.85 | 1.00 | | | | |
| SP | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.73 | 0.76 | 0.76 | 0.70 | 1.00 | | | |
| SLO | 0.89 | 0.90 | 0.85 | 0.88 | 0.89 | 0.89 | 0.85 | 0.80 | 1.00 | | |
| IT | 0.90 | 0.91 | 0.84 | 0.89 | 0.90 | 0.90 | 0.83 | 0.79 | 0.90 | 1.00 | |
| v | 0.67 | 0.73 | 0.79 | 0.68 | 0.69 | 0.69 | 0.63 | 0.86 | 0.72 | 0.71 | 1.00 |

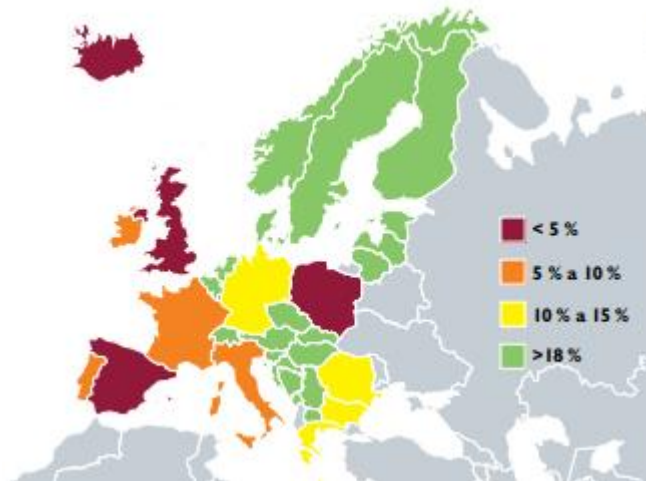
forrás: saját szerkesztés

A 11. táblázat foglalja össze a vizsgált áramtőzsdék páronkénti hasonlósági mátrixát. A legtöbb piac egymással erős korrelációt mutat a belső folyamatok és struktúrák tekintetében. A leggyengébb hasonlóságot – a generált véletlen bolyongáson kívül – a spanyolországi áramtőzsde mutatja. Ez a piac az egyetlen, amely a normálistól laposabb eloszlást követ, így az elfedési együttható is alacsonyabb lesz. Ennek egyik oka lehet, hogy a vizsgált tőzsdék közül Spanyolországban a legmagasabb a megújuló energiaforrásból termelt energia aránya, amely – a természeti tényezőknek való magasabb kitettség miatt – más áreloszlást és volatilitást eredményez, amely ebben a hasonlósági mutatóban is markánsan megjelenik.

A területi hasonlóságok és különbségek további szignifikáns befolyásoló tényezői az országok között létrejövő belső európai rendszerösszekapcsoltság és cserekapacitás. A cserekapacitás a két villamosenergia-rendszer között importálható vagy exportálható maximális pillanatnyi villamos energia, amely az egyes rendszerek biztonsági kritériumainak betartása mellett biztosítható. E kapacitás kiszámításához az egyes rendszerek üzemeltetői a szomszédos rendszerüzemeltetőkkel összehangolt vizsgálatokat készítenek, amelyek figyelembe veszik a termelési és keresleti előrejelzéseket, a létesítmények karbantartási időszakait, valamint szimulációkat végeznek, amelyek figyelembe veszik a különböző hálózati elemek esetleges meghibásodását. Mindezeket a tanulmányokat különböző időhorizontokon belül végzik, az éves előrejelzésektől a napi előrejelzésekig, hogy így a lehető legnagyobb kereskedelmi cserét lehessen végrehajtani a biztonsági kritériumok betartása mellett. Ahhoz, hogy minden ország részesülhessen az integrálódásból eredő stabilitási előnyből, elengedhetetlen a magas szintű cserekapacitás fenntartása. E tekintetben az Európai Unió javaslata, hogy az országok

közötti minimális rendszerösszekötő kapacitás az egyes országok beépített termelési kapacitásának legalább 10%-át tegye ki (Espejo-Marín & Aparicio-Guerrero 2020). Az átviteli kapacitások alakulását szemlélteti a következő ábra.

10-13. ÁBRA: MINIMÁLIS RENDSZERÖSSZEKÖTŐ KAPACITÁS AZ EGYES ORSZÁGOK BEÉPÍTETT TERMELÉSI KAPACITÁSÁNAK SZÁZALÉKÁBAN

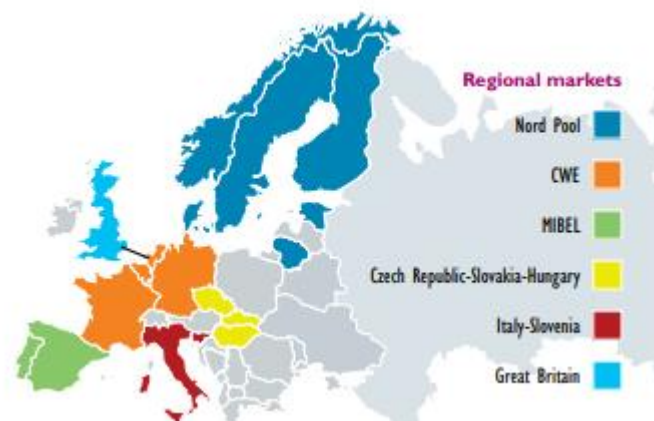


forrás: <https://www.ree.es/es>

Összességében a Jaccard index, illetve az elfedési együttható arra ad választ, hogy az egyes piacok milyen mértékben heterogének vagy épp homogének. Esetemben az áramtőzsdék és azok Európai Unión belüli fokozatos integrációja erősödő homogenitást eredményez, tehát a piaci mechanizmusok igencsak hasonlóak, az eredmények pedig összhangban állnak a 10-13-as ábrán látható átviteli korlátozásokból adódó területi különbségekkel is. Ezek az eltérések a tőzsdei energiakereskedési árakban is tükröződnek, hiszen az energiainport és -exportlehetőségek a belföldi kereslet és kínálat kiegyenlítésének lehetőségét és a túlkeresletből és/vagy -kínálatból adódó áringadozások mérséklésének lehetőségét is korlátozzák. Ma a spanyol villamosenergia-rendszer nem éri el ezt az Európában ajánlott minimális szintet, mivel az európai rendszerrel való kereskedelmi cserekapacitásuk a spanyolországi beépített termelési kapacitásnak csupán 3%-át teszi ki. A szomszédos rendszerekkel való összeköttetések megerősítése ezért a legfontosabb beruházás, amelyet Spanyolországnak a következő néhány évben végre kell hajtania. Ezen túlmenően Spanyolország földrajzi elhelyezkedése miatt az összekapcsolási lehetőségei Európa többi részével nagyon korlátozottak. Az a tény, hogy csak a Franciaországgal való összeköttetés teszi lehetővé az energiacserét az Európai Unió többi részével, elektromos szigetté teszi. Spanyolországot és Franciaországot jelenleg négy nagyfeszültségű vezeték köti össze. 1982 óta nem épültek új összekötő vezetékek, annak ellenére, hogy mindkét országban nőtt a villamosenergia-igény (Pacce & Suárez-Varela 2021).

A magyar és német piac, ugyan csak közvetett összekapcsoltságban áll egymással, azonban kölcsönösen hatnak egymásra. A HUPX piaca regionális referenciaárat szolgáltat a környező országok tőzsdéi számára, amíg a német piac árhatása egyre csökken, de máig érezteti hatását a piacon. Ez a fokozódó integráció az EU területén a jövőben tovább mérsékelheti az extrém időszakokban kialakuló ártüskék hatásának hosszát és mértékét egyaránt. A hatás várhatóan nem mérséklődik végtelenségig, hiszen annak ellenére, hogy integrált piac van kialakulóban, mégis egymástól elkülönülő piaci szerkezetekről beszélünk, így ezek a hatások csak addig tudnak mérséklődni, amíg a határkeresztesző kereskedelmi teljesítmény ezt lehetővé teszi. A kereslet-kínálati anomáliák főként lokálisan jelentkeznek, így ezek egymásra nem képesek teljes mértékben hatni. Az európai regionális árampiac kialakítása jelenleg is folyamatban van, melynek keretében az alábbi erős területi tőzsdéi kohéziók zajlanak (10-14 ábra).

10-14. ÁBRA: FEJLŐDÉS ALATT ÁLLÓ EURÓPAI REGIONÁLIS ÁRAMPIACOK



forrás: <https://www.ree.es/es>

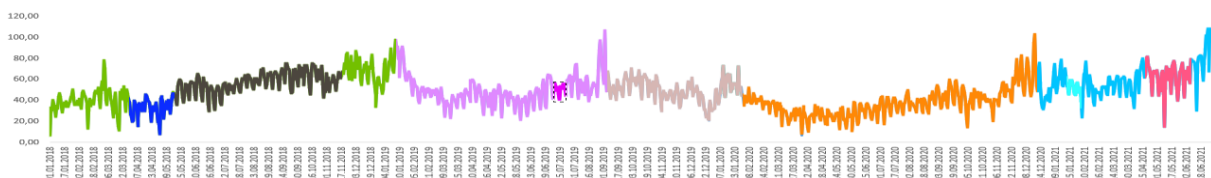
A közép- és nyugat-európai régióban (Franciaország, Németország, Hollandia, Belgium és Luxemburg), három üzemeltető (EPEXSPOT, APX-ENDEX és BELPEX) működik, valamint az Olaszország és Szlovénia, valamint a Cseh Köztársaság, Szlovákia és Magyarország közötti piacösszekapcsolás esetében további három üzemeltető kezeli a piaci folyamatokat, ami ugyancsak magyarázat lehet a módosított Jaccard-index által detektált területi különbségekre. Az áramtőzsdék esetében azonban még erősen megjelenik az egyéni érdekérvényesítés hatása is, ezért a piaci folyamatokat sokszor nehéz kizárólag makrojellemzőkkel megragadni. A különböző európai regionális piacok megfelelő összekapcsolásának biztosításához az órák és termékek kompatibilitására, valamint a piacok működési szabályainak és a különböző érintett rendszerek biztonsági kritériumainak bizonyos fokozottabb koordinációjára van szükség annak érdekében, hogy egy adott országban bekövetkező incidensek ne terjedjenek át az európai rendszer többi részére.

Tovább erősíti a tengerparttal rendelkező országok szárazföldi régióktól történő különbségeit, hogy az elmúlt években Európa támogatta a megújuló energiaforrások fejlesztését, hogy azok az egyes országok energiamixének nagyobb hányadát képezhessék. A megújuló energiaforrások, különösen a szél- és napenergia kezelése összetett feladat, mivel e technológiák termelése nem feltétlenül akkor történik, amikor a rendszer igénye azt megköveteli, ellenben a fosszilis termelőkkel. Az összekapcsolási kapacitás növekedésével a rendszer által biztonságosan integrálható szélenergia-termelés teljes mennyisége is emelkedik, mivel az ebből a forrásból nyert energiát, amelynek felhasználásához időnként nincs elegendő kapacitás a rendszerben, a szomszédos rendszerekbe lehetne közvetlen hálózatokon továbbítani (Red Eléctrica de España). (Hasonló okokból korlátozták a közelmúltban a hazai naperőművek visszatáplálási kapacitását is, ugyanakkor ennek szabályozása és valós hálózati korlátozottsága még nem világos.)

10.3.5. Klaszterezettség

A klaszterelemzés eredményei alapján az eredeti idősort szakaszokra bonthatjuk, ahogy azt a 10-15. ábra is mutatja.

10-15. ÁBRA: A LÁTHATÓSÁGI GRÁF TOPOLOGIÁJA ALAPJÁN SZAKASZOLT EREDETI IDŐSOR



Forrás: saját szerkesztés

Ezek a szakaszok a piac egyes trendjeinek, politikai intézkedések hatásának, fogyasztási ciklusoknak és egyéb tényezőknek felelnek meg. Az eredeti klaszterezettségi csoportokat finomítani kell, mivel az általam használt módszer az idősorban rejlő zajt is figyelembe veszi, így előfordul, hogy két klaszter összevonása szükséges. A közösségek kialakításához azonban magas élsűrűség szükséges, ellenkező esetben a klaszterelemzés nem végezhető el. Sikeres analízis esetében azonban az látható, hogy a klasztereken belüli élsűrűség magas, a klaszterek között viszont alacsony élszám figyelhető meg. *Abban az esetben, ha egy klaszterben hub található, a klaszter átlagos legrövidebb úthossza alacsony lesz, míg hub-ok hiányában ez az érték emelkedik. Ha egy nagyobb ciklus alacsony sűrűségű közösségben található, akkor sok hasonló amplitúdójú kis ciklust tartalmaz. Amikor egy nagy ciklus alacsony útvonalhosszúsággal rendelkező klaszter, akkor az elején és/vagy a végén vannak*

megfigyelések, amelyek központi csúcspontként működnek a közösségben. Ezek a klaszterek az idősor ábrázolásakor gyakran „U” alakot írnak le, ami az egész közösségben jó láthatóságot, valamint nagy sűrűséget eredményez. A fenti elemzésből kitűnik, hogy nagy ciklusok esetén *az idősorok geometriai jellemzőit a megfelelő közösségek sűrűsége különbözteti meg,* és ezzel szakaszokra bonthatók a piaci idősorok, melyek ezt követően a rendelkezésre álló gazdasági mutatók és információk segítségével értelmezhetők. Ki kell azonban emelnem egy olyan korlátozó tényezőt, melyre csak a kutatás és a doktori értekezés írása folyamán derült fény. Az áramtőzsdei idősorok megfelelő alapot adnak a módszertan alkalmazásának teszteléséhez a hosszuk és a mérési gyakoriságuk kapcsán, azonban a tőzsdei folyamatokat a makrogazdasági tényezők csak hosszabb távon képesek érdemben befolyásolni. Rövidtávon sokkal inkább a tőzsdei szereplők egyéni magatartása és érdekei érvényesülnek, melyek megnehezítik az azonosított klaszterek és az általuk reprezentált piaci ciklusok egyértelmű magyarázatát. Ez az egyéni hatás várhatóan a piaci szereplők számának emelkedésével a jövőben mérséklődni fog, azonban az értekezés megírását követően szükségesnek látom a módszertan olyan idősoron történő tesztelését is, mely esetében a makrogazdasági tényezők sokkal inkább érvényesülnek. Amiben a vizsgált áramtőzsdék klaszterezésének eredményei erős hasonlóságot mutatnak, azok főként időjárás tényezők által okozott anomáliák. Mivel egy nagyobb hőhullám stb. nem lokálisan, hanem gyakran kontinentálisan jelentkezik, így az egyes szakaszok ezekben az időpontokban erős hasonlóságot mutatnak. Egy piac mutatott erősebb eltérést a többi tőzsdétől, ez pedig a spanyolországi áramtőzsde. A korábban említett megújuló energiaforrásból származó áramtermelés a többi piachoz képest eltérő klaszterstruktúrát hoz létre az idősorban.

Bár a villamosenergia-kereskedelem az Európai Unió területén már transzparens, a kereskedők még mindig saját hazájukban képesek nagyobb előnyre szert tenni a piac és a helyismeret miatt. A régióban a HUPX áramtőzsde egy nagy úrt volt képes betölteni a piacon, mivel Magyarország számos országgal határos és ezen határok mindegyikén, szinte kivétel nélkül átviteli hálózattal rendelkezik. *Ez a nemzetközi jelenlét tette egyrészt lehetővé, hogy a hazai kereskedők a külföldi piacokon is megjelenjenek termékeikkel, másrészt, hogy a hazai piac fel tudja venni a nemzetközi piac ritmusát.* Ennek egyik legszembetűnőbb jele, hogy a piaci ingadozások, trendek és szezonálisok *erős korrelációt mutatnak a külföldi piacokon mért adatokkal.* Mindez persze nem ennyire egyszerű, hiszen a kereslet és kínálat sajátosságai sokkal inkább lokális jellegűek, melyek képesek az összekapcsolt piacokon kiegyenlíteni egymást és az ebből adódó torzításokat, de ezek egyik fő korlátozója a határkeresztező hálózatok átviteli kapacitása. Így a nemzetközi árkiegyenlítő hatás és mérséklő mechanizmus még csak korlátozottan képes

jelentkezni, a helyi jellegzetességek szerint differenciáltan. Az olyan extern hatások azonban, mint az időjárás okozta eltérések, nem földrajzi lehatárolási alapokon, nem országhatárokon belül jelennek meg, sokkal inkább regionális szinten, melyeket a rendszer sokkal könnyebben képes kezelni. Mindazonáltal a magyar áramtőzsde a balkáni régió számára, melynek piaci fejlettsége még nem hasonlítható a nyugati országok szintjéhez, a HUPX egyfajta csatlakozási csúcspontként szolgálhat a jövőben a fejlett piacok irányába. Ennek és a többi vizsgált piaccal megfigyelt erős korreláció következtében a következő fejezetben a HUPX piaci idősorainak hálózatelméleti elemzésével foglalkozom bővebben.

10.4. A MAGYARORSZÁGI ÁRAMTŐZSDE VIZSGÁLATA A LÁTHATÓSÁGI GRÁF MÓDSZERREL

A korábbi elméleti áttekintések után a fejezet elején az alkalmazott módszertannal kapcsolatban az alábbi hipotéziseket állítottam fel:

H₃: *A gráfokban kialakuló klaszterek segítségével meghatározhatók a vizsgált időszakban bekövetkező piaci események.*

H₄: *A klaszterek legmagasabb fokszámmal rendelkező csúcspontjai (HUB-ok) globális és lokális maximumértékeket jelölnek.*

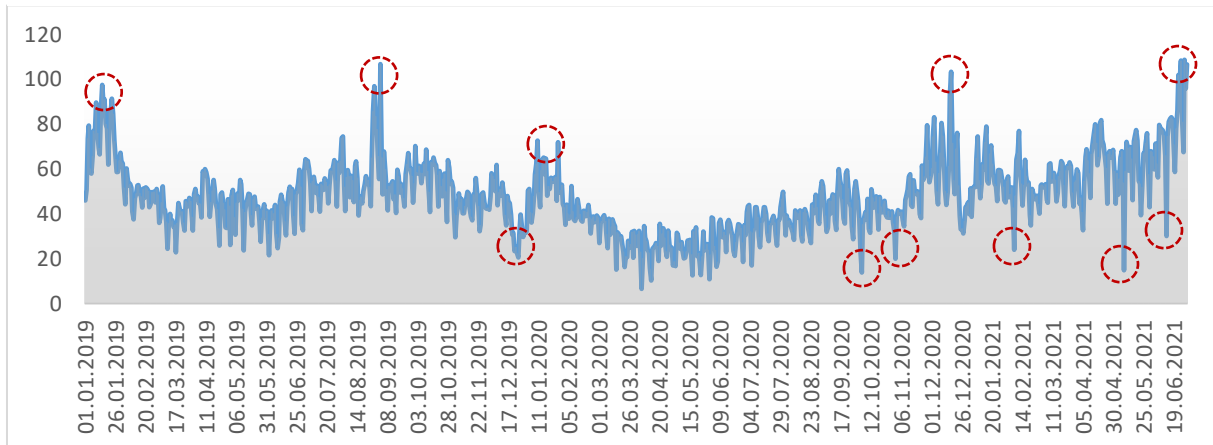
H₅: *Az a klaszter, amelyből nem emelhető ki egyértelműen magas fokszámú csúcspont, nyugodt piaci időszakot ölel fel.*

Mint arról a szakirodalmi fejezetben írtam az értekezésem elején, a magyar áramtőzsde (HUPX) üzemeltetője a MAVIR tulajdonát képező Magyar Energiatőzsde Társaság. A napon belüli piaca 42, a másnapi piac pedig 62 tagot számlál jelenleg. Az energiatőzsde már további regionális piacokkal is összekapcsolásban áll (4MMC). A Magyarországon megtermelt megújuló energiaforrásokból származó villamos energia kereskedése ugyancsak a HUPX-en zajlik. Bár hazánkban a villamos energia fogyasztóiár-meghatározása nem piacfüggő, annak vizsgálata kiemelten fontos, hiszen a jelenleg rezsicsökkentés néven ismert politikai intézkedés esetleges kivezetését követően újra a piaci alapú ármeghatározás válhat a központi gyakorlattá. Mindemellett a valódi rezsicsökkentés úgy érhető el egy országban, ha a háztartások valós energiafogyasztását csökkentjük (épület- és fűtéskorszerűsítés) és nem a kiskereskedelmi árakat szabályozzuk, hiszen az efféle politikai szabályozások negatív hatást gyakorolnak a piacra. Mindazonáltal a nyugat-európai piacokon már a gazdasági szereplők mellett egyre gyakrabban jelennek meg háztartások is ún. okosmérőkkel az áramtőzsdéken, aminek eredményeképp ők is a mindenkori piaci áron jutnak villamos energiához. Az ilyen esetek többségében a háztartások az egyes időszaki blokkok áraihoz igazítják fogyasztásuk nagy részét, melyek nem eseti jelleggel jelentkeznek (vízmelegítés, nagyobb energiaigényű háztartási munkák).

Kutatásom során a másnapi piac (DAM) árait vizsgálom meg részletesen a 2019. január 1. és 2022. március 03. közötti időszakban. A választott időszakot emellett két részre bontom. Az első szakasz a 2019. január 1. és 2021. június 30. közötti részidőszak lesz. Ebben az időintervallumban csak kisebb piaci anomáliák voltak megfigyelhetők a piacon. Ezzel szemben 2021. július 1-jétől egyre markánsabb árnövekedés ment végbe a tőzsdén, amely két időpontban rövid időre megszakadt, majd tovább folytatódott. Annak elkerülése érdekében, hogy a láthatósági gráffá történő konvertálás során a kiegyensúlyozottabb időszakok árait és annak

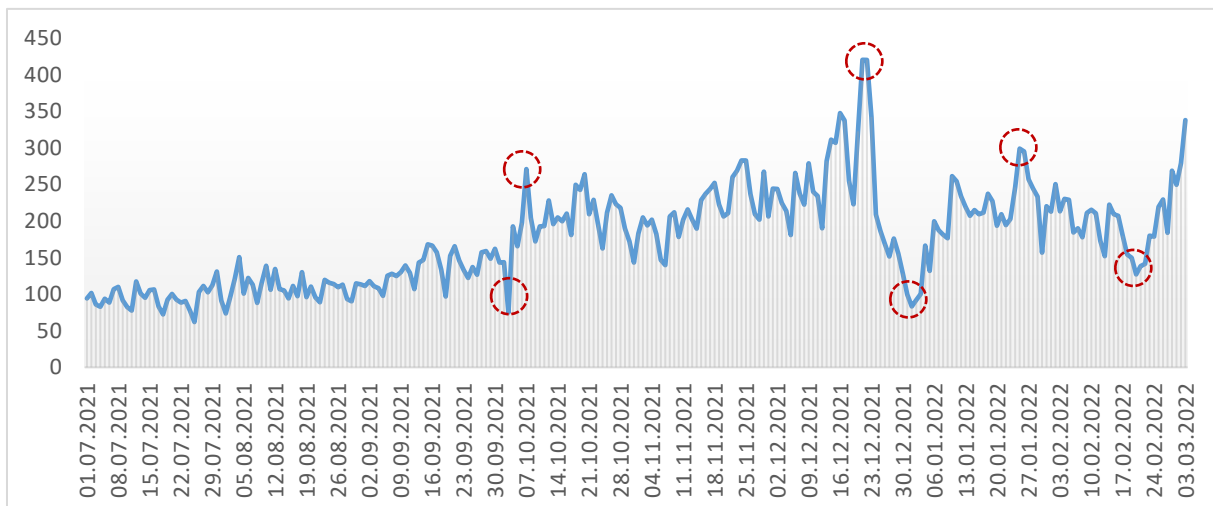
klasztereit elfedjék a növekedési időszakban létrejövő hálózati klaszterek (ld. korábbi elméleti idősorok példáján), a piaci szakaszokra bontása indokolt (10-14. ábra).

10-16. ÁBRA: A 2019.01.01 ÉS 2020.06.30. KÖZÖTTI IDŐSZAK VONALDIAGRAMJA



forrás: saját szerkesztés

10-17. ÁBRA: A 2020.07.01. ÉS 2022.03.03. KÖZÖTTI IDŐSZAK VONALDIAGRAMJA

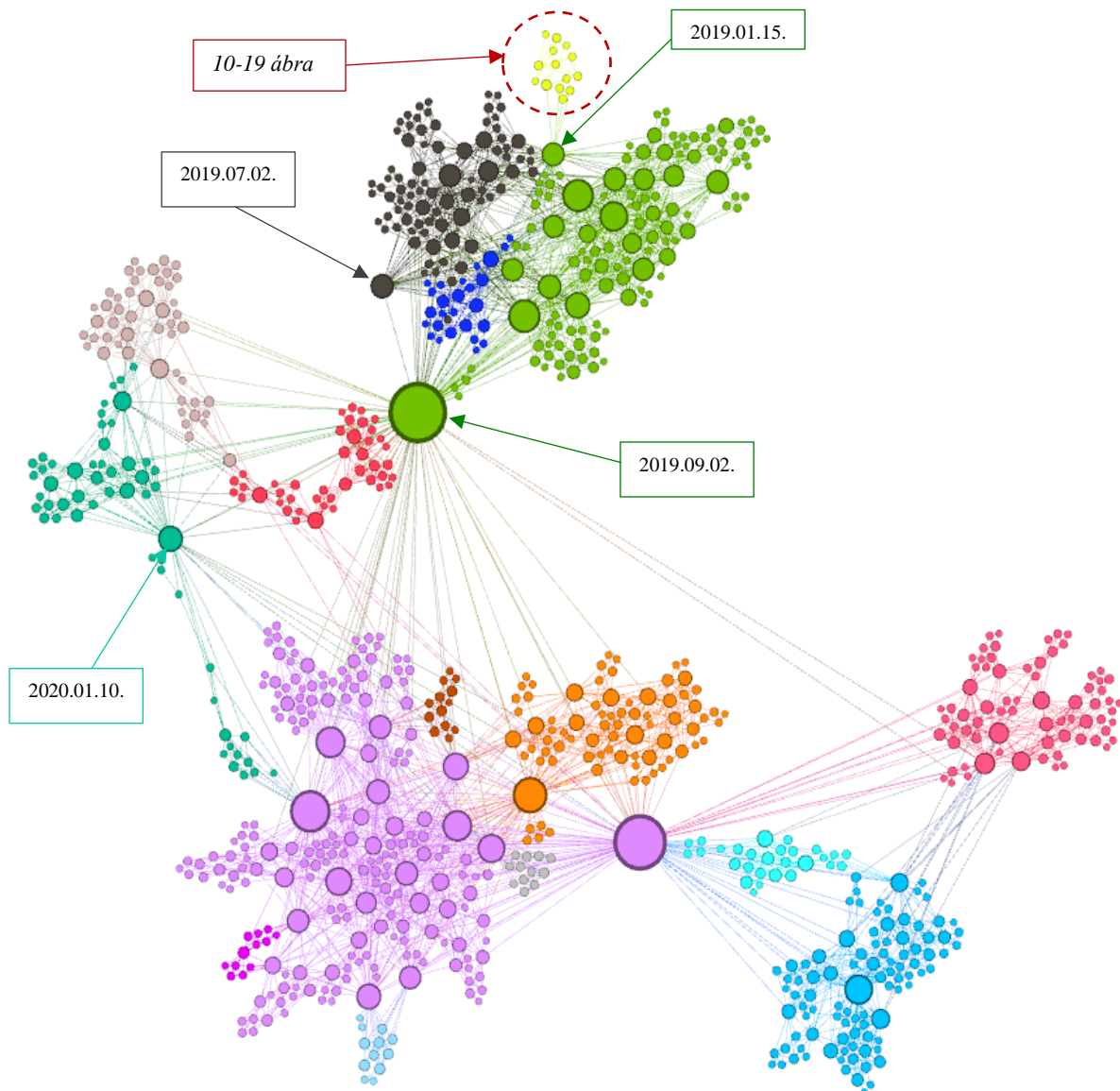


forrás: saját szerkesztés

A 10-16-es a és 10-17-ös ábrák máris érzékeltetik a láthatósági gráffá konvertálás egyik nagy előnyét: a lokális maximumok, minimumok és egyéb jelentősebb időpontok, időszakok gráfként ábrázolva lényegesen egyszerűbben azonosíthatók, lehatárolhatók, mint a hagyományos kétdimenziós koordináta-rendszerben való megjelenítésben, mivel a napok

aggregáltan jelennek meg. Efféle ábrázolásban csak a pirossal bekeretezett néhány kiemelkedő időszak figyelhető meg szemrevételezéssel. Gráfként történő ábrázolás után a klaszterek (egy-egy időszakok) és a HUB-ok (a kiemelkedő időpontok) egyszerűbben detektálhatók, globális és lokális szinten egyaránt (10-18. ábra).

10-18. ÁBRA: A 2019.01.01 ÉS 2020.06.30. KÖZÖTTI IDŐSZAK LÁTHATÓSÁGI GRÁFJA

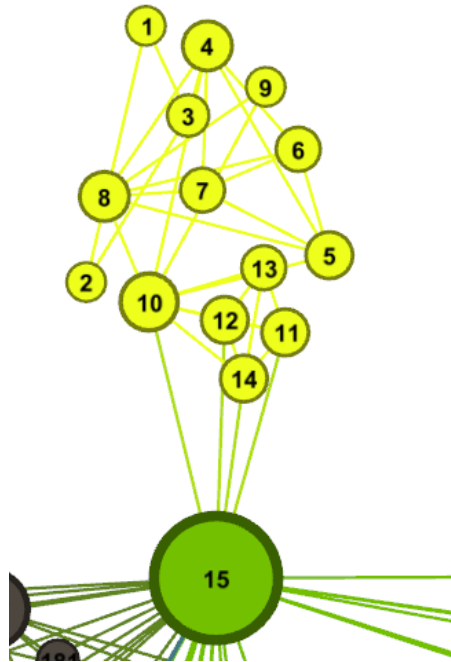


forrás: saját szerkesztés

Megjegyzés: A színek a klasztereket a csúcspontok méretei pedig a fokszámot jelzik. A dátumok és/vagy a napok száma a teljes gráf ábrázolásakor nem kerültek megjelenítésre az alacsony mértékű nagyítás miatt. Természetesen ezek azonosítása a hálózatelemző szoftverrel rendkívül egyszerű. Az időpontokat csupán néhány esetben jelenítettem meg az ábrán, illetve néhány, a következőkben kiemelt részgráfon. (A további részgráfokon a színek használata nem feltétlenül azonos a fenti teljes gráf színeivel, azonban az eredményekre ennek nincs hatása.)

A 2019. január eleji időszakban a 10-17-es ábrán kivehető egy gyorsan növekvő szakasz, majd egy visszaesés az első 2 hétben. Ezt az időszakot szemlélteti a következő ábra.

10-19. ÁBRA: RÉSZGRÁF (2019.01.01-2019.01.15.)



forrás: saját szerkesztés

A fenti ábrán megjelenített számok az adott időszak napjait szemléltetik a dátumok helyett. A napok számát nem az év napjaiként, hanem a vizsgálatba bevont időszak intervallumának napjaiként kell értelmezni! Tehát 2020. január 1. az időszak 366. napja. A gráf a 2019-es év első 15 napját ábrázolja. Az egyes pontokhoz a számukra „látható” napok kapcsolódnak. A sárga színű klaszterbe az év pontosan első két hete tartozik (1-14 nap), amely ezután egy következő nagyobb klaszterhez csatlakozik az év 15. napján keresztül. Ez alapján az első 14 nap egy külön időszakot ölel fel, amelyet a 15. nap addigi legmagasabb tőzsdei ára szakít meg. Itt ismét visszacsatolnék a hagyományos idősorábrázolás korlátjaihoz, hiszen ez a szakasz például a 10-16-os ábrán – nagyobb időintervallumot felölelő adathalmaz esetén – egyáltalán nem volt detektálható egyszerű szemrevételezéssel.

10.4.1. A 2019.01.01. és 2021.06.30. közötti időszak

Ez a hálózat 912 csúcspontot (napot) és 3 935 élet tartalmaz.

12. TÁBLÁZAT: A KÉT VIZSGÁLT IDŐSZAK LÁTHATÓSÁGI GRÁFJÁNAK TOPOLOGIAI MÉRŐSZÁMAI

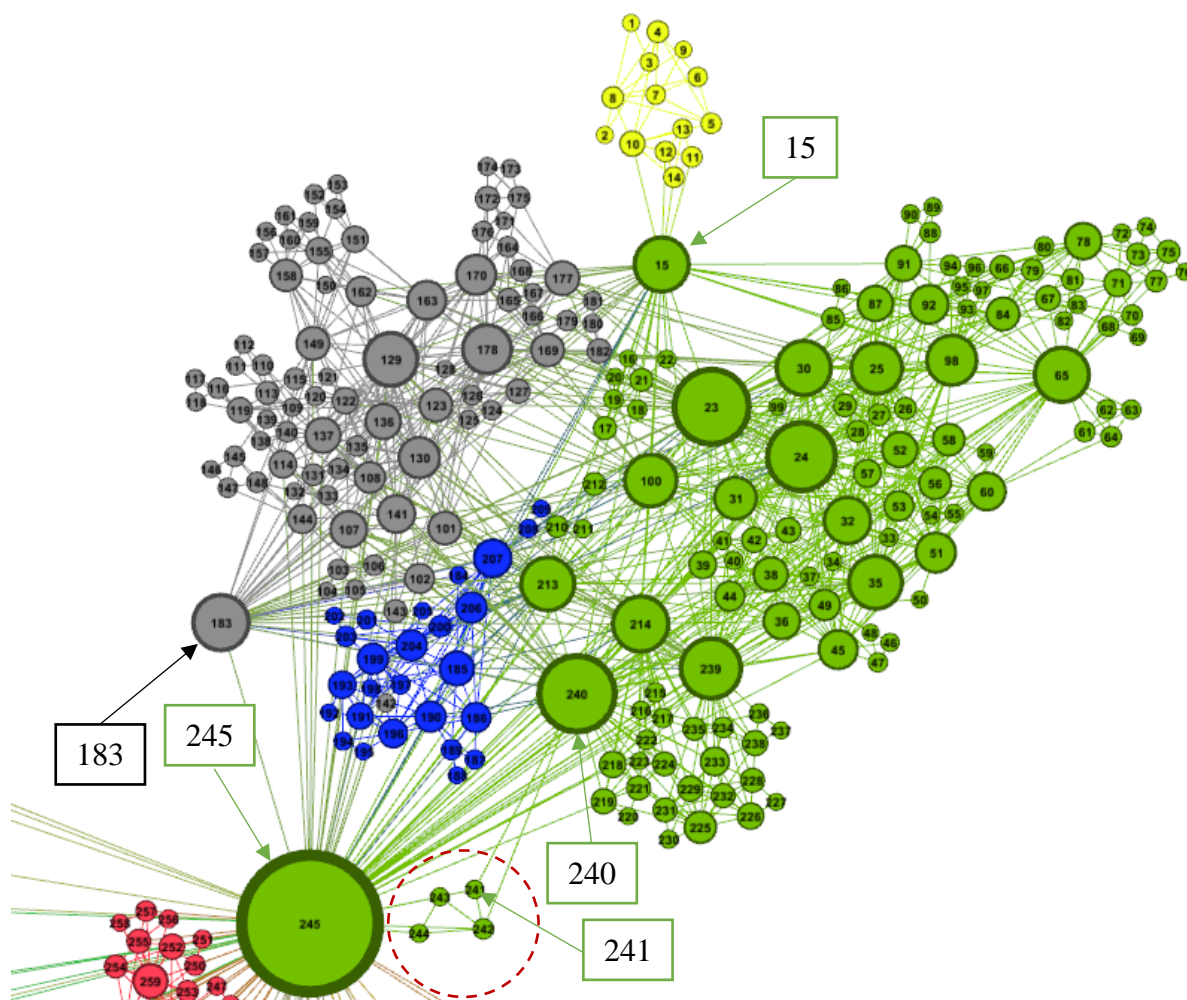
| | <i>Átlagos fokszám</i> | <i>Átmérő</i> | <i>Átlagos úthossz</i> | <i>Sűrűség</i> | <i>Modularitás</i> | <i>Klaszterek száma</i> | <i>Klaszterezettségi együthető</i> | <i>Sajátvektor centralitás</i> | <i>Minimális feszítőfa</i> |
|----------------------------|------------------------|---------------|------------------------|----------------|--------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 2019.01.01- 2021.06.30. | 8.629 | 9 | 4.0962 | 0.009 | 0.755 | 16 | 0.7376 | 0.0357 | 911 |
| 2021.07.01- 2022.03.03. | 7.959 | 9 | 3.9141 | 0.032 | 0.739 | 8 | 0.751 | 0.0201 | 245 |

forrás: saját szerkesztés

2019. január elején a 10-19-es ábrán látható kisebb klaszter arra világít rá, hogy az év 15. napját megelőzően folyamatos növekedés volt megfigyelhető az elektromos áram piacán, amely már, az általam nem vizsgált 2018-as évben megindult. Ennek egyik fő kiváltója a széndioxid kibocsátási kvóta, gáz- és szénárak jelentős áremelkedése volt. Mindehhez hozzájárult az orosz-ukrán gáztranzit szerződések meghosszabbításának bizonytalan tárgyalási stratégiája is. Az egyik legmagasabb januári fogyasztás is ebben az időszakban volt megfigyelhető (4 290 GWh). Az áram tőzsdei idősorában számos szezonális figyelemre méltó megfigyelhető meg. Éves szinten az évszakok és azok átlaghőmérséklete a szezonális figyelemre méltó kiváltója. Mindemellett, mint ahogy arra az autokorreláció-tesztekből következtetni lehetett, a tavaszi és az őszi szezon egy nyugodtabb, a nyári és téli időszak pedig lényegesen volatilisabb részidőszakot ölel fel. Előbbi a magas átlaghőmérséklet, a meleg napok száma és a klímaberendezésekből eredő magasabb fogyasztás, utóbbi a fűtésszezon miatt alakul ki. Havi bontásban a munkanapok száma a meghatározó, míg heti szinten ugyancsak a munkanapok és az ünnepnapok/hétfővégek különülnek el. Amennyiben óránkénti bontásban vizsgálnánk az árakat, a napi ciklus hasonló módon megfigyelhető lenne. Utóbbi esetben a csúcsideőszak és a nem csúcsideőszak folyamatos változása is hozzájárul a szezonális mintázat kirajzolódásához. Jelen esetben azonban az év 15. napján vélhetően egy piaci korrekció történt az árakban. Ezt követően azonban újabb klaszteresedés ment végbe a hálózatban, amit a 10-20. ábra szemléltet. De mit is látunk egész pontosan? Mit lehet az ilyen típusú gráfokról leolvasni?

Első körben azt figyelhetjük meg, hogy az időszak 245. napja, azaz nevezetesen 2019. szeptember 2. egy magas fokszámmal rendelkező időpont. Ez arra enged következtetni, hogy év eleje óta ez az egyik legmagasabb időszakai ár. A tőle jobbra található zöld, szürke és kék klasztereket kapcsolja össze, illetve ezeken keresztül kapcsolatban áll az év első 15 napjával is. A 245. nap tulajdonképpen az idősor egyik globális maximuma, 106,95 EUR/MWh. Térjünk azonban vissza a zöld klaszterhez. Az ide tartozó első adat az időszak 15. napja, amely elvágja a részgráfot az első 14 naptól. A 14. és a 245. nap azonban azért nem áll egymással kapcsolatban, mert a két időpont között voltak lokális maximum árak, melyek nem teszik lehetővé a két időpont közt a szakadatlan összekötést a térben, egyúttal kiválnak a zöld klaszterből és a kék, illetve szürke részszegezmensként jelennek meg. Ugyanakkor részhalmazai a zöld klaszternek, hiszen a 245. nap, mint globális maximum, összeköti őket.

A 183. nap a szürke klaszter HUB-ja, azaz a részhalmaz és egyben a zöld klaszter, mint időszak lokális maximuma, nevezetesen 2019. július 2-a, 64,73 Eur/MWh árral. A lokálisan kimagasló ár egyik oka a Dunamenti Erőmű Zrt. G3-as blokkjának kiesése, amely 337 MW termelésesökkenést eredményezett. A tervek alapján az üzemzavart a G1-es blokk indításával pótolták volna (+170 MW) azonban ekkor ebben a blokkban is gázturbina hiba keletkezett. Így tehát a beszűkülő kínálat kismértékű árfelhajtó hatást generált. A kék részgráfban csupán minimális változások voltak megfigyelhetők az egyes napokon.

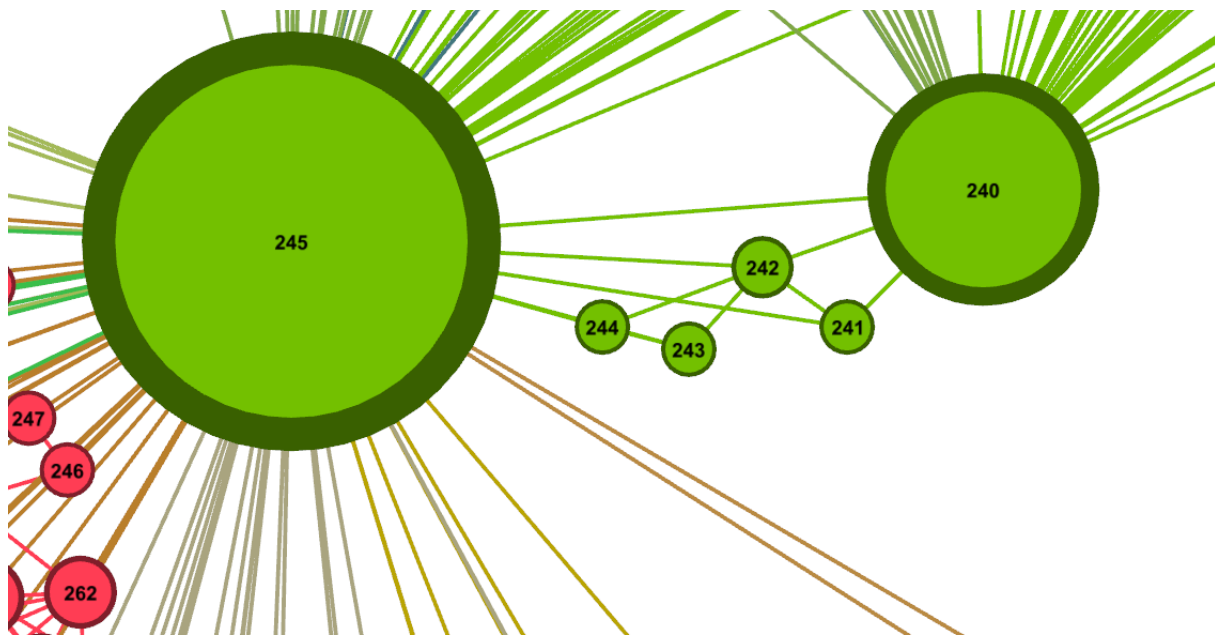


forrás: saját szerkesztés

A továbbiakban tekintsük meg a 240. és a 245. csúcspontot a hálózatban. A 240. nap (2019.08.28.) a zöld részgráf, mint időszak lokális maximuma (97,04 EUR/MWh), a 245. (2019.09.02.) pedig globális maximum (106,94 EUR/MWh). A két naphoz köthető legjelentősebb belpiaci esemény a Paksi Atomerőmű hármas gépegységének kiesése a tervezett karbantartás miatt, az így elvesztett termelőkapacitás 231 MW. Mindemellett az osztrák piac váratlanul jelentősen visszafogta a Magyarországra irányuló határkeresztező kapacitását, ami szintén árfelhajtó hatással rendelkezett. A kereslet mérséklődését csak a megugró árakra adott balkáni régió csökkenő importigénye tudta előidézni. Ennek köszönhetően a két időszak között némi mérséklődés volt megfigyelhető. Mindazonáltal Norvégiában, ahol az áramtermelést túlságosan egyoldalúvá változtatták azzal, hogy 95%-ban a vízierőművekre támaszkodtak, ekkoriban az aszályok miatt hatalmas mértékű áramimportra volt szüksége, ami a teljes európai

piacra is hatást gyakorolt⁹. A természeti hatásoknak való kitettség a klímaváltozás hatására azonban a többi tagállam piacán is hasonló kilengéseket okozhat a jövőben. Mindez persze ellentmondásos, hiszen a folyamatos termelést a fosszilis tüzelőanyagok jelentik, melyek időjárási anomáliákat generálnak, ezért fontos azok felhasználásának csökkentése. Az előbbieken tárgyalt néhány napot (2019.08.28-2019.09.02.) szemlélteti gráfként a 10-21-es ábra.

10-21. ÁBRA: 2019.08.28-2019.09.02. IDŐSZAKI GRÁFJA



forrás: saját szerkesztés

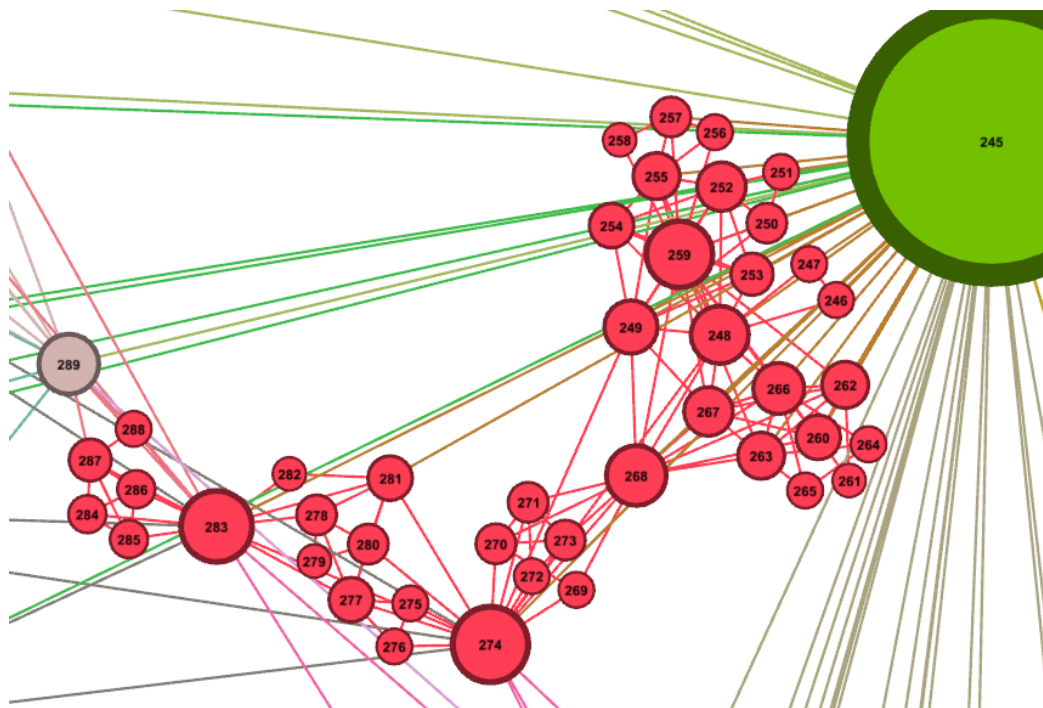
Mindemellett jól látható, hogy a 240. és a 245. nap között volt némi árcsökkenés, a legalacsonyabb ár a 242. napon következett be (ennek a pontnak a legmagasabb a fokszáma (5) az öt közrefogó HUB-ok között). Ezen felül az áramtermelés és elosztás minden szektorára nagy hatással van az időjárás és a hőmérsékletingadozás. Ezek a hatások együttesen ugyancsak árfelhajtó hatásúak. A magyar áramtőzsde árainak alakulására a hazai és határkereszteső piacok mellett a német áramtőzsde is hatást gyakorol. 2019. nyarán a német tőzsdén az áram ára átlagosan 55-65 EUR/MWh körül alakult, csaknem 20 euróval volt magasabb, mint a 2018. azonos időszakában. Ehhez a CO₂ kvótaárak nagymértékű emelkedése is hozzáadódott, amely ekkoriban 30 EUR/tonna értéken állt, míg egy évvel korábban mindösszesen 16 EUR/tonna értéken stagnált. A magas nyári átlaghőmérséklet pedig úgy csökkenti az áramtermelést, hogy

⁹ A norvég piac a hiányzó energiát ráadásul főként fosszilis tüzelőanyagokból előállított energiával pótolta, melyet a magas ETS CO₂ kvótaárak is terheltek, így nagy terhet rótt a fogyasztók végszámláira is.

a hőerőművekben használt hűtőközeg hőmérséklete is magasabb lesz, így azonos mennyiségű urán hasadásából vagy szén/gáz elégetéséből alacsonyabb mennyiségű áram állítható elő, mint a hidegebb évszakokban. A hűtővíz használatát emellett a környezetvédelmi rendeletek is szabályozzák, főként alacsony vízállás esetén, így az erőművek ezekben az időszakokban kénytelenek a termelésüket fokozatosan csökkenteni. Ennek eredményeképp 2019. nyarán a német és francia atomerőművek többségében kapacitáskorlátozást hajtottak végre, ami továbbgyűrűzött az árakban. Emellett a gáz ára az augusztus 26-szeptember 2. közötti időszakban 11%-ot emelkedett, ami az augusztus elején mért árnál közel 25%-kal magasabb.

Következőként tekintsük meg a piros klaszter összetételét (10-22. ábra). A gráfból kitűnik, hogy ezt az időszakot az időszak 245. napja és a 289. nap zárja közre. Ebben az időszakban – és egyúttal a klaszterben is – kisebb áringadozások voltak megfigyelhetőek, a 259., 274. és a 283. napon.

10-22. ÁBRA: 2019.09.03-2019.10.15. (246-288. NAP)



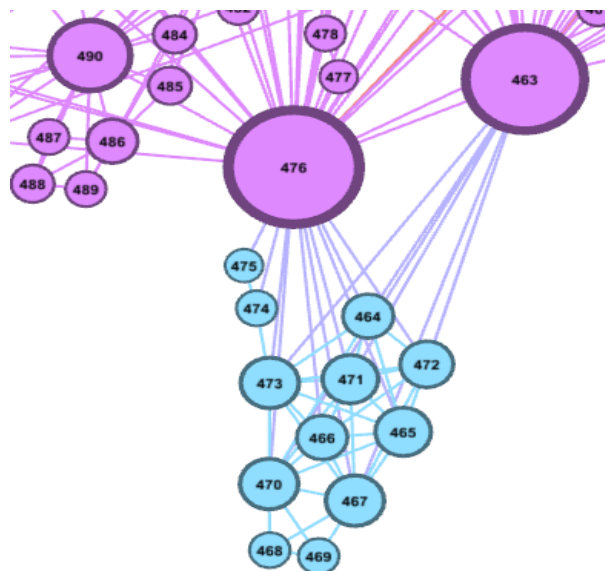
Forrás: saját szerkesztés

Ezeknek a kilengéseknek az egyik fő okozója, hogy elkezdődött az őszi fűtési időszak, azonban az időjárás szeszélyessége még erősen hatást gyakorolt a fogyasztásra. Az árak tulajdonképpen a megszokott intervallumban mozogtak az őszi időszakban. Ezt abból láthatjuk, hogy a piros klaszterben nem alakultak ki nagyobb HUB-ok. Ebben az időszakban a határkeresztező importmennyiségek csökkentek annak ellenére, hogy a hazai fogyasztás fokozatosan emelkedett. Az árakban ez két okból sem jelenik meg markánsan. Az áramár befolyásoló

fundamentumok árának csökkenése (szén, gáz, olaj) mérséklődtek, és a szén-dioxid kvótaár is minimálisan csökkent. A hazai piacon pedig a Paksi Atomerőmű, a Mátrai Erőmű blokkjai és a Dunamenti erőmű is magas kapacitáson termelt, ezzel kiegyensúlyozva a kereslet-kínálati viszonyokat hazánkban. Az októberi időszak a barna klaszter 289. napjával kapcsolódik az előző időszakhoz, valamint magas fokszámmal az időszak 301. napja (október 28.) is kiemelkedik, mint lokális maximum. Ebben az időszakban szintén az energiaimport csökkenése okozott piaci anomáliákat. Ezt követi a sötétzöld klaszter, amely teljes egészében lefedi az év végi ünnepi időszakot és az újév első néhány napját. Ebben az időszakban a MAVIR jelentései alapján a hideg téli időjárás és az ünnepi világítás miatti többletfogyasztás jelentkezik markánsan. Emellett a vállalati szektorban az ünnepek előtti többlettermelés, megnövekedett szolgáltatások iránti igény is árfelhajtó hatással bír az áramtözsde. Azonban az ünnepi időszak sem okozott nagyobb ártüskét a piacon. A klaszter egyik HUB csúcspontját a 2020.01.10. nap adja (a vizsgált időszak 375. napja, ld. 10-22. ábra!)

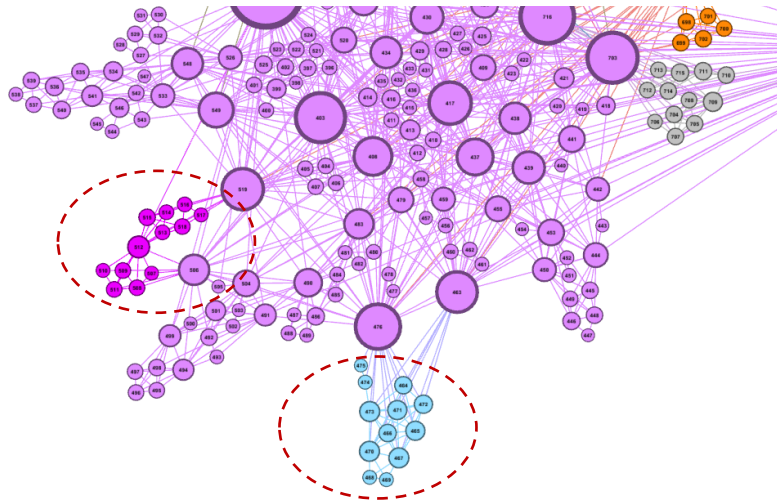
Vizsgáljuk meg azonban a teljes gráf egyik legfontosabb klaszterét, a rózsaszín csúcspont-halmazt (10-20. ábra), annak is az alsó részéhez csatlakozó részgráfot (20-23. ábra)!

10-23. ÁBRA: A COVID 19 JÁRVÁNY KORLÁTOZÁSAINAK ELSŐ IDŐSZAKA



forrás: saját szerkesztés

10-24. ÁBRA: A TELJES GRÁF RÓZSASZÍN KLASZTERE ÉS RÉSZHALMAZAI

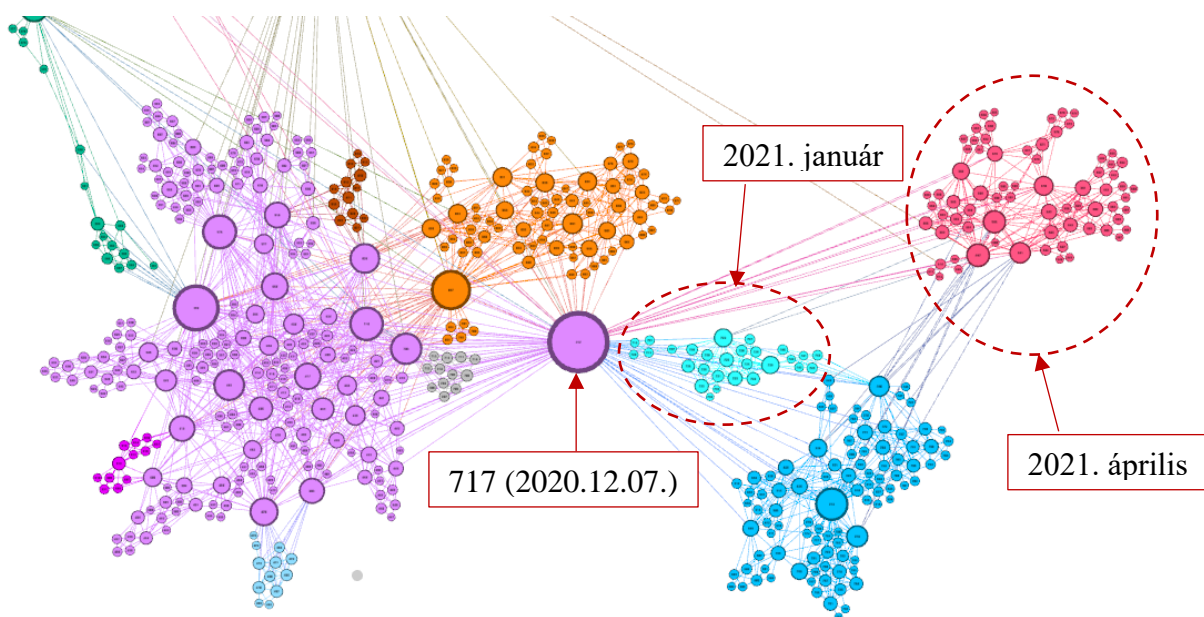


forrás: saját szerkesztés

A szürkés-kék részgráf jól látható módon kiválik a rózsaszín klaszterből. Ez az időszak a 2020.04.07-2020.04.20. közötti *első koronavírus járvány miatti korlátozások időszaka*. Ebben az időszakban drasztikusan csökkent az áramfogyasztás az országban, ami természetesen a kereslet beszűkülésével az ár csökkenését vonta maga után. Az év folyamán bekövetkező további korlátozások ugyancsak (részben) kiválnak a rózsaszín klaszterből (10-24. ábra).

Ezt követően érdemes a hálózat legnagyobb HUB-jára tekinteni, amely összefogja a teljes hálózatot, emellett a rózsaszín klaszter legnagyobb fokszámmal rendelkező tagja is egyben. Ez a csúcspont az időszak 717. napja, azaz 2020. december 17.

10-25. ÁBRA: 717. NAP: 2020. DECEMBER 17. AZ ÉV LEGMAGASABB MÁSNAPI ÁRA



forrás: saját szerkesztés

Az év végi időszakban nemzetközi szinten, főként a referenciapontnak számító német áramtőzsdén is kimagaslóan magasak voltak az áramárak, ám Magyarországon még ezeknél az áraknál is magasabbra lőtt az energiaár. Ilyen esetben már a gazdasági szereplők, főként a vállalkozások profitjára is hatással vannak az ilyen extremitások.

2020-ban Európában 39 EUR/MWh körüli átlagár alakult ki az árampiacon, az év folyamán viszonylag nyugodt, perzisztens jellegű mozgást mutatott. Az ilyen folyamatoknak az egyik legnagyobb előnye, hogy visszafogják a szénerőművek termelését még olyan országok esetében is, ahol nincs ezek korlátozására és bezárására irányuló célkitűzés, jogszabály. A piaci ár november elejéig a megszokott 40 EUR/MWh érték körül ingadozott, majd december 17-re elért a 103 EUR/MWh szintet, ami 250% drasztikus emelkedést jelent. Mivel ezen időszak alatt tombolt a Covid-19 világjárvány, így még inkább érdekesítő ezen extrém kiugrás mibenléte. Adott piaci körülmények között sem az olaj, sem más nyersanyagár nem volt képes ekkora szinten kilengeni, nem valószínű, hogy az okokat ezen a területen kellene keresni, azért sem, mert a HUPX napi klíringárai is tartósan ebben az ársávban maradtak (HUPX, 2022). Ami ugyancsak eltér a megszokottól, hogy a hétfői és ünnepnapok árak nem, vagy csak kis mértékben alacsonyabbak a hétköznapi átlagoktól. A határkereszteső kapacitások tekintetében a szlovák hálózattal való összeköttetés maximális terheltsége elmaradt az ilyen ártüskék idején megszokottól. Abban az esetben, ha a belföldi fogyasztás kimagasló és nem tudják a hazai erőművek teljes mértékben kielégíteni a hazai keresletet, a határkereszteső hálózaton importálnak áramot az országba. Jelen esetben azonban nem történt ilyesmi, pontosabban, nem jött akkora terhelés a hálózaton, mint ami indokolt lett volna. Ilyenkor *valamilyen piaci anomáliára, főként szándékos manipulációra* lehet gondolni, melynek kivizsgálása a Piacfelügyeleti Hatóság feladata. A manipuláció gyanúját az is erősíti, hogy annak ellenére, hogy a kereslet októbertől kezdve viszonylag magas volt, a kínált mennyiség gyakorta csökkent. A németországi árampiacot is érdemes megvizsgálni, hiszen regionális szempontból a magyar piacra tekintve ármeghatározó szereppel bír. A novemberi és decemberi időszakban az időjárás markánsan befolyásolta a megújuló energiaforrások termelését. A napsütéses órák száma alacsony volt és szélcsendes napok voltak jellemzőek (windfinder.com). Mindez lehetővé tette a fosszilis erőművek profitmaximalizáló termelési magatartását, ami magas árakat eredményezett, de *közel sem volt megfigyelhető olyan magas áremelkedés, mint a magyar piacon* (eex.com). Meg kell azonban jegyezni, hogy a német áramtőzsde sokkal inkább a tiszta versenyhez közelít, míg a magyar és a balkáni piac oligopol piaci jellemzőkkel bír.

A HUPX, mint regionális áramtőzsdei „HUB”, megtette a megfelelő lépéseket ez ügyben, jelezte a Piacfelügyeleti Hatóság felé a lehetséges manipuláció tényét (Brückner, 2020).

Az új év ismét piaci eseményekkel teli időszakot hozott az árampiac számára. 2021. január 8-án az egységes európai árampiac két részre szakadt egy átmeneti üzemzavar miatt. Ezt a kettéválást szemlélteti a következő ábra.

10-26. ÁBRA: AZ EURÓPAI PIAC ÜZEMZAVAR OKOZTA KETTÉSZAKADÁSA

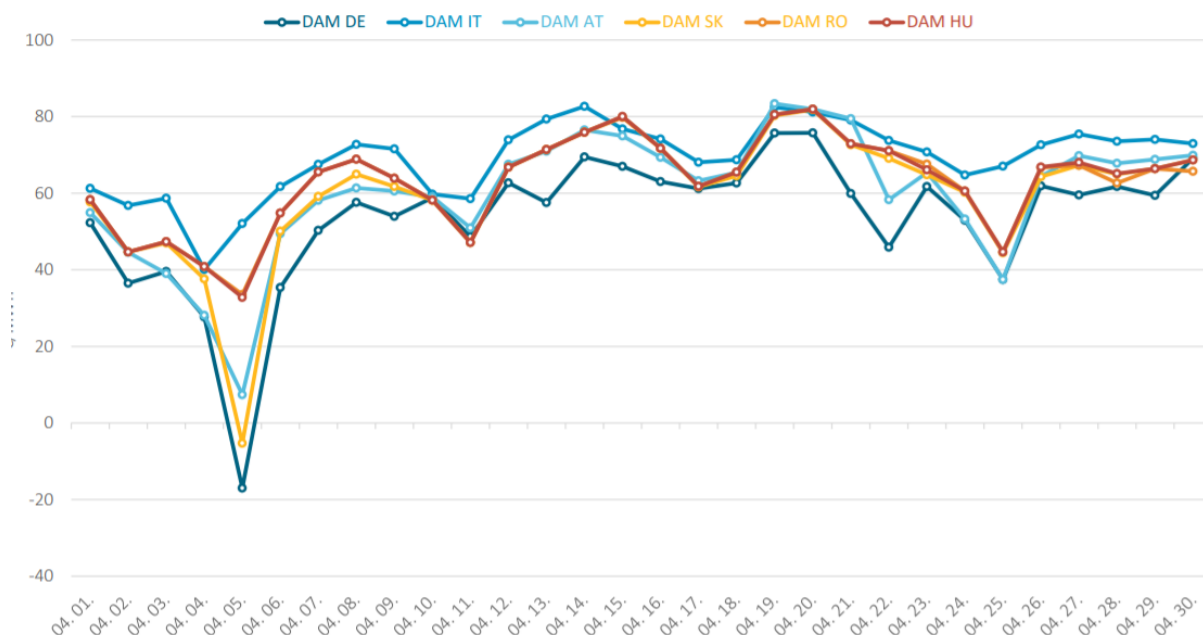


forrás: (HTE, 2021)

Ebben az időszakban az európai piacon a megújuló energiaforrások szélsőséges kilengései is bezavartak a piaci mechanizmusokba. A megújuló termelők kapacitásváltozásait nem lehet a lineárisan termelő nagyobb fosszilis erőművekkel ellensúlyozni, ezek kibocsátása csak fokozatosan növelhető vagy csökkenthető. A jövőben a nemlineáris technológiák és kiserőművek széleskörben történő telepítése adhat megoldást ezekre a problémákra.

Az áprilisi időszak ugyancsak külön klasztert alkot az időszaki gráfban (10-25. ábra piros klaszter). 2020-ban ugyanebben az időszakban magas keresletcsökkenés volt jellemző a piacra a járványügyi korlátozások miatt. Ehhez képest 2021. áprilisában az előző évihez viszonyítva közel 15%-os keresletnövekedés jelentkezett a piacon. Már ebben a hónapban megkezdődött az áram árának emelkedése, amely, mint azt látni fogjuk, júniustól még határozottabban jelentkezik. Már áprilisban megindultak a nyersanyagárak a világpiacon. Ezen időszak alatt a magyar naperőműparkok is nagy teljesítményen termeltek, melynek hatására megnőtt a határkeresztező hálózatok terheltsége, emelkedett az áramexport a környező országok felé.

10-27. ÁBRA: A RÉGIÓ DAM ÁRAI 2021. ÁPRILIS



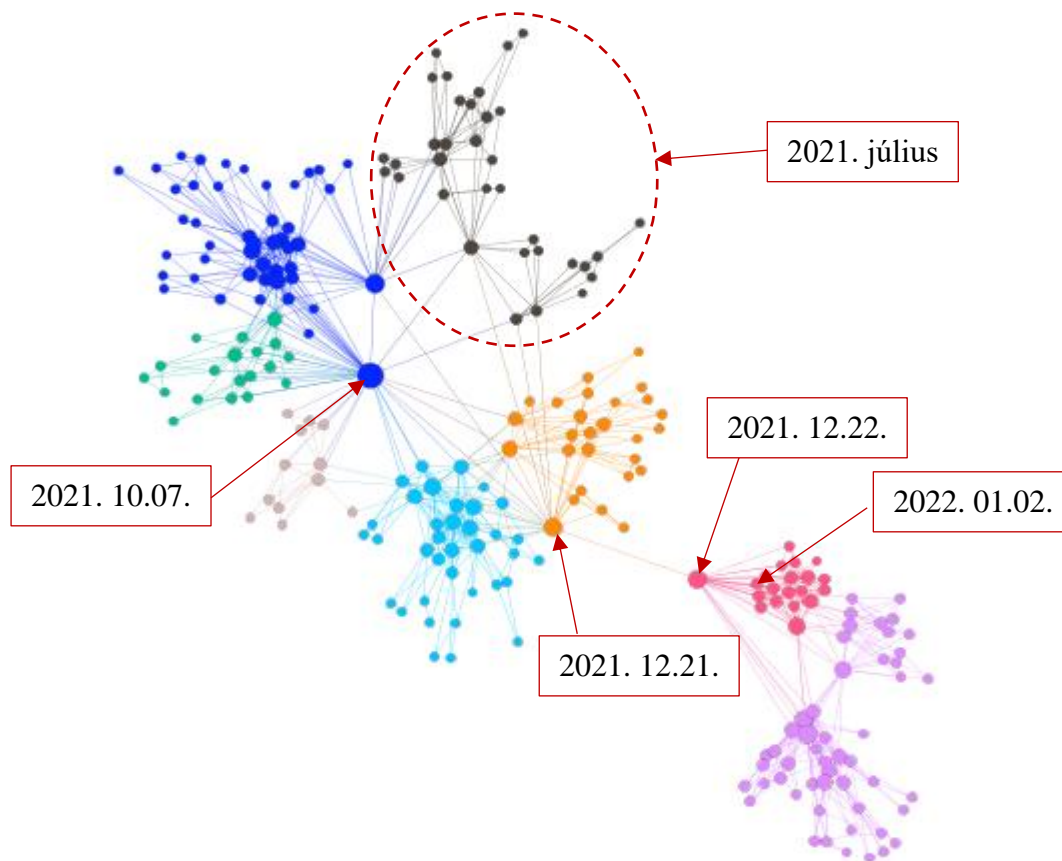
forrás: (MENERKO, 2021a)

A grafikonon jól kivehető, hogy a megújuló termelők a legmagasabb termelési kapacitást április 5-én érték el, ekkor az energia ára is visszaesett az alacsony termelési költségek miatt. Ezt követően azonban a fosszilis erőművek adták a régió termelésének magas hányadát, ami megemelte a piaci árakat és fent is maradtak a hónap során (MEKH, 2021). Ennek okán válik ki ez az időszak a láthatósági gráfban külön klaszterré.

10.4.2. A 2021.07.01. és 2022.03.03. közötti időszak

A korábban bemutatott 10-15. ábrán is látható volt, hogy ebben az időszakban markáns árnövekedés történt, amely az év végén teljesedett ki, majd erős beszakadás történt. Az idősor gráfként történő vizualizációját a 10-28-as ábra szemlélteti.

10-28. ÁBRA: A 2021.07.01. ÉS 2022.03.03. KÖZÖTTI IDŐSZAK LÁTHATÓSÁGI GRÁFJA



forrás: saját szerkesztés

2021. júliusában az elmúlt évek addigi legmagasabb fogyasztása volt megfigyelhető. Ebben az időszakban az atomerőművi termelés és a lignitégetésből nyert áramtermelés csökkent, a naperőművek kibocsátása és a gázturbinás termelés azonban emelkedett. A naperőművek által leadott energia a teljes termelés több mint 11%-át adta, a nukleáris energia az alacsonyabb kapacitású termelés ellenére is a hazai termelés közel 43%-át biztosította. A regionális piacon az árak újabb csúcsokat döntöttek. Az árnövekedés az energiahordozók világpiaci árának drasztikus drágulásából és a megújuló energiaforrások csökkenő termeléséből adódtak, mindemellett a markáns keresletnövekedés ugyancsak árfelhajtó hatást generált. Ezt az

időszakot a 10-28-as ábra szürke színű klasztere szemlélteti. Az időszakot a július 1-jét követően az augusztus 4-i addigi legmagasabb ár, mint lokális maximum szakítja meg.

A kék klaszter az augusztus 4-től október 7-ig tartó időszakot öleli fel. A magyar árampiacon az augusztusi időszakban a megszokottnál alacsonyabb szinten maradt a fogyasztás. Szeptemberben a piaci áremelkedés folytatódott, ami a megújuló energiaforrások, főként a vízerőművek alacsonyabb termelékenységének és a fosszilis energiahordozók világpiaci árának emelkedésével magyarázható. A regionális árampiacon a nukleáris termelőegységek kapacitása közel 25%-kal volt magasabb az egy évvel korábbi szinthez képest. A német áramtőzsdén az áremelkedés 56%-os szintre emelkedett augusztushoz képest, ami a további tényezőárak emelkedésével együtt a magyar piacra is begyűrűzött. Az osztrák piac is elvált a magyar áramtőzsde mozgásától, ami ugyancsak a megújuló áramtermelők, főként a vízerőművek alacsonyabb termelésével magyarázható. Mindemellett szeptemberben az áramár elérte az addigi történelmi csúcsát, ezek a kimagasló energiaárak a kék klaszter középpontjában csoportosuló magasabb fokszámú csúcspontokban figyelhetők meg, melyek mindegyike egy-egy magasabb árfolyammal bíró napot jelenítenek meg. Az októberi csúcspot – mint ártüske – a 7-én mért árszint képviseli, ennek értéke 270 EUR/MWh volt. A drágulás oka a már sokat emlegetett fosszilis tüzelőanyagok markáns drágulása és a megújuló energiaforrások csökkenő teljesítménye. *Ebben az időszakban a magyar piac leszakadt a régió piaci trendjeitől.* A szélerőművek termelése a német piacon drasztikusan visszaesett október 7-én, mindemellett a *szlovák-magyar határkereszteső kapacitás is szűk keresztmetszetet képezett a piacon*, ami tovább hajtotta az árakat, ártüskét okozva a tőzsdén. A magas októberi volatilitás a piacon a kék klaszter csúcspontjainak fokszámából is levezethető. *A fokszámok növekedésével a csúcspontok mérete arányosan növekszik.* Látható, hogy számos kisebb, alacsony fokszámmal rendelkező nap és – a többi klaszterhez viszonyítva – lényegesen több magas fokszámú csúcspot is található a klaszterben. Ez az árak ingadozásával, az pedig a világpiaci trendekkel magyarázható. A Menerko Kft. piaci auditjában arról számolt be, hogy a fosszilis tüzelőanyagok, azon belül a szén kínai piacon történő árkorlátozása és mennyiségi növekedése árcsökkenő hatást gyakorolt az európai energiapiacra. Ezzel egyidőben Oroszország magasabb gázexportot ígért Európa irányába, ami ugyancsak kedvezően hatott a piaci szereplőkre, azon belül a kereskedők várakozásaira (Menerko, 2021b). A pozitív piaci várakozások ezt követően nagy mértékben mérsékeltek a korábbi piaci ártüskét (10-28. ábra).

A továbbiakban folytatódott a magas volatilitású tendencia az áramtőzsdén, ami egészen december közepéig változatlanul kitartott. Ezt követően azonban újabb rekordokat döntött az energia ára, mellyel érdemes külön foglalkozni. A korábban összefoglalt tényezőárak emelkedésén túl a magyarországi energiafogyasztás közel 7%-kal emelkedett az előző év azonos időszakához viszonyítva. Ennek köszönhetően december 21-én újabb historikus csúcsot döntött az áramár, elérte a 420,14 EUR/MWh szintet. Ez az előző évi érték csaknem tizennégyszerese. Mindemellett a decemberi drágulás egyik oka, hogy a Paksi Atomerőmű egy blokkja az éves karbantartás miatt december 16-ig nem volt elérhető, a gázturbinás termelés aránya pedig nagymértékben emelkedett. A regionális piacon a drasztikus áremelkedést csak a németországi szélenergiaerőművek magasabb naponkénti termelése tudta mérsékelni, azonban amint ezek kapacitása csökkent, az árak ismét az egekbe kúsztak. Ebben az időszakban Magyarország nagymennyiségű áramot exportált az osztrák piacra, viszont amint az ausztriai megújuló termelők kapacitása megugrott, *importőrből exportőrré váltak* a régió piacán. Az ezen időszakban megfigyelhető magas volatilitásra és extrém magas árakra aligha lehet ésszerű magyarázattal szolgálni. A piaci trendek egyrészt a földgáz árának drasztikus emelkedésével magyarázhatók, mindemellett ilyen szenzitív időszakban az árak már a piaci hírekre is kiugróan reagálnak. A rekordmagas 21-i ár, december 22-re csupán 0,33 EUR/MWh-val mérséklődött, de ez a minimális csökkenés is elegendő ahhoz, hogy az általam alkalmazott algoritmus egy *újabb klasztert különítsen el*. Ez a 10-26-os ábrán a rózsaszín és lila klasztereket jelenti. Ezen időszakot követően a piacon markáns beszakadás volt megfigyelhető, az ár 2022. január másodikára 92 EUR/MWh szintre mérséklődött. Ez a hirtelen visszaesés a német szélenergiaerőművek ideiglenesen magas termelékenységére vezethető vissza, valamint az ünnepi időszak után a fogyasztás is mérséklődött mind a háztartások, mind pedig a vállalatok körében. Az időszakos visszaesést követően a piaci tendencia visszatért az emelkedő árak útjára és a magas volatilitás is megfigyelhető volt, amit az is elárul, hogy szerkezetében ezen időszakok klaszterei (március 3-ával bezárólag) közel azonosak a novemberi és decemberi időszakot felölelő klaszterek szerkezeti tulajdonságaival. Ezeket a tulajdonságokat a most következő alfejezetben kicsit részletesebben is kifejtem, rávilágítva azok speciális tulajdonságaira és jelentésükre.

A fenti kutatási eredményeim alapján pedig a fejezet elején felállított három hipotézis mindegyikét elfogadom, melyek alapján az alábbi három tézist tudom megfogalmazni:

Tézis₃: *A gráfokban kialakuló klaszterek segítségével meghatározhatók a vizsgált időszakban bekövetkező piaci események. Az időszakok egyes esetekben átfedésben vannak egymással, ennek hatására a klaszteren belül részhalmazok alakulnak ki.*

Tézis₄: *A klaszterek legmagasabb fokszámmal rendelkező csúcspontjai (HUB-ok) globális és lokális maximumértékeket jelölnek.*

Tézis₅: *Az a klaszter, amelyből nem emelhető ki egyértelműen magas fokszámú csúcspont, nyugodt piaci időszakot ölel fel alacsony volatilitással.*

Az 5-ös számú hipotézis esetében a HUB-ok hiányát magyarázza, hogy ezekben az időszakokban az eredeti idősorban a szóródási mérőszám értéke és a terjedelem is alacsony, ami a láthatósági gráfnál, mint láthatóságot befolyásoló tényező tükröződik. Ezen összefüggést támasztja alá a 8-as számú korrelációs táblázat is. A láthatósági gráfban az élsűrűség magas, az élek számának szórása azonban alacsony, ezért sem alakulnak ki központi szerepet betöltő csúcspontok a klaszterben.
















10.5. A KLASZTEREK BEN MÉRHE TŐ TOPO LÓGIAI MUTATÓ SZÁMOK STATISZTIKAI ÁTTEKINTÉSE

Ebben az alfejezetben a már korábban bemutatott láthatósági gráfokat vizsgálom meg klaszterenként és kísérletet teszek arra, hogy az előzőekben tárgyalt egyes áramtőzsei folyamatokat további mutatószámokkal is alátámasszam. *Kutatásom során azt tapasztaltam, hogy ilyen jellegű megközelítést az eddigiekben a témát érintő szakirodalmak egyike sem tárgyalt.* Előzetes vizsgálataim alapján az alábbi hipotézist állítom fel:

H₆: *Egy klaszter által határolt időszak árfolyamának extrém eseményeire és volatilitására a klaszterben mért átlagos fokszám mellett a fokszám szórásából is lehet következtetni.*









A klaszterek időbeli lehatárolása nem minden esetben hónapokra/napokra pontosan történik, illetve az időintervallumok közt átfedések is megfigyelhetők. Ennek oka, hogy egyes kisebb periódusok egy nagyobb klaszter részhalmazát képezik, esetenként egy magasan kiugró piaci megfigyelés a láthatósági gráfban későbbi alacsonyabb árakhoz kapcsolódik, ám sem közgazdaságtani, sem egyéb tudományos megközelítésben nem lenne indokolt az összekapcsoltság. Ugyanakkor a klaszterek elemszámaiba a részhalmazok elemszámait nem tartoznak bele, azok külön csoportként jelennek meg. Ezek az anomáliák a kidolgozott algoritmus tökéletlenségéből adódnak, melyek a jövőben további fejlesztést igényelnek. A következő (13-14.) táblázatok az egyes klaszterekben a fokszámok statisztikai mutatóit foglalják össze, jelölve a klaszterek színét, az általuk lefedett időszakokat és az elemszámot. A színek a korábban bemutatott láthatósági gráfokéval azonosak.

13. TÁBLÁZAT: A 2019.01.01-2021.06.30. KÖZÖTTI IDŐSZAK
 KLASZTEREINEK ÁTLAGOS FOKSZÁMA,
 AZOK SZÓRÁSA, ELEMSZÁMA ÉS SZÍNE

| <i>Időintervallum</i> | <i>Klaszter</i> | <i>Átlagos fokszám</i> | <i>Szórás</i> | <i>Elemsszám</i> | <i>Klaszterszín</i> |
|-------------------------|-----------------|------------------------|---------------|------------------|---|
| 019.01.01-2019.01.14. | 0 | 4.428571 | 1.840586 | 14 |  |
| 2019.01.15-2019.07.02. | 2 | 10.16667 | 12.11795 | 204 |  |
| 2019.07.03-2019.07.28. | 1 | 7.222222 | 5.50645 | 27 |  |
| 2019.07.29-2019.10.15. | 3 | 6.395349 | 4.519413 | 43 |  |
| 2019.10.16-2020.01.16. | 4 | 7.849462 | 6.193903 | 93 |  |
| 2020.01.17-2020.01.26. | 5 | 5.4 | 2.835489 | 10 |  |
| 2020.01.27-2020.12.17. | 11 | 10.69091 | 13.20359 | 164 |  |
| 2020.05.21-2020.06.01 | 6 | 4.916667 | 2.325881 | 12 |  |
| 2020.07.04.-2020.07.30. | 7 | 7.333333 | 4.876246 | 27 |  |
| 2020.08.01-2020.08.31. | 8 | 6.258065 | 4.173401 | 32 |  |
| 2020.09.01-2020.09.14. | 9 | 5.769231 | 2.454316 | 13 |  |
| 2020.09.15-2020.12.02. | 10 | 8.628205 | 8.369831 | 78 |  |
| 2020.12.03-2021.01.14. | 12 | 7.857143 | 4.733726 | 28 |  |
| 2021.01.15-2021.04.19. | 13 | 7.905263 | 6.513264 | 95 |  |
| 2021.04.20-2021.06.30. | 14 | 7.583333 | 6.324006 | 72 |  |

forrás: saját szerkesztés

14. TÁBLÁZAT: A 2021.07.01-2022.03.03. KÖZÖTTI IDŐSZAK
 KLASZTEREINEK ÁTLAGOS FOKSZÁMA,
 AZOK SZÓRÁSA, ELEMSZÁMA ÉS SZÍNE

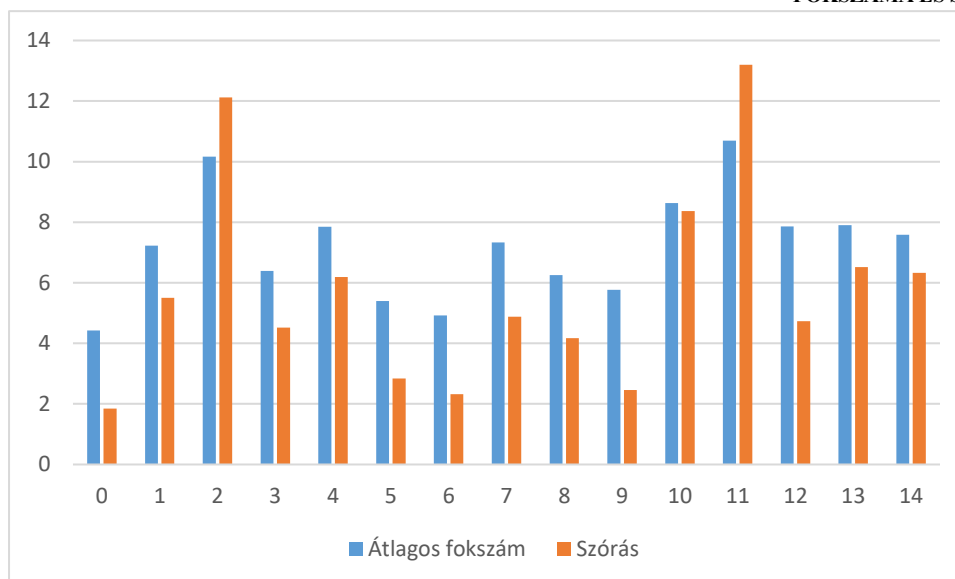
| <i>Időintervallum</i> | <i>Klaszter</i> | <i>Átlagos fokszám</i> | <i>Szórás</i> | <i>Elemszám</i> | <i>klaszterszín</i> |
|----------------------------|-----------------|----------------------------|---------------|-----------------|---|
| 2021.07.01- 2021.08.03. | 0 | 5.705882 | 3.519103 | 34 |  |
| 2021.08.04- 2021.09.15. | 1 | 9.326087 | 8.777576 | 46 |  |
| 2021.09.16- 2021.10.04. | 2 | 6.105263 | 3.726078 | 19 |  |
| 2021.10.05- 2021.10.03. | 3 | 4.833333 | 2.409472 | 12 |  |
| 2021.10.04- 2021.11.24. | 4 | 8.638889 | 6.214467 | 36 |  |
| 2021.11.25- 2021.12.21. | 5 | 7 | 5.721953 | 27 |  |
| 2021.12.22- 2022.02.12. | 6 | 8.769231 | 5.493406 | 52 |  |
| 2022.02.13- 2022.03.03. | 7 | 10.25 | 5.889609 | 20 |  |

forrás: saját szerkesztés

A 13-es táblázatból két klasztert érdemes kiemelni, a kettes és a tizenegyes számút. E két esetben az átlagos fokszámot meghaladó szórás mérhető. Mint arról korábban is írtam, a 2019.01.01-2021.06.30. közötti időszakban a 240. és a 245. napon, nevezetesen 2019.08.28-án és 2019.09.02-án szélsőséges kilengések történtek a piacon, valamint a nemzetközi áramtőzsdén egyaránt, ami folyamatosan begyűrűzött a magyar áramtőzsdére. *Ez folyamatos árkilengéseket és korrekciós időszakokat idézett elő.* Ennek hatására ebben a klaszterben fokozottan *megnőtt a magas fokszámmal rendelkező HUB-ok száma.* A magas volatilitás így azt eredményezte, hogy egyes időszakok a magas kilengés miatt távolabbra, míg a csillapodó, korrekciós napok csak közeli szomszédjaikra „láthatnak”. A tizenegyes klaszterben is hasonlóan magas volatilitás és kisebb ártüskék jelenléte igazolható. *Amikor a szórás értéke közel esik az átlaghoz, mérsékelt ingadozás figyelhető meg a tőzsdén. Az alacsony szórás pedig egyértelműen kevésbé változékony és kiszámítható tőzsdei kereskedésre enged következtetni,* jelen esetben nagyobb termelési kiesések vagy szélsőségesen megnövekvő keresleti időszakok nem mutatkoztak. Jellemzően ilyen időszak volt az egyes klaszter (201901.01-2019.01.14.)

A 2019.01.01-2021.06.30. közötti időszakban az átlag és szórás paramétereit grafikusán szemlélteti a 10-29. ábra.

10-29. ÁBRA: A 2019.01.01 ÉS 2021.06.30. KÖZÖTTI IDŐSZAK KLASZTEREINEK ÁTLAGOS FOKSZÁMA ÉS SZÓRÁSA



forrás: saját szerkesztés

Az első vizsgált ciklust követően a piaci árak növekedésnek indultak. Ennek egyik oka a világpiacra megjelenő nyersanyagárak emelkedése és különféle politikai intézkedések, események hatása, valamint a megújuló energiaforrások termelési kapacitásának csökkenése. Ez az időszak az általam második ciklusként jelölt 2021.07.01-2022.03.03. közötti időperiódus. Az azonosított klaszterek átlagos fokszámát és annak szórási értékeit a 13. táblázat tartalmazza. Szembetűnő, hogy ebben az időszakban nem alakult ki olyan klaszter, melyen belül az átlagértéket meghaladó szórás figyelhető meg, azonban az átlaghoz közel eső szóródási értékek igen. Ez az eset az egyes (pl. sötétkék) klaszterben jelenik meg, ahol az átlag és a szórás között mindössze 0.55 EUR/MWh az eltérés mértéke. A 2021.10.07-i nap választja el ezt az időszakot az őt követő további emelkedő ártól, mivel 7-én a németországi szélerőműpark hirtelen lecsökkenő kapacitása drasztikus áremelkedést okozott a piacon. A másik kiemelkedő periódus ebben az időszakban a 2021. december 21-i ártüske, amely az ötös klaszter részét képezi és egyben elválasztja a következő klasztertől. Ez a nap a klaszteren belül ugyancsak HUB-ként viselkedik. Ebben az esetben az átlag és a szórás közti eltérés ugyancsak alacsony, mindössze 1.28 EUR/MWh. Azokban az időszakokban, ahol a volatilitás kevésbé jelentős, a két érték közti eltérés 2.5 EUR/MWh vagy azt meghaladó érték figyelhető meg. Ez a határ azonban csak becslés, ennek meghatározása már túlmutat jelen értekezés keretein.

A korábbi piaci események áttekintése és a fenti statisztikai mutatók értékei alapján az alfejezet elején vázolt hipotézist elfogadom, melyek alapján a következő tézist fogalmazom meg.

Tézis₆: *Egy adott időszak árfolyamának extrém eseményeire az átlagos foksám mellett a foksám szórásából lehet következtetni. Az átlagtól szignifikánsan magasabb értékű szórás extrém kilengéseket jelez a tőzsdei idősorban. Mindemellett az átlaggal közel megegyező szóródási érték magas volatilitásra utal, ugyanakkor nem zárja ki az ártüskék létrejöttének hiányát egy adott időszakban. Olyan piaci periódusokban, ahol az átlagnál szignifikánsan alacsonyabb a szóródás mértéke, az extrém elmozdulások kizárhatóak.*

Végezetül megvizsgáltam a tíz vizsgált ország eredeti idősorainak és láthatósági gráftopológiáinak statisztikai összefüggéseit. A feltárt összefüggések jelen esetben csak a vizsgált országok eseteire érvényesek. Általános bizonyításukhoz a további kutatás elengedhetetlen, melyben eltérő tulajdonságokkal rendelkező, nagyobb számú (szimulált) idősorokon történő tesztelés szükséges. Ezeket a későbbiekben, tudományos közlemények formájában szeretném megjelentetni. Előzetesen azonban példaként szolgálhatnak a következő eredmények.

A vizsgált területi idősorok esetében az adatok szórása és a belőlük létrehozott láthatósági gráfok átlagos foksáma között pozitív irányú összefüggés mutatható ki. Ennek értelmében tehát, ha az árampiaci árak szórása 1 egységgel emelkedik, a hálózatban az átlagos foksám 0,35-tel nő. Ebből következik, hogy a szórás értékének emelkedése, ami a piac volatilitásával is összefüggésben áll, a korábban felvázolt láthatósági kritérium kapcsán az élek számának emelkedésével jár. Ez az összefüggés az egyes klasztereken belül is érvényes, statisztikai vizsgálatának eredménye az alábbi táblázatban látható. Az idősor megfigyelt értékeinek terjedelme és a foksámeloszlás ugyancsak pozitív korrelációban állnak egymással, ami a szórás kapcsán egyértelmű.

15. TÁBLÁZAT: AZ IDŐSOR SZÓRÁSÁNAK ÉS A GRÁF ÁTLAGOS FOKSZÁMÁNAK KAPCSOLATÁT VIZSGÁLÓ STATISZTIKÁK EREDMÉNYEI

| Analysis of Variance | | | | |
|----------------------|----|----------------|-------------|--------------------|
| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Ratio |
| Model | 1 | 0,5931666 | 0,593167 | 5,4099 |
| Error | 8 | 0,8771635 | 0,109645 | Prob > F |
| C. Total | 9 | 1,4703301 | | 0,0485* |

| Parameter Estimates | | | | |
|---------------------|-----------|-----------|---------|----------------|
| Term | Estimate | Std Error | t Ratio | Prob> t |
| Intercept | 3,0228523 | 2,163344 | 1,40 | 0,1999 |
| STD szórás | 0,3479781 | 0,149609 | 2,33 | 0,0485* |

forrás: saját szerkesztés

Az idősoros adatok szórása ugyanakkor a hálózatban mérhető átlagos útvonalhosszúsággal is szignifikáns kapcsolatban áll (16. táblázat).

16. TÁBLÁZAT: AZ IDŐSOR SZÓRÁSÁNAK ÉS A GRÁF ÁTLAGOS ÚTVONALHOSSZÚSÁGÁNAK KAPCSOLATÁT VIZSGÁLÓ STATISZTIKÁK EREDMÉNYEI

| Analysis of Variance | | | | |
|----------------------|----|----------------|-------------|--------------------|
| Source | DF | Sum of Squares | Mean Square | F Ratio |
| Model | 1 | 0,15292446 | 0,152924 | 6,3425 |
| Error | 7 | 0,16877754 | 0,024111 | Prob > F |
| C. Total | 8 | 0,32170200 | | 0,0399* |

| Parameter Estimates | | | | |
|---------------------|-----------|-----------|---------|----------------|
| Term | Estimate | Std Error | t Ratio | Prob> t |
| Intercept | 7,2362218 | 1,047654 | 6,91 | 0,0002* |
| SD | -0,181767 | 0,072175 | -2,52 | 0,0399* |

forrás: saját szerkesztés

Az eredeti megfigyelési értékek szórásának egységnyi emelkedése a hálózat átlagos útvonalhosszát 0,18 értékkel csökkenti ((8. táblázat) $r = 0,56$). Ennek kapcsán a szórás a hálózat központi elemeinek kialakulásához járulhat hozzá, amely rövidíti a hálózat útvonalhosszúságát, ezáltal az átmérőt. Mivel a központi elemek a hálózatban a klaszterek kialakulásának kulcstényezői, melyeket az eredeti idősor volatilitása (részben szórása) befolyásol az adatmagasság által, így ezek az eredmények szintén rávilágítanak a módszertan alkalmazhatóságának potenciáljára. A láthatósági gráf, mint láthattuk, a sok megfigyelést tartalmazó, időben hosszú folyamatok vizsgálatára alkalmas eljárás. A láthatósági gráf eljárás azonban szükségessé teszi, hogy az eredeti adatsor megfigyelései kötött sorrendben álljanak egymással (idősor).

ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A Price Coupling of Regions (PCR) az európai áramtőzsdék integrációját előmozdító projekt, amelynek célja egy egységes árcsatolási megoldás kidolgozása. A fokozatos integráció eredményeképp Európa-szerte kiszámíthatóbbá válnak a villamosenergia-árak, figyelembe véve az érintett hálózati elemek kapacitását. Ez döntő fontosságú a harmonizált európai villamosenergia-piacra vonatkozó átfogó uniós cél elérése érdekében. Az integrált európai villamosenergia-piac várhatóan növeli a likviditást, a hatékonyságot és a társadalmi jólétet. A projektbe azok az országok is csatlakozhatnak, melyek nem tagjai az Európai Uniónak. Jelenleg az összekapcsoltság a következő országok között valósult meg: Ausztria, Belgium, Cseh Köztársaság, Horvátország, Dánia, Észtország, Finnország, Franciaország, Németország, Magyarország, Olaszország, Írország, Lettország, Litvánia, Luxemburg, Hollandia, Norvégia, Lengyelország, Portugália, Románia, Szlovákia, Szlovénia, Spanyolország, Svédország és az Egyesült Királyság.

Disszertációmban a fenti országok közül Csehországot, Szlovákiát, Romániát, Magyarországot, Szlovéniát, Ausztriát, Németországot, Olaszországot, Franciaországot és Spanyolországot vizsgáltam. Az országok kiválasztásánál egyrészt figyelembe kellett vennem az áramtőzsdék integrációjához való csatlakozást és az elérhető adathalmazokat, azok struktúráját, valamint a határkeresztező kapacitások meglétét és annak átviteli képességét. Ez az egységes, regionális piaci megoldás a projekt gerincét képező közös informatikai rendszerre épül, amely összekapcsolja az áramtőzsdék által üzemeltetett helyi kereskedési rendszereket, valamint a biztosított határkeresztező átviteli kapacitást. Az egyik országban a piaci szereplők által adott megbízások az informatikai rendszerek elérhetőségén belül bármely más ország piaci szereplői által hasonló módon beadott megbízásokkal párosíthatók, amennyiben rendelkezésre áll az átviteli kapacitás. Ezt az integrációt láthattuk az idősorelemzés és a módosított átfedési mutatóról szóló fejezetben. Az egyes országok között erős együttmozgás volt megfigyelhető, mindazonáltal az anomáliák, árkilengések szinte azonnal begyűrűztek a hazai piacra is. Azon országok viszont, melyeknél a határkeresztező kapacitás még alacsony, kevésbé fejlett, vagy azok a területek, melyek piacán már magas arányban működnek megújuló forrásból termelő erőművek, az együttmozgás némileg alacsonyabb. Az első esetben a szűk keresztmetszetet az alacsony határkeresztező kapacitás okozza, míg a fejlett piacokon a megújuló erőforrások által okozott termelésingadozás okoz, melyeket a masszív, kevésbé rugalmas fosszilis termelőkapacitásokkal nehéz kiegyensúlyozni.

Doktori értekezésem új eredményei azonban leginkább az alkalmazott idősorelemzési eljáráshoz kapcsolódnak. A hálózatelmélet tudománya számos tudományterületen megjelent, ezt az interdiszciplinaritást fokozva az idősorelemzéshez is alkalmaztam, melynek során az idősorokból egy algoritmus segítségével gráfokat hoztam létre. Az eljárás alap gondolatát már korábban megalkották (Lacasa et al., 2008; Lacasa et al., 2009; Lacasa et al., 2012), ezt követően az eljárással azonban a szakirodalomban viszonylag keveset foglalkoztak, inkább a matematikai tulajdonságok gráfokba való átöröklődésével foglalkoztak, nem adtak azonban konkrét magyarázatot arra, hogy az egyes mutatószámok változásai milyen jelentéssel bírnak. Disszertációm eredményei ennek folyamán tovább viszik ezt a gondolatmenetet és választ adnak arra, hogy gazdasági és területi szempontok alapján milyen többletinformációkkal szolgálnak ezek a topológiai mutatószámok az egyes országok áramtőzsdei ársorok esetében. Pár mondatban összefoglalva tehát, a láthatósági gráf eljárást úgy kell elképzelni, hogy az idősorok minden egyes rekordját oszlopdiagramon ábrázoljuk, majd gondoljunk minden oszlopra egy-egy magas épületként. Amennyiben az egyik ilyen „épület” tetejére kiállunk, mely másik „épületeket” láthatjuk onnan egy kétdimenziós térben? Visszatérve az eredeti gondolatmenethez, ettől fogva azokat az időpontokat, melyek egymás számára láthatóak, tehát közük folytonos egyenes vonal húzható, összekapcsoljuk. Ők egy éllel összekapcsolt pontpárt alkotnak a létrejövő gráfban. *Ezen analógia mentén az egyes országok idősorainak gráfjai az eredeti idősorok számos tulajdonságait öröklik.* Ezzel az eljárással – mint azt a dolgozat korábbi részében tárgyaltam – a hosszú időintervallumot felölelő és sok rekordot tartalmazó idősorok egyszerűbben elemezhetőek és számos, nem triviális eredménnyel is szolgálnak. Az eljárást ezt követően először elméleti idősorokon, majd néhány európai ország áramtőzsdéjének ársorain teszteltem.

Az elméleti idősorok esetében rámutattam, hogy az eltérő adatstruktúrák más és más gráfszerkezethez vezetnek. Az idősorok monoton transzformációi nem okoznak változást a belőlük képződő gráfszerkezetekben, azonban *a nagyobb ad hoc változások megváltoztatják a hálózat topológiáját.* Bizonyos anomáliák, mint például az ártüskék, hirtelen áremelkedések, majd árzuhanások a gráfok szerkezetében is megjelennek, a globális és lokális ármaximumok pedig HUB-ként (magas fokszámmal rendelkező csúcspontként) jelennek meg a hálózatban. Az egyes ciklusok pedig klaszterekbe sűrűsödnek, melyek segítségével különböző piaci események és azok időtartamai lehatárolhatók az eredeti adathalmazban is.

Az eljárás a térbeli eltérések és azonosságok vizsgálatára is alkalmas, mivel a különböző piacokon mért adatok – ha azok korrelációja alacsony – eltérő hálózati struktúrával

rendelkeznek. Kutatásom eredményei alapján azonban a vizsgált országok áramtözsdeinek ársorai magasfokú korrelációt, ebből adódóan pedig közel azonos szerkezeti struktúrát mutattak. Néhány topológiai mérőszámomban azonban még így is felfedeztem eltéréseket, melyek a következő tényezőkből adódtak:

- az energiamix arányainak eltérései az egyes országokban;
- a fejlett piacokon a megújuló energiaforrások időjárásnak való kitettségei;
- a határkeresztező kapacitások eltérő értékei;
- az egyes régiók fosszilis tüzelőanyaggal működő erőműveinek alacsony rugalmassága;
- a franciaországi piacon a magas atomenergia által biztosított áram aránya;
- a spanyolországi piac fotovoltaikus és szélenergia kapacitásának magas aránya;
- eltérő politikai reformmintázatok;
- különböző csoportosulások a PCR területi integráción belül, pl. 4MMC.

Az egyes országok piacán az átlagos fokszám a különböző események időbeliségéről ad információt. Azokban az országokban, ahol az atomenergia (Franciaország, Szlovákia, Szlovénia) vagy a megújuló energia részaránya magasabb, ott az átlagos fokszám és az élek száma is csupán kismértékben emelkedik feljebb az átlagtól. Átlagtól alacsonyabb értéket csak a véletlen folyamat sorozatában tudtam kimutatni, ami arra utal, hogy a fokszám-mérőszámok jól jellemzik a piacot az extrém elmozdulások, ártüskék jelenlétéről vagy hiányáról. Az átlagostól lényegesen magasabb fokszám és átlagos fokszámértéket mutató piacok túlnyomórészt fosszilis tüzelőanyagból nyerik az energiát, amelynek áringadozásai viszont extrém kilengéseket okoznak.

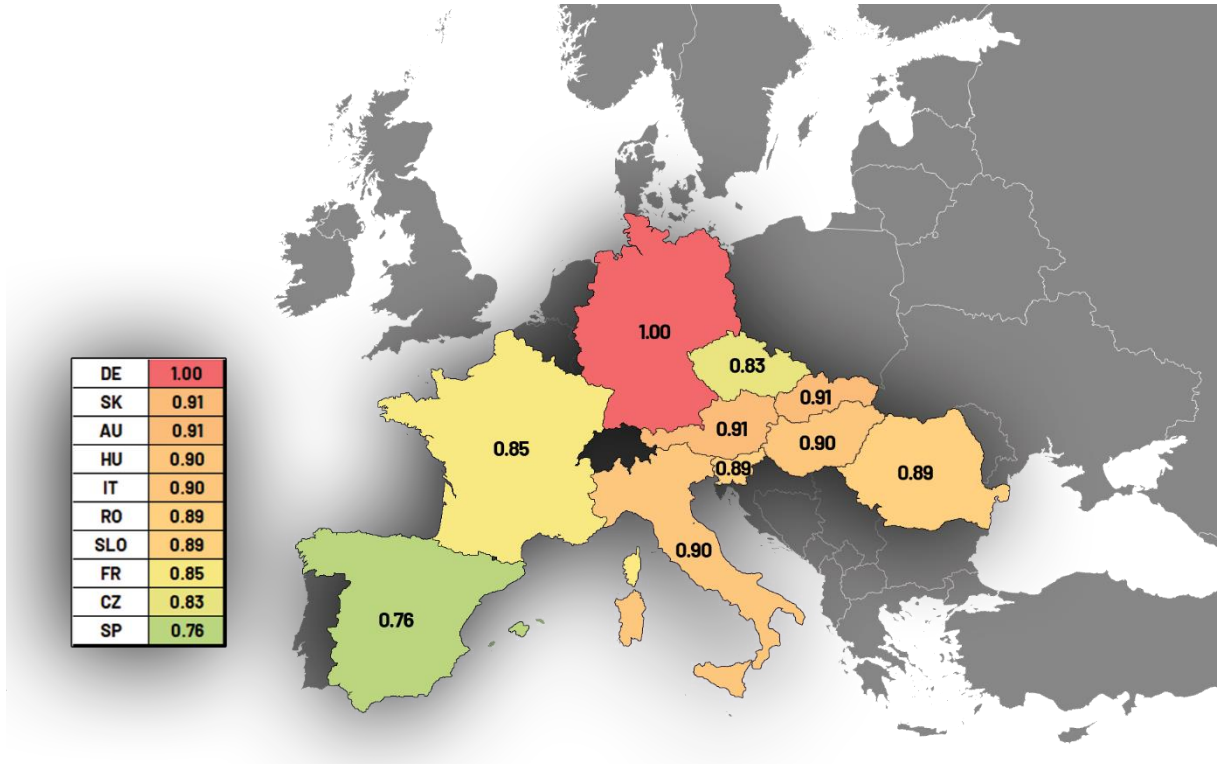
A gráfokban mért átlagos útvonalhosszúság a területi idősorok volatilitásáról és extrém eseményeiről árulkodnak. Az átlagos fokszámmal szemben ez a mutató fordított analógiában működik. Azokon a piacokon, ahol kevesebb extrém esemény figyelhető meg, a gráfokban található HUB-ok száma is alacsonyabb. Ennek folyamán az átlagos útvonalhosszúság megnő. A magasabb volatilitású, illetve több kilengést mutató piacokon ez az útvonalhosszúság lerövidül, kisebb értéket vesz fel. Az átlagos útvonalhosszúság pedig a skálafüggetlenséggel is összekapcsolható. A fokszámeloszlás a legtöbb esetben skálafüggetlenségre utalt, lecsengése hatványfüggvénnyel írható le a legjobban. Ilyen esetben néhány HUB kapcsolja össze a hálózatok egyes klasztereit, melyek egy-egy kisebb időszakot ölelnek fel, ez a megállapítás adja értekezésem következő újszerű eredményét.

A következő lépés gráfokban kialakuló klaszterek vizsgálata volt. *A megfigyelt területeken a klaszterezettségi együtthatók nagyon kis mértékben különböznek egymástól, ugyanakkor a klaszterek számában már nagyobb heterogenitás figyelhető meg.* Az egyes klaszterek általában eg-egy nagyobb piaci esemény köré csoportosulnak. Az általam alkalmazott algoritmus főként a pozitív irányba kialakuló magas értékekre érzékeny, ezért a klaszterek az ilyen események körül alakultak ki. Az egyes klaszterek HUB-jai lokális maximumértékeket képviseltek, a teljes gráfban megfigyelhető HUB-ok pedig globális maximumértéket detektálnak.

Az asszortativitás értéke, mint topológiai mutatószám főként a piacok fejlettségétől függ. A vizsgált piaci szerkezetekből adódóan a hálózatok döntő többsége asszortatív, néhány – főként a kisebb, kevésbé fejlett piacok – esetében azonban disszortatív jelleg mutatható ki. Asszortativitás esetében a magas fokszámú csúcspontok főként ugyancsak magas fokszámú pontokhoz kapcsolódnak, disszortativitás esetében ez a kapcsolódás a magas fokszámú csúcspontok esetében gyakran alacsony fokszámmal keveredik.

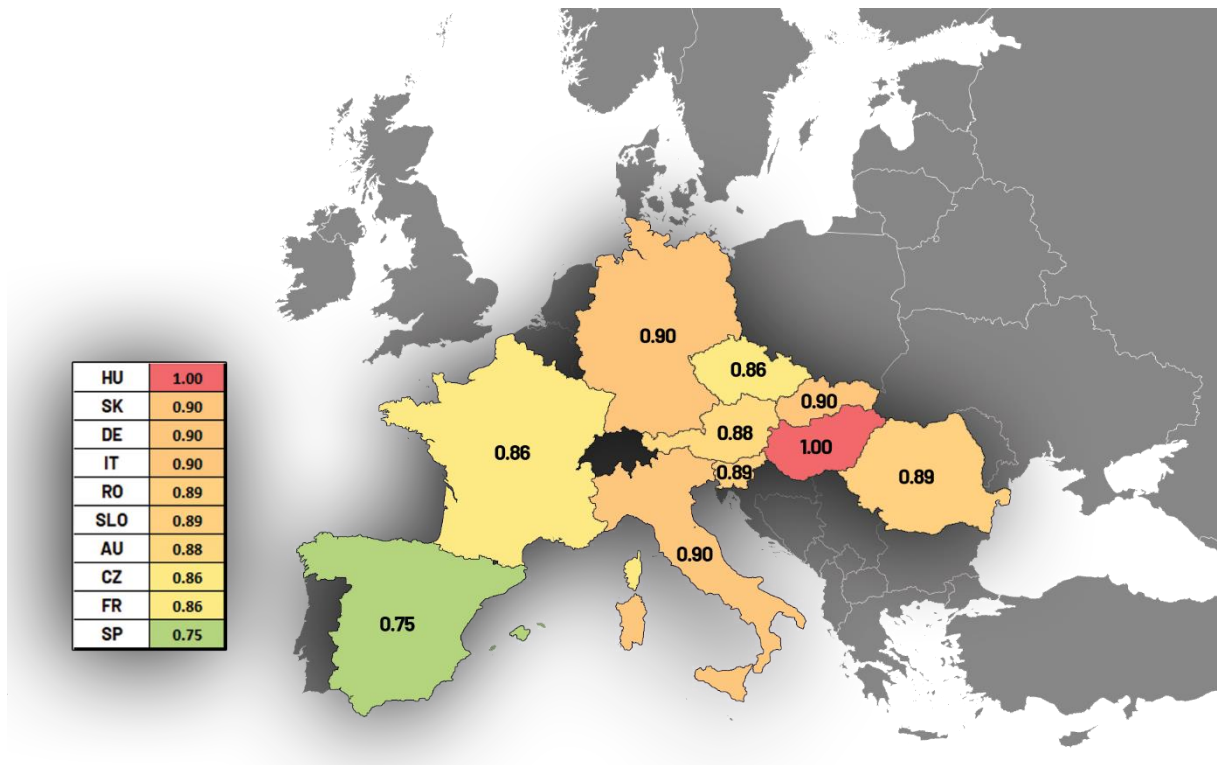
A gráfokkal foglalkozó tanulmányok a hálózatok összehasonlítására a Jaccard hasonlósági együtthatót alkalmazzák. Értekezésemben némileg módosítottam ezen mutatószám elgondolásán, melynek fő indoka, hogy a hagyományos Jaccard-hasonlóság számításakor az egyes eloszlásfüggvények elfedik egymást. A számítási módszert az R szoftverben módosítottam oly módon, hogy a viszonyítás alapja mindig a kisebb halmaz (vizsgálatom esetében *az eloszlás területe*) legyen, mivel a különbözőség mértéke épp a két hálózat eloszlásfüggvényének különbségéből adódik. A hasonlósági mátrix alapján létrehoztam egy térképet, amely azt mutatja meg, hogy az egyes országok áramtőzsdéi milyen mértékben mozognak együtt. Mivel a regionális árampiac benchmark-ja általában a német áramtőzsde, ezért az első esetben a hasonlóság mértékét a németországi piac képezte. A második esetben – mivel a HUPX magyar áramtőzsde egyre inkább ármeghatározó szereppel bír – a magyarországi piac képezte a viszonyítás alapját.

ÖSSZ. 0-2. ÁBRA: ÁTFEDÉSI EGYÜTTHATÓK ÉRTÉKEI (VISZONYÍTÁSI ALAP NÉMETORSZÁG)



forrás: saját szerkesztés

ÖSSZ. 0-1. ÁBRA: ÁTFEDÉSI EGYÜTTHATÓK ÉRTÉKEI (VISZONYÍTÁSI ALAP MAGYARORSZÁG)



forrás: saját szerkesztés

Az átfedési együttható értékeiből látható, hogy a két eltérő viszonyítási alappal rendelkező térkép szinte azonos értékeket jelenít meg az egyes területeken. Ez egyrészt igazolja, hogy *a magyarországi áramtőzsde is meghatározó szereppel bír a regionális áramtőzsdén, másrészt a területi összekapcsoltság okán, magas együttmozgás figyelhető meg az árakban.*

A magasfokú integráltság és együttmozgás jelenléte miatt ezt követően a láthatósági algoritmussal a magyarországi HUPX áramtőzsde adatait vizsgáltam meg tüzetesebben. Ezen vizsgálat során megbizonyosodhattam arról, hogy egy efféle, sok megfigyelést tartalmazó idősor esetében az időszakok lehatárolása lényegesen egyszerűbbé válik a gráfként való ábrázolást követően, mint kétdimenziós diagramként ábrázolva. A gráfként ábrázolt idősorok esetében megjeleníthetővé váltak az egyes napok, a kiemelkedő események, az egyes piaci anomáliák, azok felfutási és lecsengési időszakai, illetve az extrém kilengések.

JAVASLATOK

A vizsgált árampiacok tekintetében az európai regionális áramtőzsdén a magyar HUPX energiatőzsde valósította meg a negyedik legmagasabb kereskedési volument Németország, Olaszország és Franciaország után. Így a jövőben – amennyiben megfelelő adatmennyiség áll majd rendelkezésre az átfogó kutatáshoz – *javasolt lehet a kelet-európai, illetve a balkáni régió árampiacának vizsgálata is.* Várhatóan a közeljövőben tovább bővül az európai integrációs projekthez kapcsolódó országok köre, ugyanis több ország (Bulgária, Horvátország, Szerbia) szorosabb összefonódását tervezi a nyugat-közép-európai hálózattal, ugyanakkor egyes területek még energiaágazatuk strukturális reformjának különböző szakaszaiban vannak. *A délkelet-európai régió és a nyugat-balkáni országok európai integrációs törekvései az EU belső piacának peremén elfoglalt helyzete miatt geopolitikai és energiapolitikai szempontból kiemelt jelentőségűek.* Az európai energiapiacok folyamatosan összefonódnak és egyre inkább kölcsönösen függenek egymástól az ellátás biztonságának biztosítása érdekében, ám ezeknek az országoknak az energiaágazata még jelentős fragmentáltságot mutat az irányadó szabályozás és a piaci felépítés tekintetében, melyre szükségeszerű még inkább odafigyelni. A megújuló források által generált termelés kilengéseinek csillapítása további piacfejlesztést igényel, melyek egyik megoldását az egyre terjedő kiserőművek jelenthetik, azonban ezeknek is fontos jellemzője lesz *a területi egyenlőtlenség és a hálózati kapacitások regionális eltérése.*

Az idősorok láthatósági gráfként történő elemzését tekintve a jövőben ennek továbbfejlesztésében nagy potenciált vélek felfedezni. Az egyik legérdekesebb lehetőség, hogy az idősorból létrehozott gráfot a csúcspontok közt lévő időintervallum alapján *súlyozzam*. A piacon eltelt idő az adott információ jelentőségének csökkenéséhez vezet, aminek analógiája jól alkalmazható a gráf súlyozásához, valamint a „visszatekintés” időtartamának lehatárolása is indokoltnak tűnik szakmai szempontból.

Mindemellett az idősorok sajátosságaiból adódó hálózati topológiák mélyebb megértését is szükségesnek látom. A topológiai mérőszámok differenciáltsága jó eszköz lehet a *területi különbségek feltárásához* is. Célszerű létrehozni további generált idősorokat, melyek eltérő zajt, hiányzó értéket és egyéb tulajdonságokat tartalmaznak. Mindez hozzájárulhat az így kapott mérőszámok mélyebb megértéséhez és az azokból történő információk levonásához. A piaci periódusok élethűbb szimulációja is további információkkal szolgálhat. Érdeemesnek látom olyan idősorok létrehozását, melyek az idősorok csúcserkéihez tartozó „hullámzások” fel- és lefutás idejét különböző intenzitással ábrázolják.

A gráfelemzést érdemes lehet kevert sorozatokon is tesztelni. Ez az eljárás értelemszerűen megőrzi a sűrűségfüggvény tulajdonságait, de megszünteti a korrelációt az adatok között. Ebben az esetben vélhetően a frakcionált Brown mozgáshoz hasonló eredményekhez juthatok majd, ugyanakkor eleget tudok tenni azon kritikáknak is, melyek a véletlen bolyongás alkalmazásának mellőzését javasolják a piaci folyamatok vizsgálata esetében. Ezeknek a kevert sorozatokból generált gráfoknak az eredeti idősorból létrehozott gráfok struktúrájával való összevetése ugyancsak új eredményekre vezethetnek, leginkább a fokszámeloszlások tekintetében. Ennek tesztelésére a Kolmogorov-Smirnov tesztet tartom érdemesnek alkalmazni, melynek nullhipotézise jelen esetben az alábbi módon lenne megfogalmazható: *Az eredeti és a kevert idősorból létrehozott gráf topológiája (fokszámeloszlása) azonos* (lehetőség szerint skálafüggetlen). Így tehát a hálózatelmélet egy újabb területre integrálható, erősítve annak multidiszciplináris jellegét.

IRODALOMJEGYZÉK

1. Abate, A. G., Riccardi, R., & Ruiz, C. (2021). Contracts in electricity markets under EU ETS: A stochastic programming approach. *Energy Economics*, 99, 105309.
2. ACER (2021). ACER Market Monitoring Report 2020 – Electricity Wholesale Market Volume. Annual Report on the Results of Monitoring the Internal Electricity and Natural Gas Markets in 2020. European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators
3. Albertsen, L. H., Andersen, M., Boscán, L. R., & Santos, A. Q. (2020). Implementing dynamic electricity taxation in Denmark. *Energy Policy*, 143, 111543.
4. Alhagyan, M. (2022). The effects of incorporating memory and stochastic volatility into GBM to forecast exchange rates of Euro. *Alexandria Engineering Journal*, 61(12), 9601-9608.
5. Allen-Perkins, A., Pastor, J. M., & Estrada, E. (2017). Two-walks degree assortativity in graphs and networks. *Applied Mathematics and Computation*, 311, 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.05.025>
6. Anderson, P. W. (1972). More is different. *science*, 177(4047), 393-396.
7. Asghar, Z. (2008). Energy-GDP relationship: a causal analysis for the five countries of South Asia. *Applied Econometrics and International Development*, 8(1).
8. Azevedo, I. M. L., Morgan, M. G., & Lave, L. (2011). Residential and regional electricity consumption in the US and EU: How much will higher prices reduce CO2 emissions?. *The Electricity Journal*, 24(1), 21-29.
9. Bajo-Buenestado, R., & Cahan, D. (2015). Unification of Oligopolistic Markets for a Homogeneous Good in the Presence of an Antitrust Commission. *Journal of Industry, Competition and Trade*, 15(3), 239-256.
10. Barabási, A.-L. (2013). Network science. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(1987), 20120375.
11. Barabási, A.-L., & Bonabeau, E. (2003). Scale-free networks. *Scientific american*, 288(5), 60-69.
12. Barrat, A., & Weigt, M. (2000). On the properties of small-world network models. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 13(3), 547-560.
13. Bartek-Lesi, M., Mezősi, A., Pató, Z., Szabó, L., & Szajkó, G. (2019). Megújulóenergia-felhasználás Magyarországon. *Vezetéstudomány/Budapest Management Review*, 50, 46-60.
14. Blagrove, P., & Furceri, D. (2021). The macroeconomic effects of electricity-sector privatization. *Energy Economics*, 105245.
15. Blanco, M. I., & Rodrigues, G. (2008). Can the future EU ETS support wind energy investments?. *Energy Policy*, 36(4), 1509-1520.
16. Boersen, A., & Scholtens, B. (2014). The relationship between European electricity markets and emission allowance futures prices in phase II of the EU (European Union) emission trading scheme. *Energy*, 74, 585-594.
17. Bollobás, B., Riordan, O., Spencer, J., & Tusnády, G. (2011). The degree sequence of a scale-free random graph process. In *The Structure and Dynamics of Networks* (pp. 384-395). Princeton University Press.
18. Bouchaud, J.-P., & Potters, M. (2000). *Theory of financial risks (Vol. 4)*. Cambridge University Press, Cambridge From Statistical Physics to Risk
19. Božić, Z., Dobromirov, D., Arsić, J., Radišić, M., & Ślusarczyk, B. (2020). Power Exchange Prices: Comparison of Volatility in European Markets. *Energies*, 13(21), 5620.

20. Bringezu, S., Schütz, H., Steger, S., & Baudisch, J. (2004). International comparison of resource use and its relation to economic growth: The development of total material requirement, direct material inputs and hidden flows and the structure of TMR. *Ecological economics*, 51(1-2), 97-124.
21. Brożyna, J., Strielkowski, W., Fomina, A., & Nikitina, N. (2020). Renewable energy and eu 2020 target for energy efficiency in the Czech Republic and Slovakia. *Energies*, 13(4), 965.
22. Brückner, G. (2020). Meglepő áramárakkal zárult 2020: manipuláció történt? <https://telex.hu/gazdasag/2020/12/29/meglepo-aramarakkkal-zarult-2020-manipulacio-tortent>, Letöltve 2022.02.05.
23. Butler, E. (2018). Conclusion: Central and eastern European energy security—more than Russia. In *Understanding Energy Security in Central and Eastern Europe* (pp. 222-231). Routledge.
24. Bye, T., & Hope, E. (2005). Deregulation of electricity markets: the Norwegian experience. *Economic and Political Weekly*, 5269-5278.
25. Castagneto-Gissey, G. (2014). How competitive are EU electricity markets? An assessment of ETS Phase II. *Energy Policy*, 73, 278-297.
26. Čeryová, D., Turčeková, N., Svetlanská, T., Kapustová, Z., & Ďurišová, E. (2018): Renewable energia market in V4 countries. *International scientific days 2018*.
27. Chen, H., Liu, Z., Zhang, Y., & Wu, Y. (2020). The linkages of carbon spot-futures: evidence from EU-ETS in the third phase. *Sustainability*, 12(6), 2517.
28. Chowdhuri, S., Iacobello, G., & Banerjee, T. (2021). Visibility network analysis of large-scale intermittency in convective surface layer turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 925.
29. Clauset, A., Newman, M. E., & Moore, C. (2004). Finding community structure in very large networks. *Physical Review E*, 70(6), 066111.
30. Cohen, N., Dimitrov, D., Krakovski, R., Skrekovski, R., & Vukašinović, V. (2010). On Wiener index of graphs and their line graphs. *MATCH Communications in Mathematical and in Computer Chemistry*, 64(3), 683-698.
31. Costanza, R., Kubiszewski, I., Giovannini, E., Lovins, H., McGlade, J., Pickett, K. E., ... & Wilkinson, R. (2014). Development: Time to leave GDP behind. *Nature News*, 505(7483), 283.
32. Csák, L. (2015). Energiapolitika: minden területi szinten. *Tér és Társadalom*, 29(4), 79-90.
33. Csereklyei, Z., & Stern, D. I. (2015). Global energy use: Decoupling or convergence?. *Energy Economics*, 51, 633-641.
34. Csipkés, M. (2019). A magyar villamosenergia piac alakulása napjainkban. *Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok*, 14(2), 137-149.
35. da Silva, P. P., & Cerqueira, P. A. (2017). Assessing the determinants of household electricity prices in the EU: a system-GMM panel data approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1131-1137.
36. Davis, M., & Etheridge, A. (2006). Louis Bachelier's Theory of speculation. URL: <https://f-origin.hypotheses.org/wp-content/blogs.dir/1596/files/2014/12/Mark-Davis-Talk.pdf>.
37. Delcey, T. (2019). Samuelson vs fama on the efficient market hypothesis: The point of view of expertise. *Æconomia. History, Methodology, Philosophy*(9-1), 37-58.
38. Dhamija, A. K., Yadav, S. S., & Jain, P. K. (2018). Volatility spillover of energy markets into EUA markets under EU ETS: a multi-phase study. *Environmental Economics and Policy Studies*, 20(3), 561-591.

39. Durrett, R. (2019). Probability: theory and examples (Vol. 49). Cambridge university press.
40. Dusek T. (2004). A területi elemzések alapjai. ELTE Regionális Földrajzi Tanszék. Regionális Tudományi Tanulmányok 10. 2004. p. 245
41. Dyson, F. J. (1962). A Brownian-motion model for the eigenvalues of a random matrix. *Journal of Mathematical Physics*, 3(6), 1191-1198.
42. EC (2021): Quartely report on European Electricity Markets. Market Observatory for Energy. DG Energy. Volume 13 (issue 4, fourth quarter of 2020). https://ec.europa.eu/energy/data-analysis/market-analysis_hu (2021. 07. 08.)
43. EC (2021b). Quartely report on European Electricity Markets. Market Observatory for Energy. DG Energy. Volume 14 (issue 2, second quarter of 2021). Brüsszel – Belgium
44. eex.com. www.eex.com.
45. Erdős, P., & Rényi, A. (1959). On random graphs. *Publicationes Mathematicae*, 6, 290-297.
46. Erdős, P., & Rényi, A. (1960). On the evolution of random graphs. *Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci*, 5(1), 17-60.
47. Esen, Ö., & Bayrak, M. (2017). Does more energy consumption support economic growth in net energy-importing countries?. *Journal of Economics, Finance and Administrative Science*.
48. Espejo-Marín, C., & Aparicio-Guerrero, A. E. (2020). La producción de electricidad con energía solar fotovoltaica en España en el siglo XXI. *Revista de Estudios Andaluces*, 39, 66-93.
49. Estrada, E. (2011). Combinatorial study of degree assortativity in networks. *Physical Review E*, 84(4), 047101.
50. Estrada, E. (2012). *The structure of complex networks: theory and applications*. Oxford University Press.
51. Eurostat (2021): Electricity prices for household consumers, second half 2020 (EUR per kWh). https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics (2021.06.28.)
52. EXAA (2017): Annual Report 2017. EXAA Abwicklungsstelle für Energieprodukte AG, Bécs <https://www.exaa.at/uber-exaa/uber-das-unternehmen/> (2021. 07. 06.)
53. EXAA (2020): EXAA 2020. EXAA Abwicklungsstelle für Energieprodukte AG. Palais Liechtenstein, Alserbachstraße 14-16, 1090 Wien
54. Fabók, M. (2015). Az áramellátás nagy átrendeződése és a területpolitika kihívásai. *Tér és Társadalom*, 29(4), 91-96.
55. Fan, X., Li, X., Yin, J., Tian, L., & Liang, J. (2019). Similarity and heterogeneity of price dynamics across China's regional carbon markets: A visibility graph network approach. *Applied Energy*, 235, 739-746. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.007>
56. Fina, B., Roberts, M. B., Auer, H., Bruce, A., & MacGill, I. (2021). Exogenous influences on deployment and profitability of photovoltaics for self-consumption in multi-apartment buildings in Australia and Austria. *Applied Energy*, 283, 116309.
57. Freeman, L. C., Roeder, D., & Mulholland, R. R. (1979). Centrality in social networks: II. Experimental results. *Social networks*, 2(2), 119-141.
58. Gács I. (2015): Gazdasági növekedés és klímaváltozás. *Magyar Energetika*, 2015/3.
59. Gáspár, B., & Závecz, Á. (2011). Villamosenergia-árak a liberalizált rendszer keretei között. *Hitelintézeti Szemle*, 10(1), 70-88.
60. Gawlik, L., Szurlej, A., & Wyrwa, A. (2015). The impact of the long-term EU target for renewables on the structure of electricity production in Poland. *Energy*, 92, 172-178.

61. Gerőcs L., Vancsó Ö. (szerk.) (2016). *Matematika*. Akadémiai Kiadó. <https://doi.org/10.1556/9789630597678>. (Letöltve: 2022. 11. 19. https://mersz.hu/hivatkozas/m97m_chap24_level1_sec24.1_p4/#m97m_chap24_level1_sec24.1_p4)
62. Gerse, K. (2014). Villamosenergia-piacok. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. Gépészmérnöki Kar.
63. Gilbert, E. N. (1959). Random graphs. *The Annals of Mathematical Statistics*, 30(4), 1141-1144.
64. Gnatowska, R., & Moryń-Kucharczyk, E. (2019). Current status of wind energy policy in Poland. *Renewable Energy*, 135, 232-237.
65. Granero, M. S., Segovia, J. T., & Pérez, J. G. (2008). Some comments on Hurst exponent and the long memory processes on capital markets. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387(22), 5543-5551.
66. Grau-Carles, P. (2001). Long-range power-law correlations in stock returns. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 299(3-4), 521-527.
67. Greene, M. T., & Fielitz, B. D. (1977). Long-term dependence in common stock returns. *Journal of Financial Economics*, 4(3), 339-349.
68. Gsodam, P., Rauter, R., & Baumgartner, R. J. (2015). The renewable energy debate: how Austrian electric utilities are changing their business models. *Energy, Sustainability and Society*, 5(1), 1-12.
69. Gürtler, K., Postpischil, R., & Quitzow, R. (2019). The dismantling of renewable energy policies: The cases of Spain and the Czech Republic. *Energy Policy*, 133, 110881.
70. Haffner, T. (2018). A magyar energiapolitika geopolitikai aspektusai= Geopolitical aspects of hungary's energy policy. *Közép-Európai Közlemények*, 11(3), 40-57.
71. Haffner, T. (2018). A megújuló energia termelés támogatásának intézményi változásai= a Megújuló Energia Támogatási Rendszer bevezetése= Institutional changes in support for renewable energy production-introduction of renewable energy support scheme. *Közép-Európai Közlemények*, 11(2), 17-29.
72. Hage, P., & Harary, F. (1995). Eccentricity and centrality in networks. *Social networks*, 17(1), 57-63.
73. Haluzan, M., Verbič, M., & Zorić, J. (2020). Performance of alternative electricity price forecasting methods: Findings from the Greek and Hungarian power exchanges. *Applied Energy*, 277, 115599.
74. Hasson, U., Iacovacci, J., Davis, B., Flanagan, R., Tagliazucchi, E., Laufs, H., & Lacasa, L. (2018). A combinatorial framework to quantify peak/pit asymmetries in complex dynamics. *Scientific Reports*, 8(1), 3557. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21785-0>
75. Hein, O., Schwind, M., & König, W. (2006). Scale-free networks. *Wirtschaftsinformatik*, 48(4), 267-275.
76. Hirth, L., Ueckerdt, F., & Edenhofer, O. (2016). Why wind is not coal: On the economics of electricity generation. *The Energy Journal*, 37(3).
77. Holttinen, H., Meibom, P., Orths, A., Lange, B., O'Malley, M., Tande, J. O., & Van Hulle, F. (2011). Impacts of large amounts of wind power on design and operation of power systems, results of IEA collaboration. *Wind Energy*, 14(2), 179-192.
78. Hortay, O., & Szőke, T. (2019). Keresleti ár rugalmasság becslése a magyar villamosenergia-piacon. *Közgazdasági Szemle*, 66(7-8), 788-804.
79. Hortay, O., & Víg, A. A. (2020). Potential effects of market power in Hungarian solar boom. *Energy*, 213, 118857.
80. Humphries, M. D., & Gurney, K. (2008). Network 'Small-World-Ness': A Quantitative Method for Determining Canonical Network Equivalence. *PloS one*, 3(4), e0002051. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002051>

81. HUPX DAM (2020): HUPX DAM Annual Report 2020. HUDEX Hungarian Derivative Energy Exchange, Budapest <https://hupx.hu/en/market-data/dam/regular-reports#> (2021. 07. 06.)
82. HUPX IDM (2020): HUPX IDM Annual Report 2020. Hungarian Derivative Energy Exchange, Budapest <https://hupx.hu/en/market-data/id/regular-reports> (2021. 07. 06.)
83. HUPX. (2022). ID - Piaci adatok. <https://hupx.hu/hu/piaci-adatok/id/piaci-adatok>, Letöltve 2022.02.02.
84. Iacobello, G., Ridolfi, L., & Scarsoglio, S. (2021). Large-to-small scale frequency modulation analysis in wall-bounded turbulence via visibility networks. *Journal of Fluid Mechanics*, 918.
85. IEA (2016): Energy Policy Review – Czech Republik. International Energy Agency
86. IEA (2017): Energy Policy Review – Hungary. International Energy Agency
87. IEA (2020a): Energy Policy Review – Austria. International Energy Agency
88. IEA (2020b): Electricity Market Report. – December 2020. International Energy Agency
89. Igbinoia, F. O., Fandi, G., Muller, Z., Svec, J., & Tlustý, J. (2017, June). Effect of improved electricity product development on the business performance of a public electricity transmission company. In 2017 IEEE PES PowerAfrica (pp. 46-51). IEEE.
90. IqtiyaniIham, N., Hasanuzzaman, M., & Hosenuzzaman, M. (2017). European smart grid prospects, policies, and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 776-790.
91. IR2-AUTO
92. Janda, K. (2018). Slovak electricity market and the merit order effect of photovoltaics. CAMA Working Paper 22/2018
93. Janda, K., & Koscova, M. (2018). Photovoltaics and the Slovak electricity market (No. 02/2018). IES Working Paper.
94. Janicek, F., Sedivy, J., & Sulc, I. (2012). OKTE, as-central data metering warehouse. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/130/43130938.pdf (2021.06.20.)
95. Jin, X. (2016). The impact of 2008 financial crisis on the efficiency and contagion of Asian stock markets: A Hurst exponent approach. *Finance Research Letters*, 17, 167-175.
96. Joskow, P. L. (2008). Lessons learned from electricity market liberalization. *The Energy Journal*, 29(Special Issue# 2).
97. Jouvet, P. A., & Solier, B. (2013). An overview of CO2 cost pass-through to electricity prices in Europe. *Energy Policy*, 61, 1370-1376.
98. Kácsor, E., Kerekes, L., & Mezősi, A. (2019). Egy sikeres piacnyitás története? Liberalizáció a magyar villamosenergia-szektorban. Is it a history of a successful market opening? Liberalization in the Hungarian electricity sector. *Vezetéstudomány-Budapest Management Review*, 50(ksz.), 19-31.
99. Kaenzig, J., Heinzle, S. L., & Wüstenhagen, R. (2013). Whatever the customer wants, the customer gets? Exploring the gap between consumer preferences and default electricity products in Germany. *Energy Policy*, 53, 311-322.
100. Kamiński, J. (2009). The impact of liberalisation of the electricity market on the hard coal mining sector in Poland. *Energy Policy*, 37(3), 925-939.
101. Kath, C., & Ziel, F. (2018). The value of forecasts: Quantifying the economic gains of accurate quarter-hourly electricity price forecasts. *Energy Economics*, 76, 411-423.
102. Keppler, J. H., & Mansanet-Bataller, M. (2010). Causalities between CO2, electricity, and other energy variables during phase I and phase II of the EU ETS. *Energy Policy*, 38(7), 3329-3341.

103. Kerekes S. (2007): A környezetgazdaságtan alapjai. AULA Kiadó, Budapest
104. Kerekes, L., Szörényi, G., & Diallo, A. (2019). Volt és van feszültség. *Vezetéstudomány/Budapest Management Review*, 50, 4-18.
105. Kim, K.-H., Yun, S., Kim, N.-U., & Ri, J.-H. (2019). Pricing formula for European currency option and exchange option in a generalized jump mixed fractional Brownian motion with time-varying coefficients. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 522, 215-231.
106. Kiss, G. D. (2017). Volatilitás, extrém elmozdulások és tőkepiaci fertőzések. Szeged, JATEPress Kiadó.
107. Komorowska, A. (2019). Cross-border exchange of electricity between Poland and the neighboring countries. *Polityka Energetyczna*, 22.
108. Koop, G. (2008). Közgazdasági adatok elemzése. Osiris.
109. Kökény, L., & Hortay, O. (2020). A villamosenergia-fogyasztás elhalasztásával kapcsolatos lakossági attitűd felmérése Magyarországon. *Közgazdasági Szemle*, 67(7-8), 657-687.
110. König, D. (1936). *Theorie der endlichen und unendlichen Graphen: Kombinatorische Topologie der Streckenkomplexe* (Vol. 16). Akademische Verlagsgesellschaft mbh.
111. Kristoufek, L., & Lunackova, P. (2013). Long-term memory in electricity prices: Czech market evidence. arXiv preprint arXiv:1309.0582.
112. Kulcsár, B. (2019). The Kötelező átvételi rendszerben benyújtott naperőmű létesítési igények, megvalósulásának hatása a magyarországi településállomány villamosenergia-ellátására. *International Journal of Engineering and Management Sciences*, 4(2), 54-60.
113. Kundu, S., Opris, A., Yukutake, Y., & Hatano, T. (2021). Extracting correlations in earthquake time series using visibility graph analysis. *Frontiers in Physics*, 9, 179.
114. Lacasa, L., Luque, B., Ballesteros, F., Luque, J., & Nuno, J. C. (2008). From time series to complex networks: The visibility graph. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(13), 4972-4975. <https://www.pnas.org/content/105/13/4972>
115. Lacasa, L., Luque, B., Luque, J., & Nuno, J. C. (2009). The visibility graph: A new method for estimating the Hurst exponent of fractional Brownian motion. *EPL (Europhysics Letters)*, 86(3), 30001.
116. Lacasa, L., Nunez, A., Roldán, É., Parrondo, J. M., & Luque, B. (2012). Time series irreversibility: a visibility graph approach. *The European Physical Journal B*, 85(6), 1-11.
117. Lang, K. O., & Westphal, K. (2020). Russia and the European Union—The Changing Role of Energy. *The Russian Economy*, 75.
118. Leuthold, F. U., Weigt, H., & von Hirschhausen, C. (2012). A large-scale spatial optimization model of the European electricity market. *Networks and spatial economics*, 12(1), 75-107.
119. Lieskovský, M., Trenčiansky, M., Majlingová, A., & Jankovský, J. (2019). Energy Resources, Load Coverage of the Electricity System and Environmental Consequences of the Energy Sources Operation in the Slovak Republic—An Overview. *Energies*, 12(9), 1701.
120. Liu, J., Cheng, C., Yang, X., Yan, L., & Lai, Y. (2019). Analysis of the efficiency of Hong Kong REITs market based on Hurst exponent. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 534, 122035.
121. Lo, A. W. (1991). Long-term memory in stock market prices. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1279-1313.
122. Lo, A. W. (1991). Long-term memory in stock market prices. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1279-1313.

123. Long, Y. (2013). Visibility graph network analysis of gold price time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 392(16), 3374-3384.
124. Malkiel, B. G. (2003). The efficient market hypothesis and its critics. *Journal of economic perspectives*, 17(1), 59-82.
125. Malvaldi, A., Weiss, S., Infield, D., Browell, J., Leahy, P., & Foley, A. M. (2017). A spatial and temporal correlation analysis of aggregate wind power in an ideally interconnected Europe. *Wind Energy*, 20(8), 1315-1329.
126. Mandelbrot, B. B., & Hudson, R. L. (2005). *The (mis) behavior of markets: a fractal view of risk, ruin, and reward*. Basic Books.
127. Mandelbrot, B. B., & Van Ness, J. W. (1968). Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM review*, 10(4), 422-437.
128. Mantegna, R. N., & Stanley, H. E. (1999). *Introduction to econophysics: correlations and complexity in finance*. Cambridge university press.
129. Märkle-Huß, J., Feuerriegel, S., & Neumann, D. (2018). Large-scale demand response and its implications for spot prices, load and policies: Insights from the German-Austrian electricity market. *Applied energy*, 210, 1290-1298.
130. Marks-Bielska, R., Bielski, S., Pik, K., & Kurowska, K. (2020). The importance of renewable energy sources in Poland's energy mix. *Energies*, 13(18), 4624.
131. Marossy, Z. (2010). *A spot villamosenergia-árak elemzése statisztikai és ökonofizikai eszközökkel= Analysis of spot electricity prices using statistical and econophysical methods Budapesti Corvinus Egyetem*].
132. Marossy, Z. (2011). A villamos energia áralakulásának egy új modellje (A new model for price movement in electric power). *Közgazdasági Szemle*, 58(3), 253-274.
133. Marzband, M., Javadi, M., Pourmousavi, S. A., & Lightbody, G. (2018). An advanced retail electricity market for active distribution systems and home microgrid interoperability based on game theory. *Electric Power Systems Research*, 157, 187-199.
134. Meeus, L., Purchala, K., & Belmans, R. (2005). Development of the internal electricity market in Europe. *The Electricity Journal*, 18(6), 25-35.
135. MEKH. (2021). A magas naperőművi termelés miatt Magyarország exportálni is tudott áprilisban. <http://www.mekh.hu/a-magas-naperomuvi-termeles-miatt-magyarorszag-exportalni-is-tudott-aprilisban>, letöltve 2022.03.01.
136. MENERKO. (2021a). Villamos energia piaci beszámoló - 2021. 04. <https://www.menerko.hu/hirek/854-villamos-energia-piaci-beszamoló-2021-04>, letöltve 2022.02.08.
137. Menerko. (2021b). Villamos energia piaci beszámoló - 2021. 10. <https://www.menerko.hu/hirek/874-villamos-energia-piaci-beszamoló-2021-10>, letöltve 2022.03.05.
138. Mezősi, A., Felsmann, B., Kerekes, L., & Szabó, L. (2020). Coexistence of nuclear and renewables in the V4 electricity system: Friends or enemies?. *Energy Policy*, 140, 111449.
139. Milstein, I., & Tishler, A. (2012). The inevitability of capacity underinvestment in competitive electricity markets. *Energy Economics*, 34(1), 62-77.
140. Minárik, M. (2014). *Energy Cooperation in Central Europe: Interconnecting the Visegrad Region*. Occasional Paper. Energy Charter Secretariat Knowledge Centre.
141. Mirza, F. M., & Bergland, O. (2012). Pass-through of wholesale price to the end user retail price in the Norwegian electricity market. *Energy Economics*, 34(6), 2003-2012.
142. Mulder, M., & Willems, B. (2019). The Dutch retail electricity market. *Energy policy*, 127, 228-239.
143. Nemes Nagy J. (2009). *Terek, helyek, régiók: A regionális tudomány alapjai*. Akadémiai Kiadó.

144. Newman, M. E. (2002). Assortative mixing in networks. *Physical Review Letters*, 89(20), 208701.
145. Newman, M. E. J. (2002). Assortive mixing in networks. *Physical Review Letters*, 89, 208701-208704.
146. Newman, M., Barabási, A.-L., & Watts, D. J. (2011). *The structure and dynamics of networks*. Princeton university press.
147. Nudell, T. R., Annaswamy, A. M., Lian, J., Kalsi, K., & D'Achiardi, D. (2019). Electricity markets in the United States: a brief history, current operations, and trends. In *Smart Grid Control* (pp. 3-27). Springer, Cham.
148. Ocker, F., & Jaenisch, V. (2020). The way towards European electricity intraday auctions—Status quo and future developments. *Energy Policy*, 145, 111731.
149. OECD (2002): Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth
150. Ohtsuki, H., Hauert, C., Lieberman, E., & Nowak, M. A. (2006). A simple rule for the evolution of cooperation on graphs and social networks. *nature*, 441(7092), 502-505.
151. OKTE (2020): Annual Report 2020. OKTE, a.s., Pozsony, <https://www.okte.sk/en/information/annual-reports/> (2021. 07. 06.)
152. Opsahl, T., & Panzarasa, P. (2009). Clustering in weighted networks. *Social networks*, 31(2), 155-163.
153. Ostrowski, W. (2020). The Twenty Years' Crisis of European Energy Security: Central and Eastern Europe and the US. *Geopolitics*, 1-23.
154. Pacce, M. J., Sánchez Burgos, I., & Suárez-Varela Maciá, M. C. (2021). El papel del coste de los derechos de emisión de CO₂ y del encarecimiento del gas en la evolución reciente de los precios minoristas de la electricidad en España. *Documentos Ocasionales/Banco de España*, 2120.
155. Panzarasa, P., Opsahl, T., & Carley, K. M. (2009). Patterns and dynamics of users' behavior and interaction: Network analysis of an online community. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 60(5), 911-932.
156. Pasricha, P., & He, X.-J. (2022). Skew-Brownian motion and pricing European exchange options. *International Review of Financial Analysis*, 82, 102120.
157. Pastor-Satorras, R., Vázquez, A., & Vespignani, A. (2001). Dynamical and correlation properties of the internet. *Physical Review Letters*, 87(25), 258701.
158. Piwowar, A., & Dzikuć, M. (2019). Development of renewable energy sources in the context of threats resulting from low-altitude emissions in rural areas in Poland: A review. *Energies*, 12(18), 3558.
159. Popovska, E., & Gospodinov, M. (2019). Computation of Time Series Scaling Exponent for Electricity Prices Forecasting. *Proceedings of the 20th International Conference on Computer Systems and Technologies*,
160. Prabakaran, S., Garcia, I. C., & Mora, J. U. (2020). A temperature stochastic model for option pricing and its impacts on the electricity market. *Economic Analysis and Policy*, 68, 58-77.
161. PXE (2019): Annual Report 2019. Power Exchange Central Europe A.S., Prága <https://www.pxe.cz/dokument.aspx?k=Vyrocni-Zpravy&language=english> (2021. 07. 06)
162. PXE (2020): Annual Report 2020. Power Exchange Central Europe A.S., Prága <https://www.pxe.cz/dokument.aspx?k=Vyrocni-Zpravy&language=english> (2021. 07. 06)
163. Rathmann, M. (2007). Do support systems for RES-E reduce EU-ETS-driven electricity prices?. *Energy policy*, 35(1), 342-349.

164. Ravasz, E., & Barabási, A.-L. (2003). Hierarchical organization in complex networks. *Physical Review E*, 67(2), 026112.
165. Red Eléctrica de España - Electricity interconnections; https://www.ree.es/sites/default/files/electricity_interconnections_eng.pdf (letöltve: 2022. 11. 22.)
166. Rejichi, I. Z., & Aloui, C. (2012). Hurst exponent behavior and assessment of the MENA stock markets efficiency. *Research in International Business and Finance*, 26(3), 353-370.
167. REKK. (2010). A tervezett villamos energia erımővi kapacitások hatása a villamosenergiapiac vertikumára 2025-ig. Regionális Energiagazdasági Kutatóközpont, Budapesti Corvinus Egyetem. https://gvh.hu/data/cms1000642/7_BCE%20REKK_Tanulm%C3%A1ny.pdf
168. Rollert, K. E. (2018). The underlying factors in the uptake of electricity demand response: The case of Poland. *Utilities Policy*, 54, 11-21.
169. Rossi, M., & Gunardi, A. (2018). Efficient market hypothesis and stock market anomalies: Empirical evidence in four European countries. *Journal of Applied Business Research (JABR)*, 34(1), 183-192.
170. Sasse, J. P., & Trutnevyte, E. (2020). Regional impacts of electricity system transition in Central Europe until 2035. *Nature communications*, 11(1), 1-14.
171. Shah, D., & Chatterjee, S. (2020). A comprehensive review on day-ahead electricity market and important features of world's major electric power exchanges. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30(7), e12360.
172. Shen, C. (2017). An analysis for features of geospatially rescaled range analysis method and spatial scaling behavior. *Nonlinear Dynamics*, 89(1), 243-254.
173. Shivakumar, A., Dobbins, A., Fahl, U., & Singh, A. (2019). Drivers of renewable energy deployment in the EU: An analysis of past trends and projections. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100402.
174. Shuai, C., Chen, X., Wu, Y., Zhang, Y., & Tan, Y. (2019). A three-step strategy for decoupling economic growth from carbon emission: empirical evidences from 133 countries. *Science of the total environment*, 646, 524-543.
175. Si, R. K., & Bishi, B. (2020). Forecasting short term return distribution of S&P BSE stock index using Geometric Brownian motion: An evidence from Bombay stock exchange. *Int. J. Stat. Syst*, 15(1), 29-45.
176. Siddi, M. (2020). EU-Russia energy relations. M. Knodt and J. Kemmerzell, *Handbook of Energy Governance in Europe*, Springer, 1-25.
177. Simonsen, I. (2003). Measuring anti-correlations in the Nordic electricity spot market by wavelets. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 322, 597-606.
178. Singh, A., Frei, T., Chokani, N., & Abhari, R. S. (2016). Impact of unplanned power flows in interconnected transmission systems—Case study of Central Eastern European region. *Energy Policy*, 91, 287-303.
179. Somossy Éva – Tóth Tamás (2015): Joint Renewable Energy Support Schemes in the Visegrád Countries. In: Oritz – Somogyvári – Varjú – Fodor – Lechtenböhmer: *Perspectives of Renewable Energy in the Danube Region*. 125–138. o. Institute for Regional Studies Centre for Economic and Regional Studies Hungarian Academy of Sciences, Pécs.
180. Slusarczyk, B., Brzezinski, S., & Kot, S. (2013). Electricity Market Liberalization in Poland and Romania. *Metalurgia International*, 18(11), 31.
181. Smirnov, I. (2021). *Visegrad 4 States and Russian Gas Dilemma: Between Politics and Commercial Interests of Energy Companies* (Doctoral dissertation, Central European University).

182. Sorin, E., Bobo, L., & Pinson, P. (2018). Consensus-based approach to peer-to-peer electricity markets with product differentiation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(2), 994-1004.
183. Sousa, T., Soares, T., Pinson, P., Moret, F., Baroche, T., & Sorin, E. (2019). Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 367-378.
184. Sovacool, B. K. (2011). An international comparison of four polycentric approaches to climate and energy governance. *Energy policy*, 39(6), 3832-3844.
185. Štreimikienė, D. (2021). Externalities of power generation in Visegrad countries and their integration through support of renewables.
186. Streimikiene, D., Bruneckiene, J., & Cibinskiene, A. (2013). The review of electricity market liberalization impacts on electricity prices. *Transformations in Business & Economics*, 12(3), 40-60.
187. Strogatz, S. H. (2001). Exploring complex networks. *nature*, 410(6825), 268-276.
188. SU, A., & WANG, B. (2017). STOCHASTIC FINANCIAL MODEL BASED ON FRACTIONAL BROWN MOTION. *Italian Journal of Pure and Applied Mathematics*, 194.
189. Sun, L., Xiang, M., & Shen, Q. (2020). A comparative study on the volatility of EU and China's carbon emission permits trading markets. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 560, 125037.
190. Szarvas, M. (2016). A kulturális gravitáció modelljének bemutatása. *Hungarológiai Közlemények*, 17(3), 63-74.
191. Szlávik, J., & Szép, T. (2018). Energiafelhasználás és gazdasági növekedés a visegrádi négyekben: abszolút vagy relatív szétválás? = Energy use and economic growth in the Visegrád Four countries: absolute or relative decoupling?. *Tér és Társadalom*, 32(1), 113-130.
192. Szőke, T., Hortay, O., & Farkas, R. (2021). Price regulation and supplier margins in the Hungarian electricity markets. *Energy Economics*, 94, 105098.
193. Sztankó, É. (2011). „Miért összeegyeztethetetlenek a magyar hosszú távú villamosenergia-vásárlási megállapodások a közösségi vívmányokkal?”. *Közgazdasági Szemle*, 653-666.
194. Sztankó, É. (2017). A villamosenergia-piac egységesítésének esélyei az Európai Unióban. *Competitio*, 16(2), 3-22.
195. Szuchy, R. (2018). A magyar energiaszabályozás kezdetei, különös tekintettel a villamosenergia-piacra= The Beginnings of Energy Regulation in Hungary, with Special Focus on the Electricity Market. *Polgári Szemle: Gazdasági és Társadalmi Folyóirat*, 14(4-6), 79-87.
196. Szűcs, B. Á. (2012). A geometriai Brown-mozgás feltevésének elfogadhatósága a reálopciók értékelésében (The acceptability of the assumption of geometric brownian motion in the valuation of real options). *Hitelintézeti Szemle*, 11(ksz), 44-49.
197. Tanil, G., & Jurek, P. (2020). Policies on renewable energy at the European and national level of governance: Assessing policy adaptation in the Czech Republic. *Energy Reports*, 6, 548-553.
198. Temesi, J., & Varró, Z. (2014). Operációkutatás. *Aula Könyvkiadó, Budapest*, 370.
199. Terreros, O., Spreitzhofer, J., Basciotti, D., Schmidt, R. R., Esterl, T., Pober, M., & Ziegler, M. (2020). Electricity market options for heat pumps in rural district heating networks in Austria. *Energy*, 196, 116875.
200. Teufel, F., Miller, M., Genoese, M., & Fichtner, W. (2013). Review of System Dynamics models for electricity market simulations. Working Paper Series in Production and Energy, No. 2, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

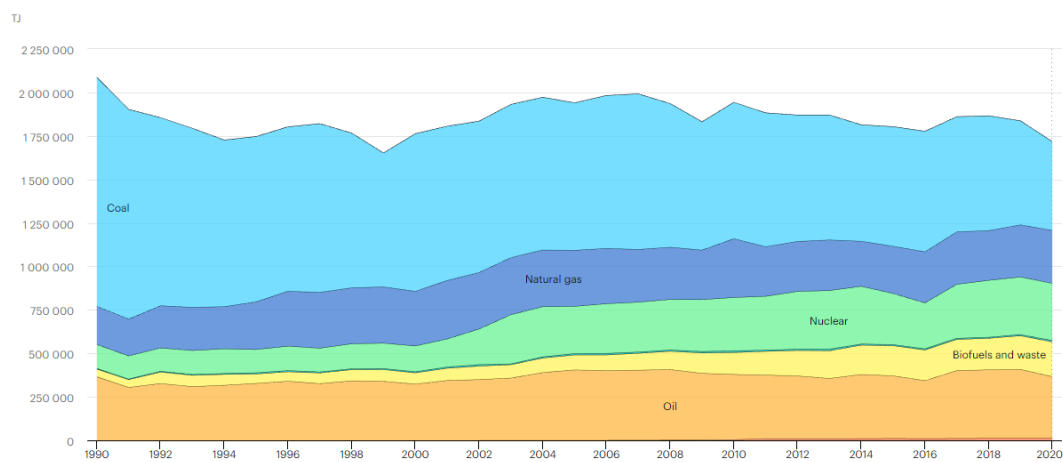
201. TGE (2018): Annual Report 2018. Towarowa Giełda Energii S.A. Varsó, <https://tge.pl/TGE-Publications> (2021. 07. 06.)
202. TGE (2019): Annual Report 2019. Towarowa Giełda Energii S.A. Varsó, <https://tge.pl/TGE-Publications> (2021. 07. 06.)
203. Thema, J., Suerkemper, F., Grave, K., & Amelung, A. (2013). The impact of electricity demand reduction policies on the EU-ETS: Modelling electricity and carbon prices and the effect on industrial competitiveness. *Energy Policy*, 60, 656-666.
204. Tóth, A. I. (2006). A villamosenergia-piaci liberalizáció és a magyarországi háztartások-Egy kérdőíves felmérés eredményei.
205. Tóth, T., & Kulin, F. (2019). A megújuló energia részarányának modellezése 2020-as kitekintéssel. *Közgazdasági Szemle*, 66(10), 1073-1092.
206. Tóth, T., & Somossy, É. S. (2020). Mit tanulhatunk az európai megújuló tenderekből? Néhány európai példa elemzése és a követendő tapasztalatok a METÁR-tenderek esetleges továbbfejlesztéséhez. *KÜLÜGYI SZEMLE*, 19(3), 94-115.
207. Trubalska, J. (2019). The prospects for energy cooperation in the Visegrad Group. *Annales Universitatis Mariae Curie-Sklodowska M*, 4.
208. Tucki, K., Orynycz, O., Wasiak, A., Świć, A., & Dybaś, W. (2019). Capacity market implementation in Poland: Analysis of a survey on consequences for the electricity market and for energy management. *Energies*, 12(5), 839.
209. Valášek, T. (2019). New Perspectives on Shared Security: NATO's Next 70 Years. *Carnegie Europe*, November, 28.
210. Valitov, N. (2019). Risk premia in the German day-ahead electricity market revisited: The impact of negative prices. *Energy Economics*, 82, 70-77.
211. Vasiljevska, J., & Flego, G. (2019). Identification of projects of common interest in the priority thematic area of smart grids deployment. Science for Policy report by the Joint Research Centre (JR)
212. Vasin, A., Gao, H., Dolmatova, M., & Weber, G. W. (2017). Optimization of transmission network for homogeneous good market. *Optimization*, 66(12), 2125-2134.
213. Verbič, M., Filipović, S., & Radovanović, M. (2017). Electricity prices and energy intensity in Europe. *Utilities Policy*, 47, 58-68. Lakossági árak
214. Vincze P. (2009). Piaci verseny és piacszerkezet a villamosenergia szektorban. *Verseny és Szabályozás*
215. Von Meier, A. (2006). *Electric power systems: a conceptual introduction*. John Wiley & Sons.
216. Vrba, M., Špaček, Z., Jež, J., & Ptáček, J. (2015). Integration of Electricity from Renewable Energy Sources—The Czech Story. *Energy & Environment*, 26(1-2), 157-166.
217. Ward, J. D., Sutton, P. C., Werner, A. D., Costanza, R., Mohr, S. H., & Simmons, C. T. (2016). Is decoupling GDP growth from environmental impact possible?. *PloS one*, 11(10), e0164733.
218. Wasserman, S., & Faust, K. (1994). *Social network analysis: Methods and applications*. Cambridge University Press.
219. Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks. *nature*, 393(6684), 440-442.
220. Weron, R., & Misiorek, A. (2006). Point and interval forecasting of wholesale electricity prices: Evidence from the Nord Pool market.
221. Wiener, H. (1947). Structural determination of paraffin boiling points. *Journal of the American chemical society*, 69(1), 17-20.
222. windfinder.com. <https://www.windfinder.com/>. Letöltve 2022.02.02.

223. Włodarczyk, A. (2015). Evaluation of the carbon market impact on the Polish Power Exchange. *Materials, Methods and Technologies*, 9, 64-79.
224. Woo, C. K., Sreedharan, P., Hargreaves, J., Kahrl, F., Wang, J., & Horowitz, I. (2014). A review of electricity product differentiation. *Applied Energy*, 114, 262-272.
225. Wurster, S., & Hagemann, C. (2020). Expansion of Renewable Energy in Federal Settings: Austria, Belgium, and Germany in Comparison. *The Journal of Environment & Development*, 29(1), 147-168.
226. Wyrobek, J., Popławski, Ł., & Dzikuc, M. (2021). Analysis of Financial Problems of Wind Farms in Poland. *Energies*, 14(5), 1239.
227. Xiao, D., & Wang, J. (2014). Graph based and multifractal analysis of financial time series model by continuum percolation. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 15(5), 265-277.
228. Xiong, H., & Mamon, R. (2019). A higher-order Markov chain-modulated model for electricity spot-price dynamics. *Applied Energy*, 233, 495-515.
229. Xu, X., Zhang, J., & Small, M. (2008). Superfamily phenomena and motifs of networks induced from time series. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(50), 19601-19605.
230. Yang, R., Yu, L., Zhao, Y., Yu, H., Xu, G., Wu, Y., & Liu, Z. (2020). Big data analytics for financial Market volatility forecast based on support vector machine. *International Journal of Information Management*, 50, 452-462.
231. Yang, X. (2020). Introduction To Stochastic Calculus And Its Applications. Available at SSRN 3607647.
232. Yusuf, J., Sakib, F., & Ahsan, Q. (2016). Study of blackout prevention of a power system. In 2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE) (pp. 519-522). IEEE.
233. Zappa, W., & van den Broek, M. (2018). Analysing the potential of integrating wind and solar power in Europe using spatial optimisation under various scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 1192-1216.
234. Zhang, J., & Small, M. (2006). Complex network from pseudoperiodic time series: Topology versus dynamics. *Physical Review Letters*, 96(23), 238701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.238701>
235. Zhang, J., Luo, X., Nakamura, T., Sun, J., & Small, M. (2007). Detecting temporal and spatial correlations in pseudoperiodic time series. *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, 75 1 Pt 2, 016218.
236. Zhang, P., Barad, H., & Martinez, A. (1990). Fractal dimension estimation of fractional Brownian motion. *IEEE Proceedings on Southeastcon*,
237. Zhuang, E., Small, M., & Feng, G. (2014). Time series analysis of the developed financial markets' integration using visibility graphs. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 410, 483-495. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.05.058>
238. Ziel, F. (2017). Modeling the impact of wind and solar power forecasting errors on intraday electricity prices. In 2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM) (pp. 1-5). IEEE.
239. Ziel, F., Steinert, R., & Husmann, S. (2015). Forecasting day ahead electricity spot prices: The impact of the EXAA to other European electricity markets. *Energy Economics*, 51, 430-444.
240. Zimmermannová, J., & Jílková, E. (2016). Do Economic Instruments in the Czech Republic Support Generation of Renewable Energy. *Economics Management Innovation*, 8(2), 16-30.

241. Zipp, A. (2017). The marketability of variable renewable energy in liberalized electricity markets—an empirical analysis. *Renewable Energy*, 113, 1111-1121.

Mellékletek

Teljes energiaellátás (TES) forrás szerint, Csehország 1990-2020

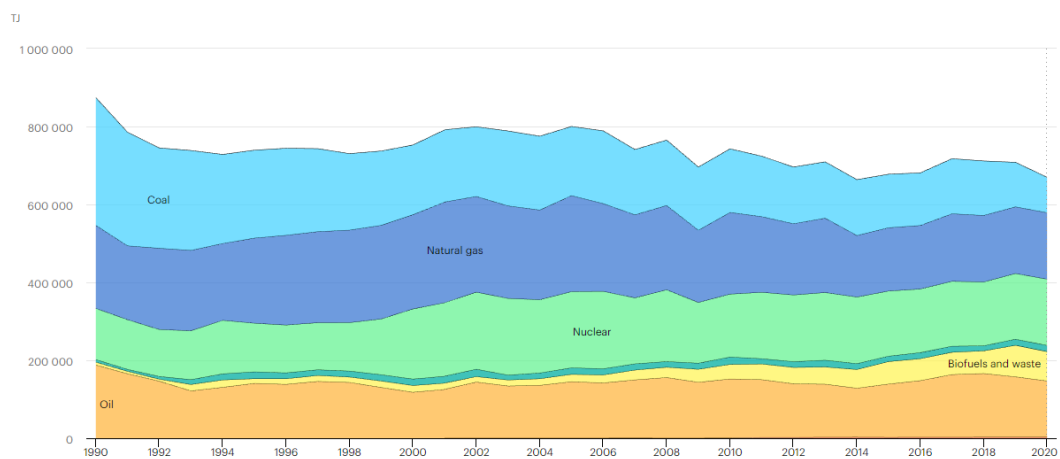


IEA. Minden jog fenntartva.

● Szén ● Földgáz ● Nukleáris ● Hydro ● Bioüzemanyagok és hulladék ● Olaj ● Szél, nap, stb.

forrás: <https://www.iea.org/countries>

Teljes energiaellátás (TES) forrás szerint, Szlovák Köztársaság 1990-2020

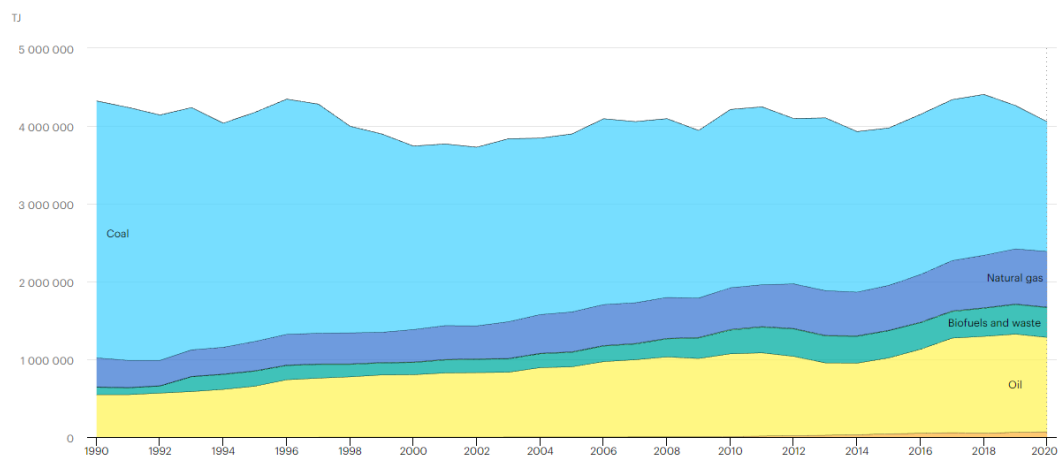


IEA. Minden jog fenntartva.

● Szén ● Földgáz ● Nukleáris ● Hydro ● Bioüzemanyagok és hulladék ● Olaj ● Szél, nap, stb.

forrás: <https://www.iea.org/countries>

Teljes energiaellátás (TES) forrás szerint, Lengyelország 1990-2020



IEA. Minden jog fenntartva.

● Szén ● Földgáz ● Hydro ● Bioüzemanyagok és hulladék ● Olaj ● Szél, nap, stb.

forrás: <https://www.iea.org/countries>

MATLAB command (Láthatósági gráf)

```
VG=[];
if isvector(signal_var)==0 || isvector(coords_var)==0
    disp('Error size: series and coordinates must be vectors')
    return;
end
if length(signal_var)~=length(coords_var)
    disp('Error size: series and coordinates must have the same length')
    return;
end
if iscolumn(signal_var)==0
    signal_var=signal_var';
end
if iscolumn(coords_var)==0
    coords_var=coords_var';
end
if exist('weight','var')==0
    weight='u';
elseif ischar(weight)==0 || (strcmp(weight,'u')+strcmp(weight,'w'))==0
    disp('Error weight: "u"=unweighted; "w"=weighted ')
    return;
end
if exist('B_period','var')==0
    B_period=0;
elseif isscalar(B_period)==0 || sum(ismember([0,1],B_period))==0
    disp('Error boundary periodicity: "0"=no periodicity; "1"=periodicity ')
    return;
end
if B_period==1 && length(unique(diff(coords_var)))~=1
    disp('Error: the vector with coordinates must be uniformly-spaced. Use NaN in the signal to account for non-
uniform sampling.')
    disp('E.g.: signal_var=[1,NaN,4.2,NaN,NaN,8.4]; coords_var=[1,2,3,4,5,6]')
    return;
end

if B_period==0
    TS2map=signal_var;
    TT2map=coords_var;
elseif B_period==1
    %re-arrange the signal to account for boundary periodicity
    Nt=size(signal_var,1);
    [~,peaks_signal_ind]=max(signal_var);
    [~,sorted_ind]=sort([(peaks_signal_ind:Nt)';(1:peaks_signal_ind-1)],'ascend'); %keep the indexing order
    TS2map=[signal_var(peaks_signal_ind:end);signal_var(1:peaks_signal_ind)]; % the peaks_signal_ind node
is put both at the beginning and at the end of the new signal
    TT2map=(1:length(TS2map));
end

weight=find(ismember({'u','w'},weight)); %weight=1 or 2

N=size(TS2map,1);
B=cell(N,weight);
B=NVG_alg(TS2map,1,N,B,TT2map,weight);

Adj_tmp=cell(N,1);
for ii=1:N
    Adj_tmp{ii}=ones(length(B{ii,1}),1)*ii;
end
target=vertcat(Adj_tmp{:});
```

```

clear A_tmp
source=vertcat(B{:,1});

if weight==1
    weight_input=ones(size(target));
elseif weight==2
    weight_input=cell(N,1);
    for ii=1:N
        if isempty(B{ii,1})==0
            weight_input{ii}=B{ii,2};
        end
    end
    weight_input=vertcat(weight_input{:});
end

if ~isa(source,'double')
    source=double(source); % "sparse" function requires doubles
end
VG=sparse(source,target,weight_input,N,N);
VG=VG+VG'; %makes adjacency matrix simmetrical

if B_period==1
    VG(1,end)=0;
    VG(end,1)=0;
    %merge the links from the maximum (1st node) and the auxiliary (last node)
    VG(:,1)=or(VG(:,1),VG(:,end));
    VG(1,:)=VG(:,1); %=or(A(1,:),A(end,:));
    % remove the auxiliary node
    VG(:,end)=[];
    VG(end,:)=[];

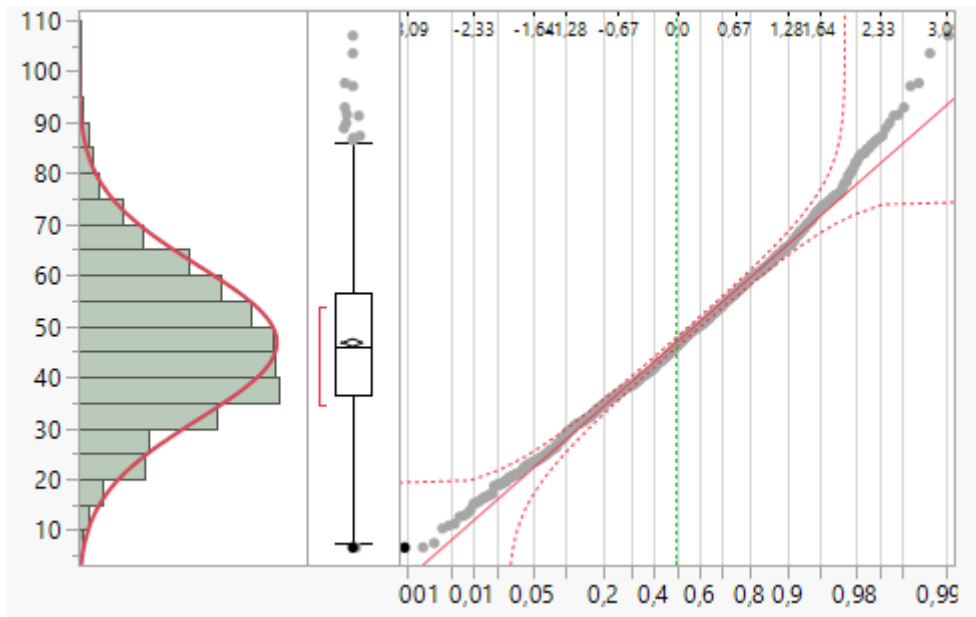
    VG=VG(sorted_idx,sorted_idx);
end

%%Export to excel
ST = table(source, target)

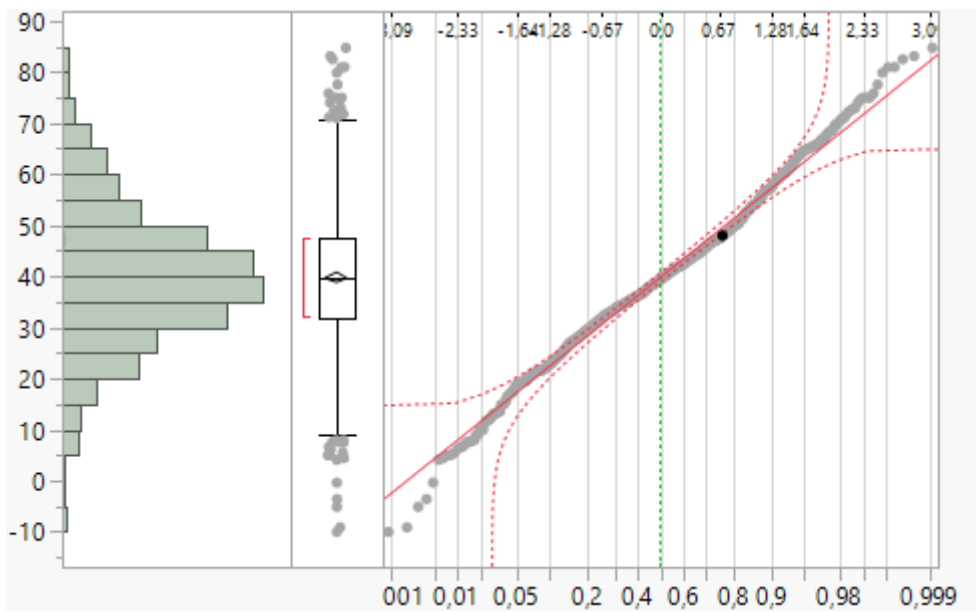
```

Országok áramtőzsdei adatainak eloszlásai

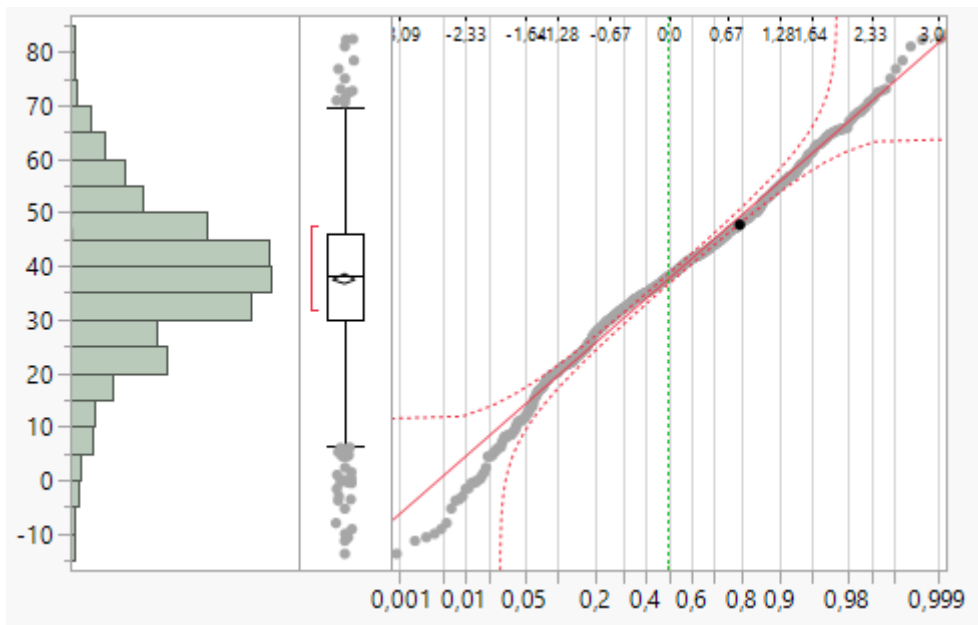
Magyarország



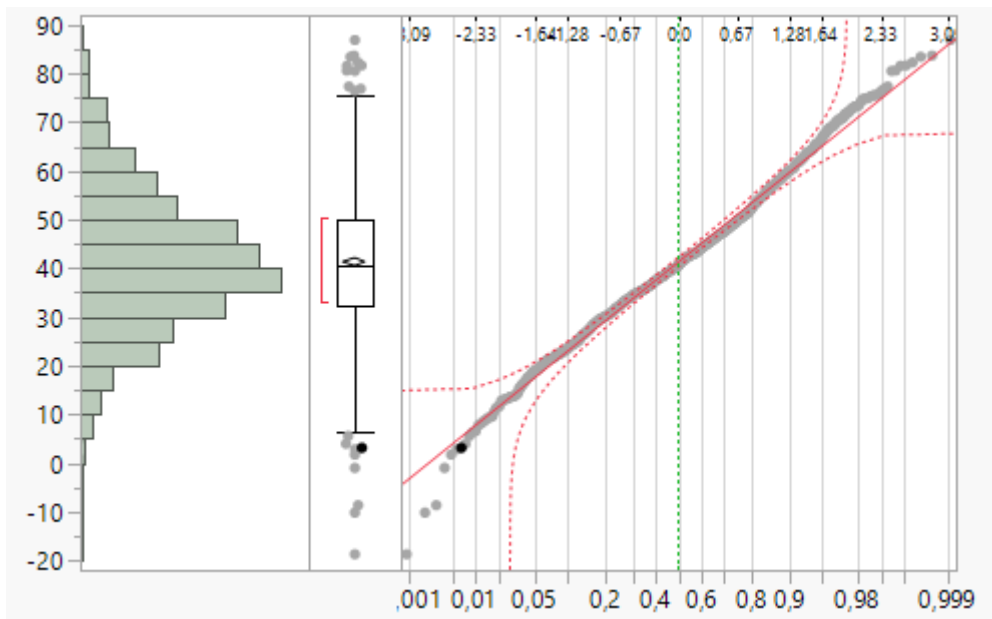
Ausztria



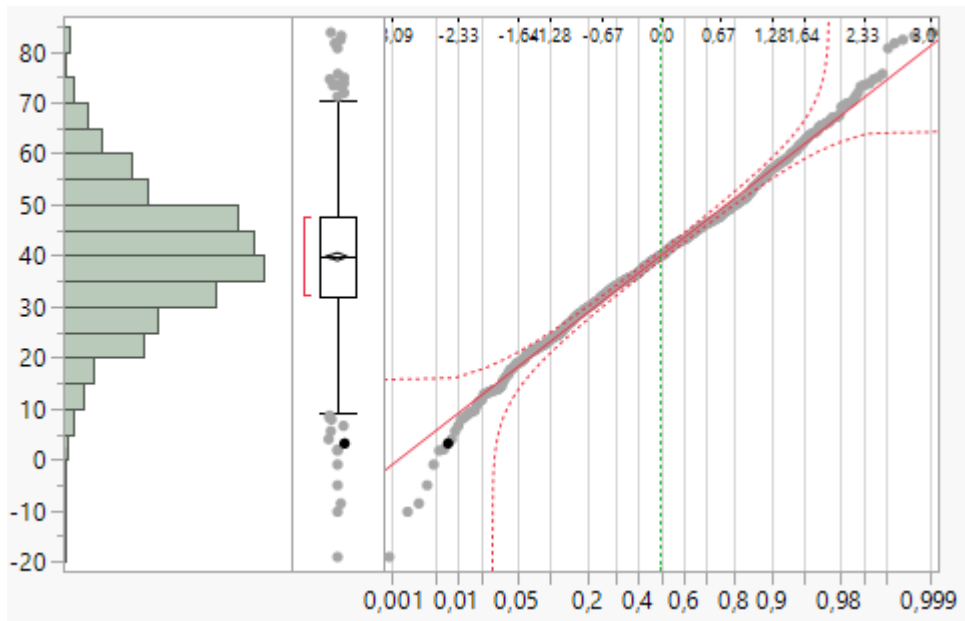
Németország



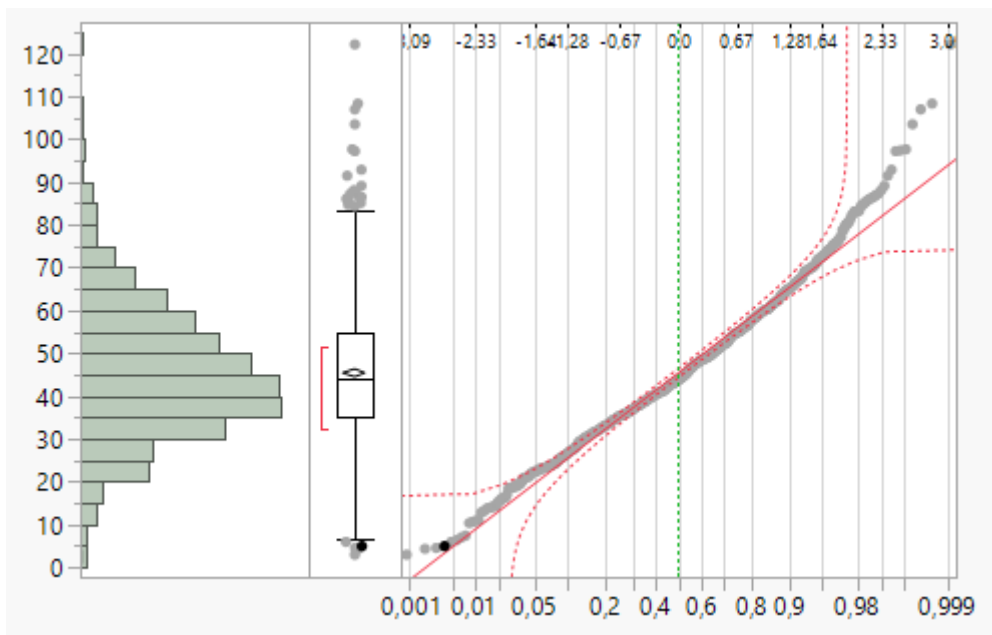
Szlovákia



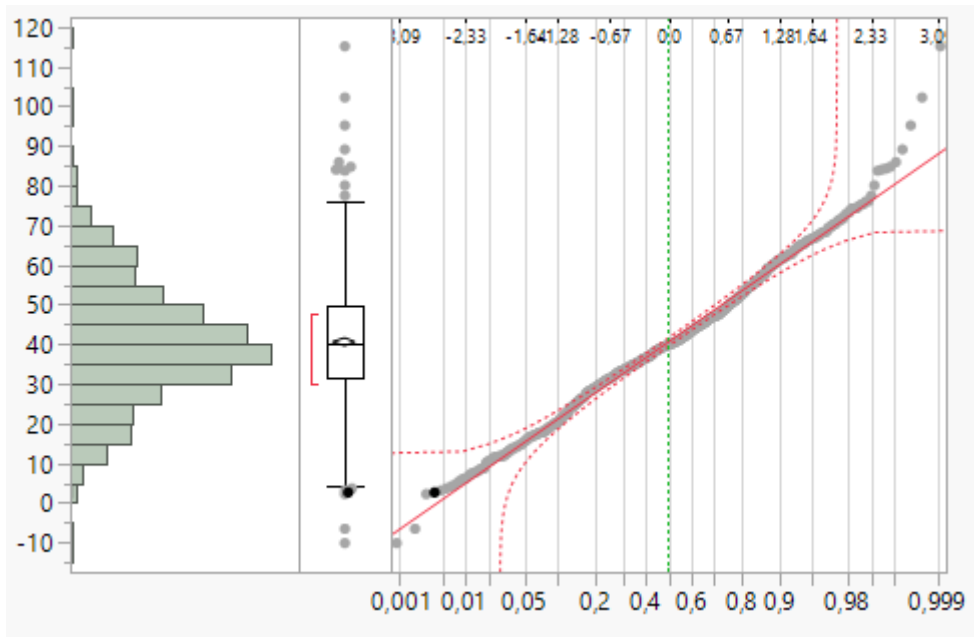
Csehország



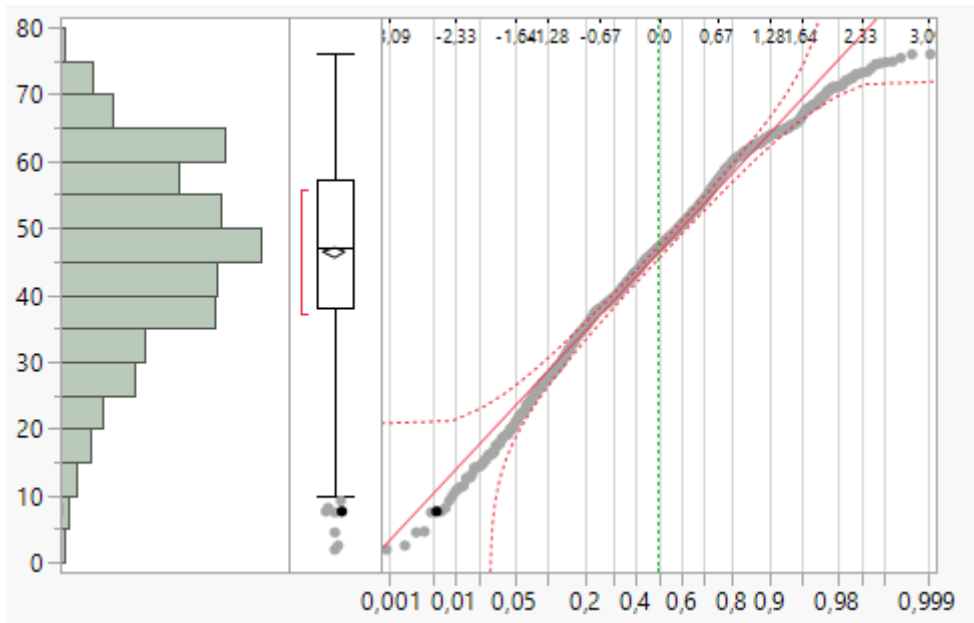
Románia



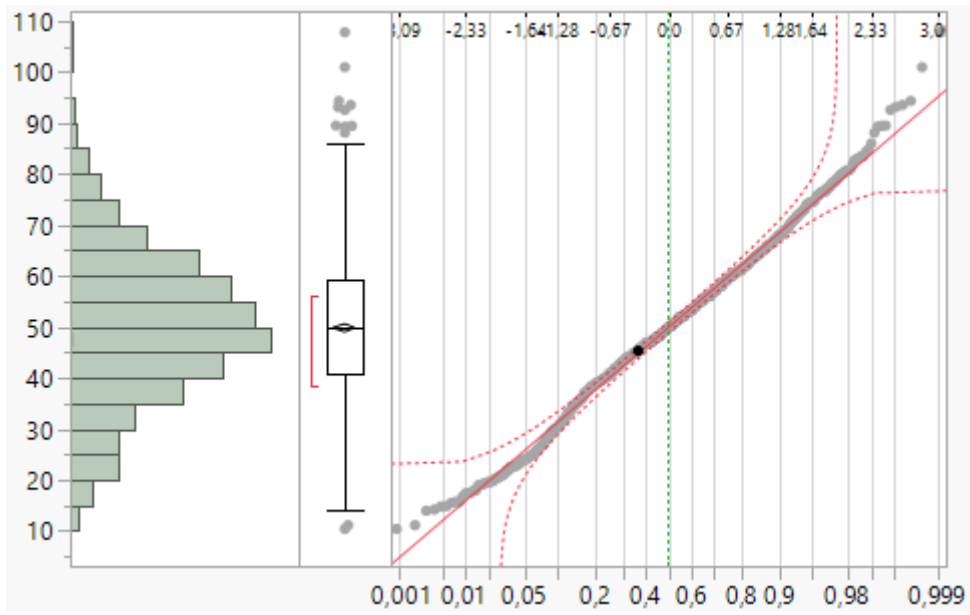
Franciaország



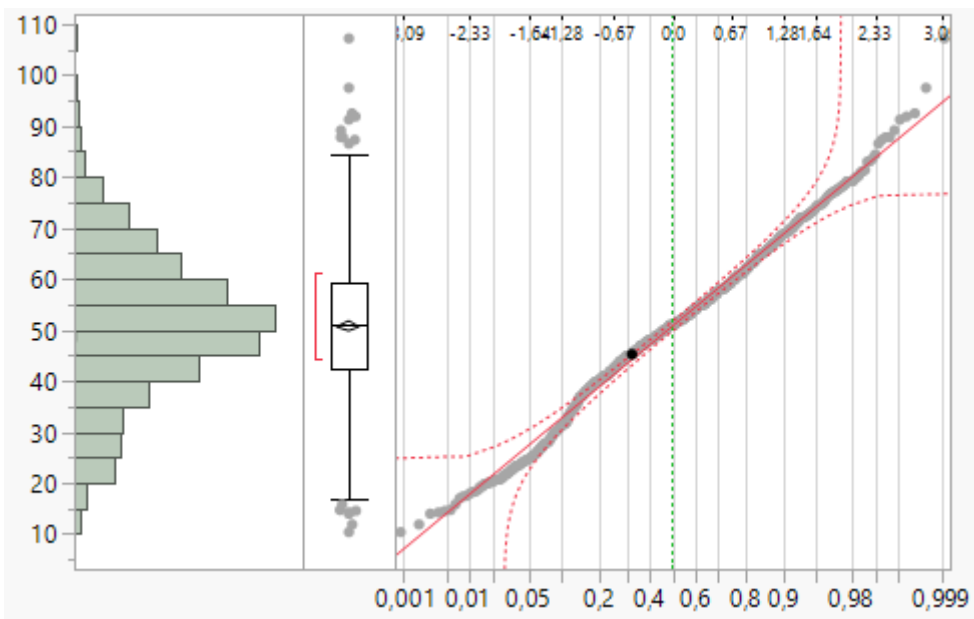
Spanyolország



Szlovénia



Olaszország



Országok áramtőzsdéinek láthatósági gráfjai

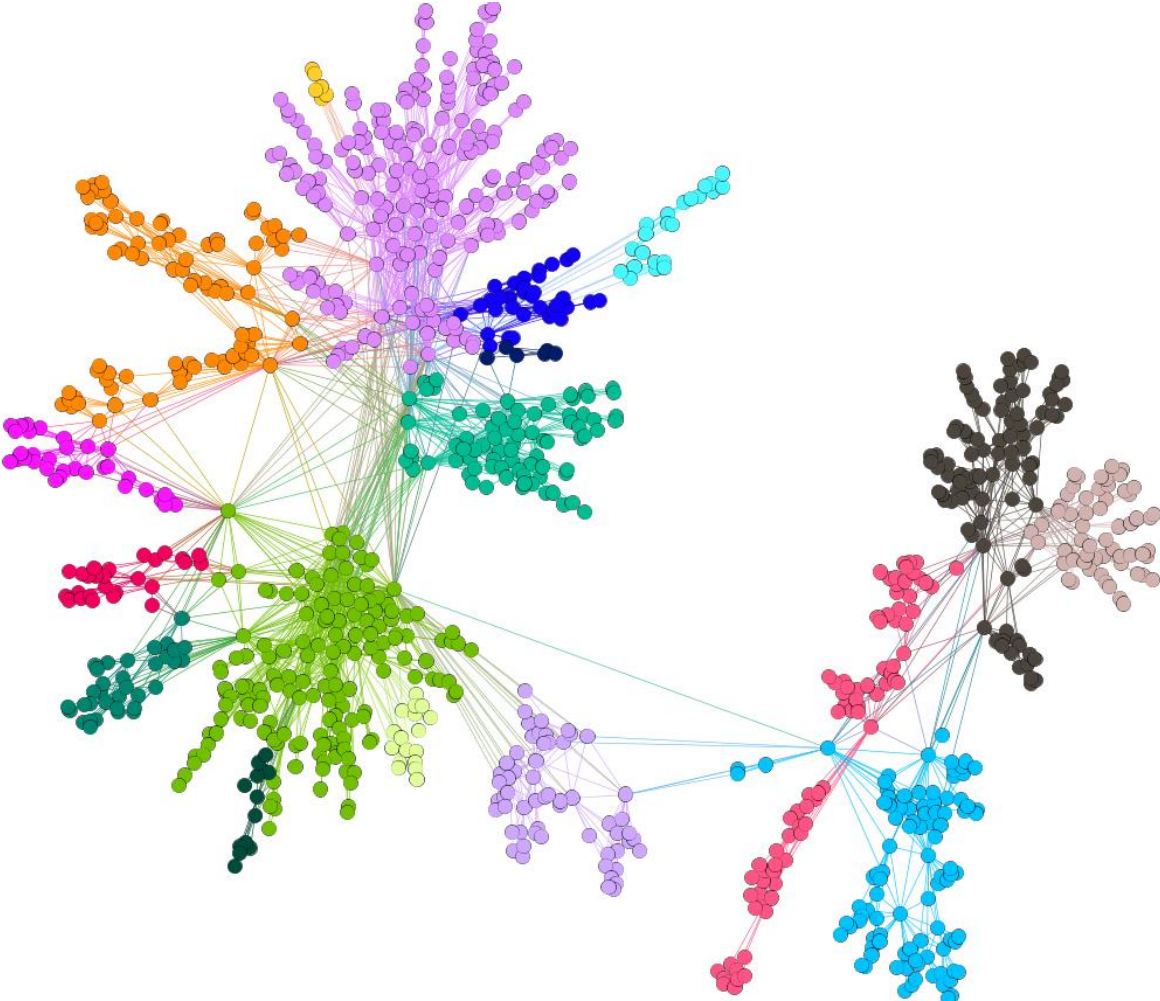
Magyarország



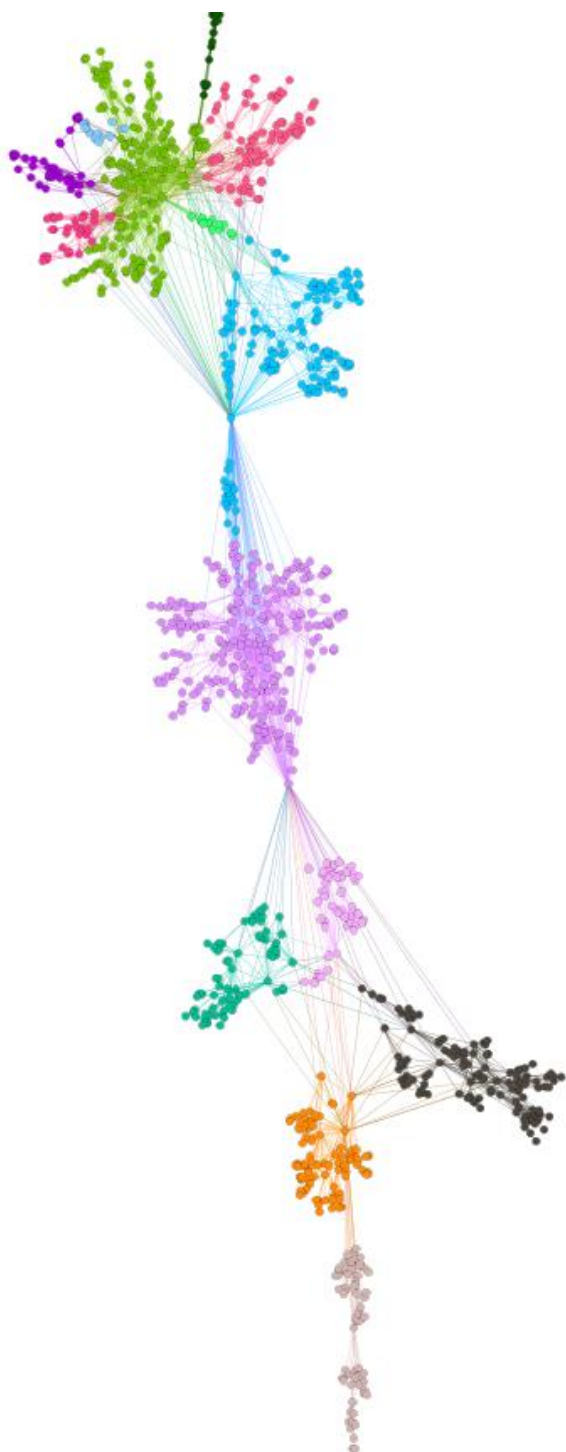
Szlovákia



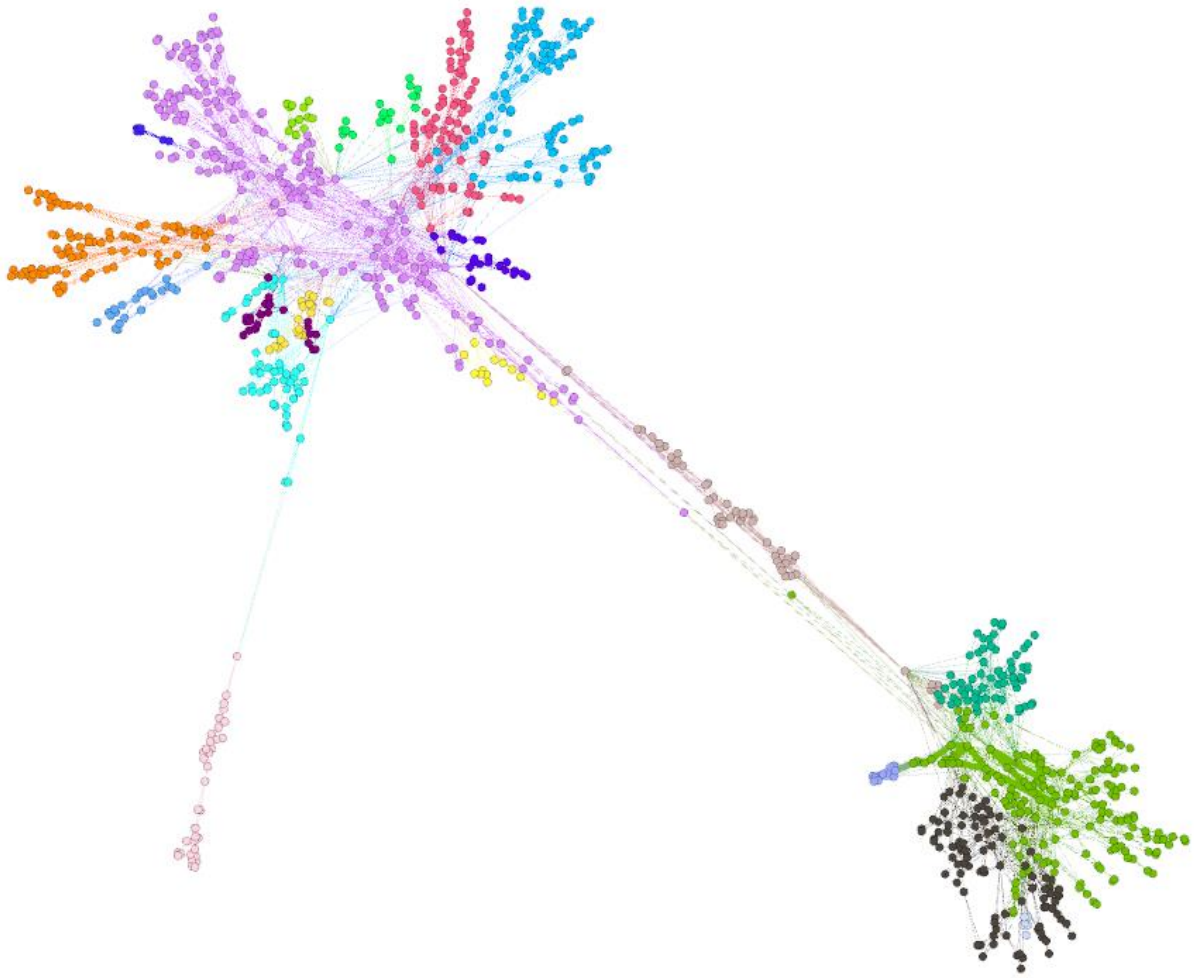
Csehország



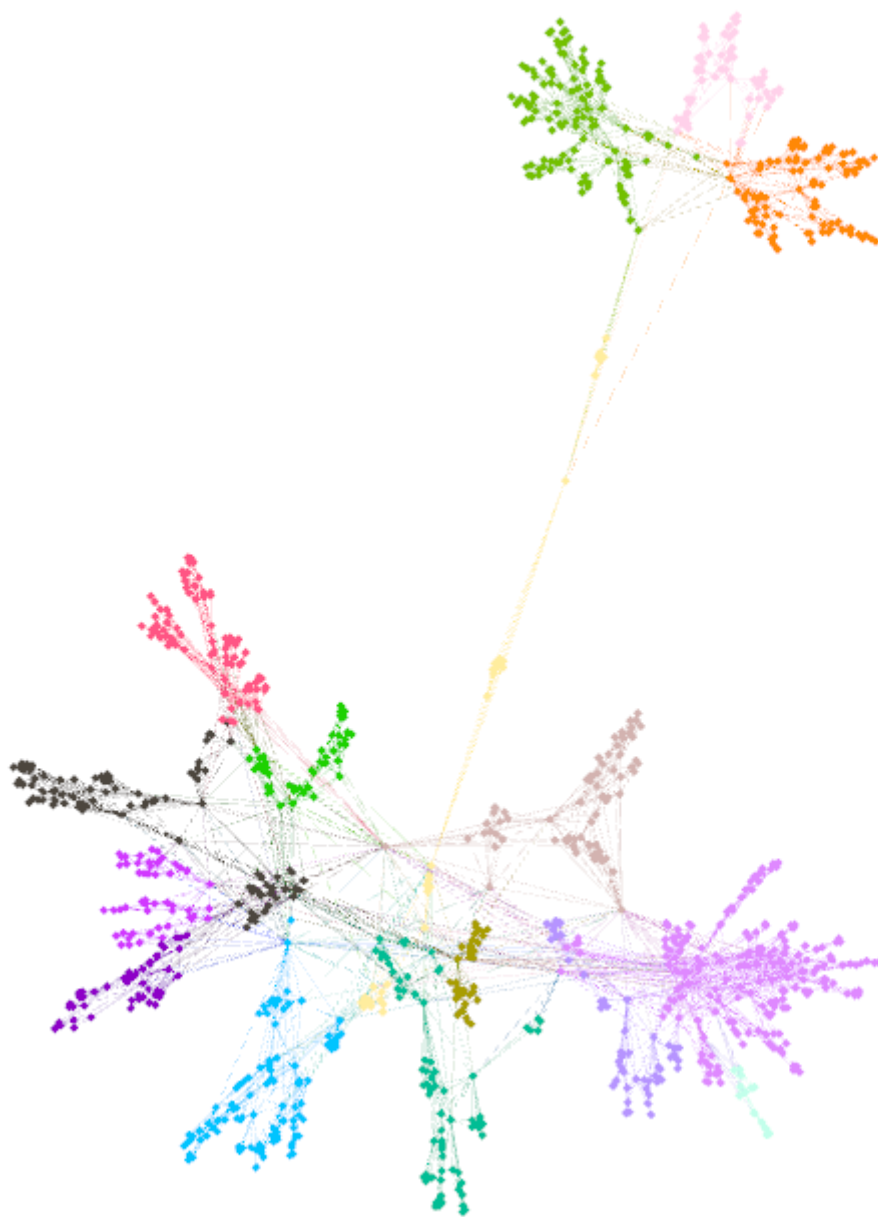
România



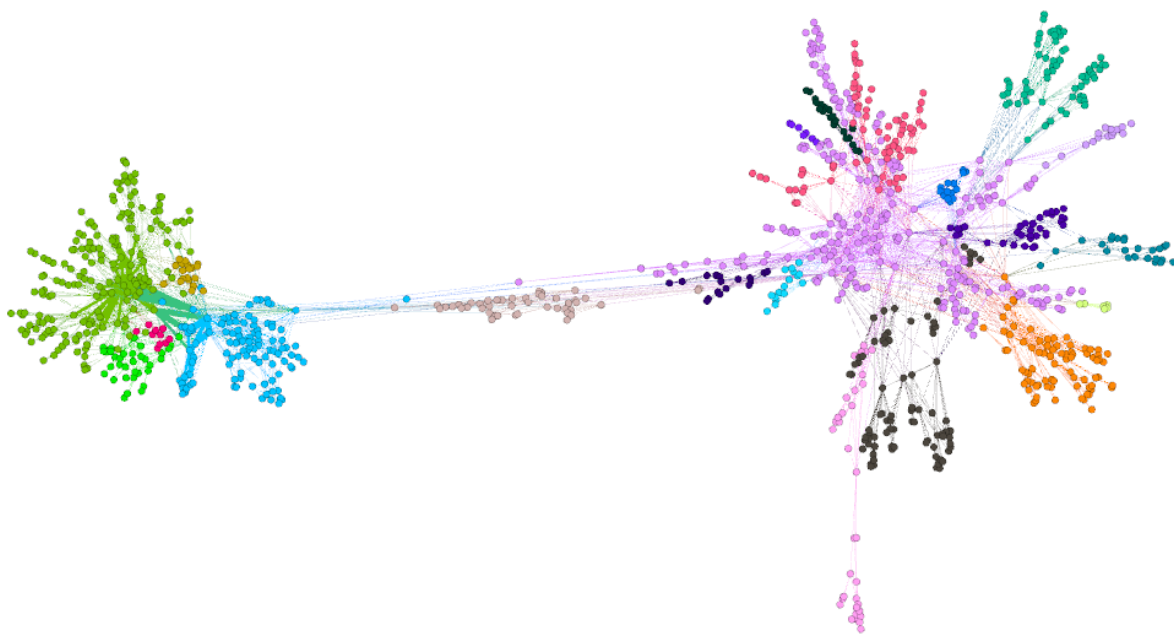
Ausztria



Spanyolország

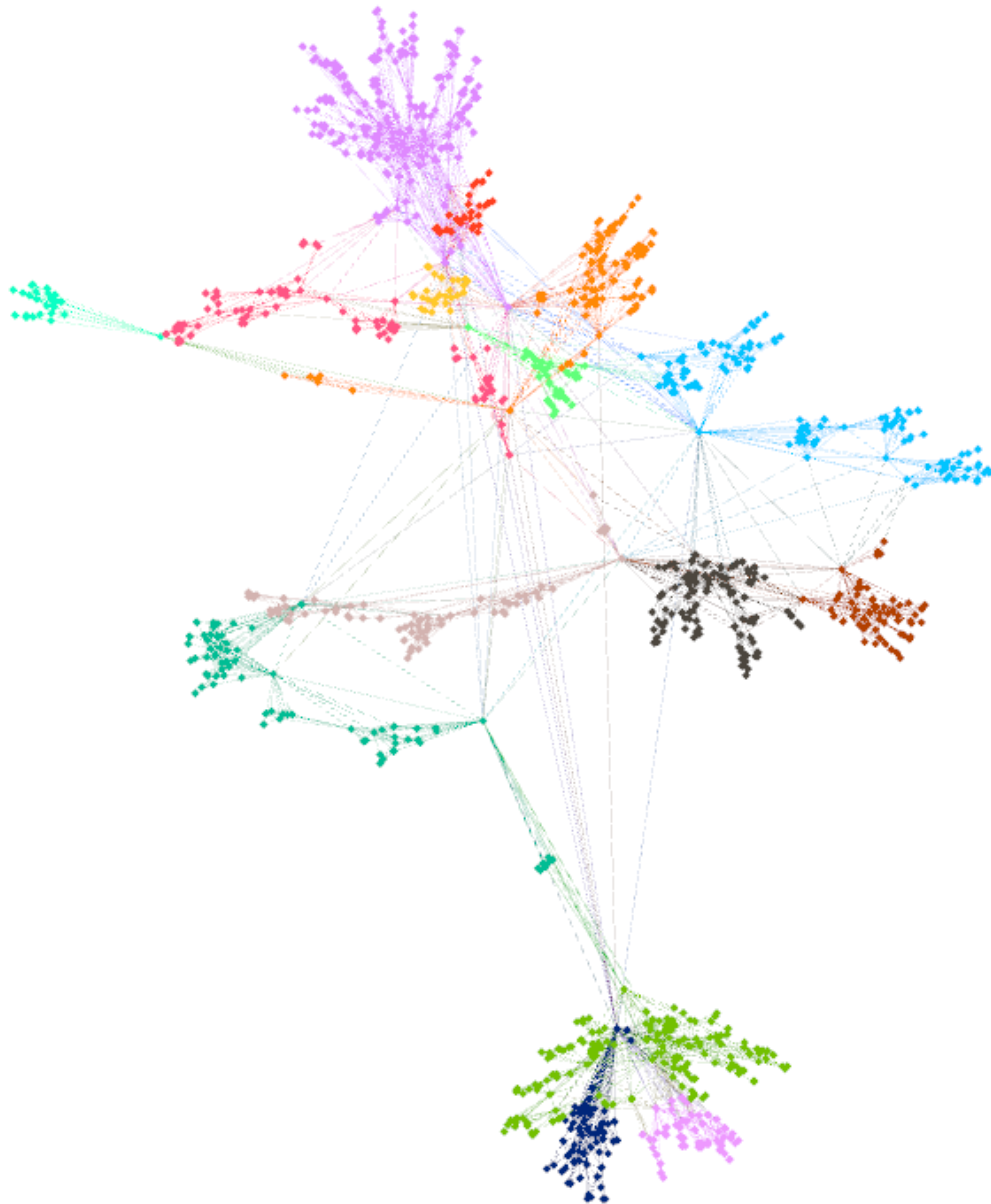


Németország



Franciaország





Brown-mozgás

