

**Pécsi Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Földtudományok Doktori Iskola**

PHD ÉRTEKEZÉS

HERCZEG BALÁZS

PÉCS, 2024

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Természettudományi Kar
Földtudományok Doktori Iskola



A FENNTARTHATÓ ENERGIAÁTMENET NYOMÁBAN
*AZ ENERGIATRILEMMA MEGÍTÉLÉSE AZ EU VILLAMOSENERGIA-
PIACÁNAK TÜKRÉBEN*

PHD ÉRTEKEZÉS

HERCZEG BALÁZS

Témavezető:

Dr. habil. Pintér Éva PhD, egyetemi docens, BCE

PÉCS, 2024

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	5
2. Energetikai körkép.....	9
2.1. Fogalmi alapismeretek.....	9
2.1.1. Energetikai rendszerelmélet	9
2.1.2. Fizikai alapismeretek és összefüggések	12
2.1.3. Energiaforrások és -hordozók csoportosítása és összehasonlítása	16
2.1.3.1. Az energiaáramlás útja elméleti megközelítésben	16
2.1.3.2. A fosszilis tüzelőanyagok jellemzői.....	20
2.1.3.3. A jövő kulcsa: a megújuló energiák.....	26
2.1.3.4. A nukleáris energiában rejlő potenciálok és kihívások.....	36
2.2. Az energiaellátás lehetőségei területi adottságok kontextusában	38
2.2.1. Geoenergia, avagy a természeti erőforrások geopolitikája.....	40
2.2.2. Természeti erőforrások egyenlőtlen regionális eloszlása	44
2.2.2.1. Ásványi energiahordozók kitermelési lehetőségei.....	44
2.2.2.2. Megújuló energiaforrások és -hordozók területi sajátosságai	52
2.3. Az EU villamosenergia-rendszere a gyakorlatban	59
2.3.1. Termelőktől a fogyasztókig.....	60
2.3.2. A nagykereskedelmi villamosenergia-piacok működési mechanizmusa	65
2.4. A globális éghajlatváltozás jelensége és következményei.....	70
3. Kutatási célkitűzések, kérdések és hipotézisek	80
4. Kutatási módszertan	85
4.1. A villamosenergia-árak vizsgálatához használt statisztikai eszköztár.....	88
4.1.1. Az empirikus kutatásokban felhasznált adatok köre	89
4.1.2. Statisztikai tesztek a stacionaritás vizsgálatára	92
4.1.3. A többváltozós korreláció- és regressziószámítás alapjai	94
4.1.4. Alkalmazott idősor előrejelzési módszertan.....	99
5. A fenntartható energiagazdálkodás, az energiatrilemma és az energiaátmenet kapcsolati rendszere.....	103
5.1. A fenntartható fejlődés és a fenntarthatóság koncepciójának egzakt megközelítése	103
5.2. Fenntarthatóság energetikai kontextusban.....	114
5.2.1. Fenntartható energiaátmenet az energiatrilemma egyensúlyában	130
6. Az EU energiastratégiájának alakulása villamosenergia-piaci vetületben	138
6.1. Energiapolitikai irányzatok és döntések a 2020-as évekig	138
6.2. A szélsőséges események hajnalán: a multiválságok kora	157
6.2.1. Törésvonalak a pandémia és a geopolitikai feszültségek következtében ...	157
6.2.2. Az energiaválság lecsengése és energiapolitikai következményei.....	164
6.3. Változó energiapiaci dinamikák az EU energiapolitikai döntései nyomán.....	168

7. Árampiaci hatások gyakorlati vizsgálata különböző időhorizontok függvényében	181
.....	
7.1. <i>A nagykereskedelmi villamosenergia-árak alakulásának statisztikai vizsgálata</i>	183
7.1.1. Vizsgálati szempontok és eredmények	185
7.1.1.1. A multiválságok felfutása előtti időszak elemzése (2015. január - 2020. december)	186
7.1.1.2. A multiválságokkal terhelt (teljes) időszak értékelése (2015. január - 2023. augusztus)	193
7.1.2. Következtetések és hipotézis-ellenőrzések	197
7.2. <i>A nagykereskedelmi villamosenergia-árak előrejelzési modelljeinek összehasonlítása</i>	200
7.2.1. Vizsgálati szempontok és eredmények	203
7.2.1.1. A kiválasztott módszerek alkalmazása a modellezett időszakok alatt	205
.....	
7.2.2. Modell összehasonlítások és hipotézis-ellenőrzés	212
8. Összefoglalás	215
8.1. <i>Kutatási eredmények</i>	215
8.2. <i>A kutatás jövőbeli irányai</i>	221
Köszönetnyilvánítás	222
Irodalomjegyzék	223
Ábrák jegyzéke	244
Táblázatok jegyzéke	247
Rövidítések jegyzéke	249
Függelék	253

„Energy and geopolitics are very interconnected, but in a world that is becoming more fragmented, the need for a framework to serve as a roadmap to better outcomes in a future disrupted by energy transition and a difficult and rocky globalization is critical.”

- Daniel Yergin (2020), author of The New Map: Energy, Climate, and the Clash of Nations

1. Bevezetés

Az emberiség történelme során a társadalom előrehaladásának, fejlődésének és olykor hanyatlásának is kritikus tényezője az, ahogyan az energiát előállítják, átalakítják és felhasználják. Ahogy a cseh-kanadai professzor Vaclav Smil is kihangsúlyozza könyvében, az elmúlt 300 év az emberi lét legcsodálatosabb fejlődését hozta és ezek az előrelépések szinte mindegyike közvetlenül az új energiaformákban rejlő lehetőségek kiaknázására vezethetők vissza (Smil, 2018). Az energia különböző megjelenési formái és azok az emberiség által hasznosított megoldásai befolyásolják többek között a társadalmi és gazdasági struktúrákat, a technológiai fejlődési irányokat, az ellátási láncokat, a települési mintákat, valamint számtalanszor átrajzolták már a világ geopolitikai térképét is.

A fenti idézet hasonló megfontolásokat tartalmaz más perspektívából. Megjelenik benne az energia, a geopolitika, az összekapcsoltság és széttagoltság, az előrettekintő tervezés, az energiaátmenet és globalizáció jelensége, valamint annak a bizonyos keretrendszernek a felállítása, mely mindezen elemekkel interakcióban van. Ez korunk egyik legnagyobb kihívása, hiszen e keretrendszer egyben a dinamikusán változó globális és regionális politikai játszmák színterét is nyújtja.

Ebben a játéktérben egyre hangsúlyosabb a fenntarthatóság kérdésköre. Ahogy Caradonna (2022) is rámutat, a fenntarthatóság és a környezetvédelem története bizonyos mértékig közös, de a fenntarthatóság története éppúgy társadalom-, politika- és gazdaság-, mint környezettörténet. Ez, ahogy majd a későbbiekben a koncepció kibontakozik, egy olyan általános célt jelöl, amely szerint a jelen igényeinek kielégítését anélkül kell biztosítanunk, hogy az veszélyeztetné a jövő generációinak képességét saját szükségleteik kielégítésére. Ebből expliciten adódik, hogy a geopolitikai küzdelmek a történelem során sokszor az erőforrásokért folytak és melyeknek a regionális eloszlása nagyban meghatározta a lehetőségeket és korlátokat egy adott ország számára.

Ezek a lehetőségek és korlátok valamennyi esetben és végső soron a természeti erőforrások kiaknázásához, azaz energiához való hozzájutást jelentenek. Nem mindegy azonban, hogy az az elsődleges energia milyen forrásból származik, hogyan alakul át hasznos energiává és hogy mikor és hogyan jut el a fogyasztóhoz. Ezen kérdés megválaszolása integrált

rendszer szemléletet követel meg. Felhasználói szempontból a kérdésre a válasz nagyon egyszerű: *azonnal, mindenhol és mindenkor elérhetően és megfizethetően*. Ez a perspektíva azonban szükséges, de nem elégséges a fenntarthatósági kontextus tekintetében, amelyre a világ csak az utóbbi pár tíz évben döbbsent rá igazán. A természeti-környezeti szempontok figyelembevételének térnyerése ezért adja a fenntarthatóság alapját, úgyszólván elengedhetetlen feltételét.

A fenntarthatóság energetikai kontextusban a fenntartható energiaátmenetre épül. Maga az energiaátmenet bár nem egy újkeletű fogalom – a történelem során nemegyszer zajlott le korábban domináns energiaforrásra épülő energiarendszerek szerkezetváltása –, mégis korunk energiaátmenetének sikere a legkritikusabb az emberiség számára. Hiszen ennek most nem gazdaságossági és társadalmi szempontjai az elsődlegesek, hanem a környezeti fenntarthatóságban betöltött szerepe. A megújuló energiák térnyerésének gazdasági-társadalmi, valamint ellátásbiztonsági pozitív hozadékai is vannak, a kereskedelmi villamosenergia-árak alakulásától kezdve az egészségügyi előnyökön keresztül az energiafüggetlenség és a rendszerstabilitás megteremthetőségéig bezárólag. Ez az energiaátmenet, mely tehát alapvetően a fosszilis tüzelőanyagokról való áttérést jelenti a tiszta és megújuló energiaforrásokra, döntően meghatározza bolygónk élhetőségét a következő generációk számára. Ennél fontosabb célkitűzést a társadalom nem igazán kaphat.

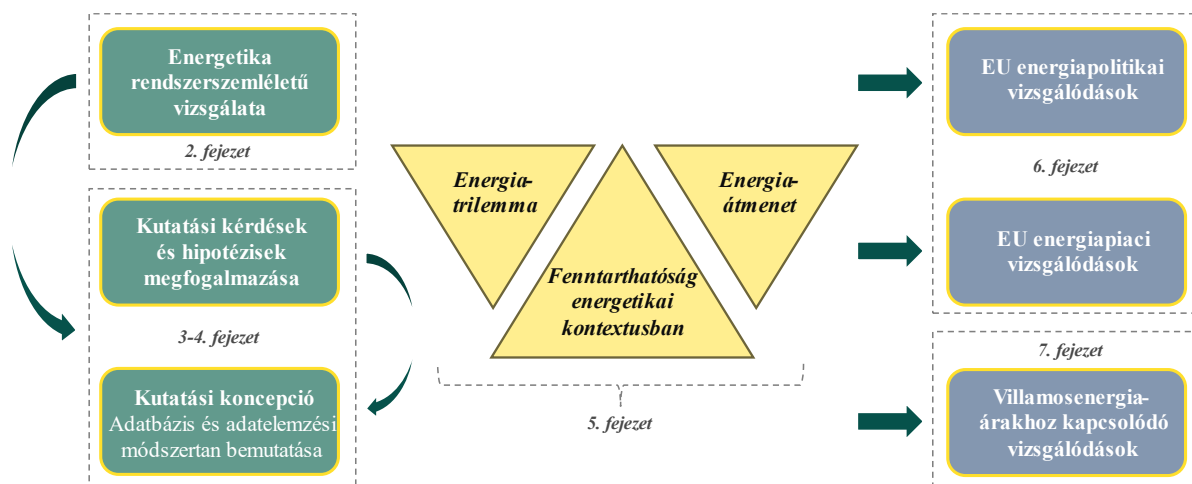
Mindazonáltal, az energiaátmenet önmagában kevés a fenntartható energia használat eléréséhez. A kulcs pedig a minőségi jelzőn van – a fenntarthatósági kérdés megítélése egy komplexebb és átfogóbb megközelítést igényel. Ami a környezetnek kimondottan jó, az nem feltétlenül lesz az a társadalomnak és a gazdaságnak. Nem akarjuk a szénhidrogéneket, de akarunk mindent, ami azok által létrejöhet. Sokszor megoldunk egy problémát, miközben generálunk három másikat. Nem lehet bizonyos szempontokat hosszú távon nélkülözni, mert akkor az az elsődleges cél rovására fog menni. Ezért a rendszerszintű szemlélet fontossága ismét megjelenik ebben az energetikai perspektívában is.

Vitathatatlan, hogy a fenntartható energiaátmenet korunk egyik legfontosabb globális feladatává, kihívásává és lehetőségévé vált. Nem véletlen tehát, hogy a fenntartható energiaátmenet mára az Európai Unió (EU) egyik fő célkitűzése is lett. Ezt mi sem bizonyítja jobban, mint az elmúlt évtizedek energiapolitikai és -stratégiai irányai és döntéshozatalai, melyeket nem csak belső intézményes, hanem külső események okozta kényszerű változások is meghatároztak. Utóbbi tekintetében nem is szükséges messzire visszanyúlni, hiszen jelenleg is egy ilyen geopolitikai konfliktus hatása alatt élünk. A 2019 végén kitört COVID-19 pandémia, ami a 2021-ben kezdődő energiaválságot megalapozta, korábban még soha nem

tapasztalt, rekord magas áram- és gázárakat hozott el világszerte az emberek számára, sebezhetővé téve a társadalom széles rétegét az energiaszegénységgel szemben. Ezt az energiaválságot még inkább felerősített az orosz-ukrán háború 2022. év eleji kitörése. Ez olyan geopolitikai és -ökonómiai következményekkel járt, amelyre többek között az energiapolitikában is szükséges volt reagálni. De vajon ezek a válságok befolyásolták-e a fenntartható energiaátmenet elsődlegességét az ellátásbiztonsági aspektus erősödésével? Vajon sikerül-e a döntéshozóknak megtalálni a minden szempontból elfogadható energiapolitika irányt, miközben a világ széttöredezettségi hajlama csak növekszik? Vajon az a bevezető elején említett keretrendszer kellő választ nyújt az energiatrilemma okozta döntési kényszerűségben? Hol és miben kell majd kompromisszumot kötni (ha kell egyáltalán)? Ezek és sok más hasonló gondolatébresztő kérdés merült fel a kutatásom indulása óta, amelyekre részben, bizonyos perspektívából és keretek között, igyekszek választ találni – e doktori disszertáció terjedelmén is túl.

Ahogy a téma, úgy a dolgozatom felépítése is rendszerszemléletet követel meg. Éppen ezért, az 1. ábrán látható kutatási témám felépítése is ezt az elvet követi.

1. ábra A kutatásom gondolatmenete és a dolgozat felépítése



Forrás: Saját készítésű ábra

Nem csak a dolgozatom elméleti felépítése, hanem a tényleges struktúrája is ezt a gondolatmenetet követi le. Jelen bevezető után az energetikai rendszerek rendszerszintű vizsgálatával indítok, felépítve megfelelő ismeretek elsajátításával a kutatási kérdéseim és hipotéziseim alapját, illetve a módszertan jellegét. Ebben az energetikai körkép fejezetben többek között fogalmi háttérismeretekkel, az energiaellátás geopolitikai és természetföldrajzi aspektusaival, az EU villamosenergia-rendszerének vizsgálatával, valamint a globális

éghajlatváltozás jelenségével fogok foglalkozni. A definíciók és összefüggések tekintetében fontosnak tartom leszögezni, hogy nem szándékozom a felsőoktatásban megismert definíciókat újra ismételni, inkább csak néhány kapcsolódó fizikai összefüggés bemutatása a cél, kifejezetten az energiagazdálkodás szemszögéből, ami hozzáad a későbbi elemzések átfogó megértéséhez.

A harmadik és negyedik fejezetben ismertetésre kerülnek a kutatási célkitűzések, kérdések és hipotézisek összefüggő rendszere, valamint az ehhez kapcsolódó kutatási módszertan jellege is. Az ötödik fejezetben a fenntarthatóság általános és energetikai kontextusának bemutatása következik, ahol az evolúciós-történeti áttekintő során fókuszálók az energiatrilemma és -átmenet témaköréhez való eljutásra. A megállapítások levonása után azok átültetése következik az EU energiapolitikájának és -stratégiájának megértése szempontjából, mind jogszabályi, mind pedig piaci trendek megvizsgálása során. Ebben a közelmúltbeli multiváltságok hatásainak és következményeinek elemzése szerves részét fogja képezni a gondolatmenetnek. Végezetül, az összefoglalás előtti utolsó fejezetben pedig empirikus kutatással, statisztikai úton megvizsgálom a nagykereskedelmi villamosenergia-árak alakulását befolyásoló tényezőket, illetve az áramárakat előrejelző modelleket a multiváltságok hatásainak figyelembevétele mellett és nélkül, összehasonlítva ezzel ezen események mélyreható hatását az energiaárak tekintetében.

Ez a struktúra pedig lehetővé teszi azt is, hogy a kutatási kérdéseimhez és hipotéziseimhez kapcsolódó vizsgálatok behatárolhatóak legyenek az egyes fő- és alfejezetekben. Végezetül megjegyezném, hogy hiszek abban, hogy egy ábra többet mond ezer szónál. Ezért számos grafikon szolgálja a megértést e gondolatmenetben.

2. Energetikai körkép

Az energiatrilemma és -átmenet témakörének részletes megismerése és megértése előtt fontosnak tartom bemutatni első körben az energetika rendszerszemléletét és kapcsolódási pontjait, valamint áttekinteni néhány szükséges, a kutatási témához kapcsolódó energetikai alapfogalmat és klasszifikációt, megalapozva ezzel a kifejezések helyes és konzisztens használatát a továbbiakban. Ezt követően bemutatásra kerül az EU energiaföldrajza, így a releváns energiaforrások elérhetőségének és az energiagazdálkodásban betöltött szerepének a helyzete, mely gondolatmenet átível a jelenlegi energiapiacok, kiváltképp a villamosenergia-piac működésének technikai és gazdasági vizsgálatához. Utóbbi témakörhöz kapcsolódóan, az empirikus vizsgálataimat illetően szintén ismertetésre kerülnek szakirodalmi áttekintésként a nagykereskedelmi villamosenergia-árak és az azokat befolyásoló tényezők kapcsolatrendszerével, valamint a tőzsdei áramárak előrejelzési modelljeivel foglalkozó korábbi kutatások és azok eredményei. Végezetül az EU energiaföldrajzát és -piacát követően betekintést nyújtok a klímaváltozás elleni küzdelem és a fenntarthatóság témakörébe, lefektetve ezzel az energiatrilemma problematikájának mindhárom vetületét. Ugyanakkor jelen fejezetben nem célom az uniós energiapolitikai irányok, szabályok és konkrét lépések áttekintése és elemzése – e feladat a későbbi vizsgálataim szerves részét fogja képezni.

2.1. Fogalmi alapismeretek

2.1.1. Energetikai rendszerelmélet

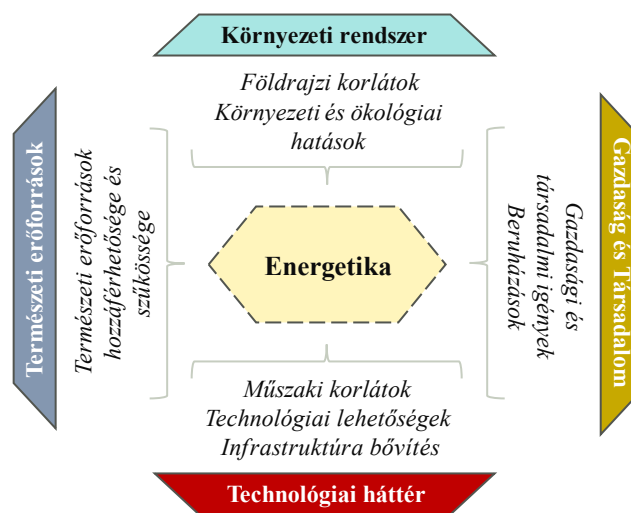
Az energetika mindennapjaink szerves részét képezi, alapvetően befolyásolva életmódunkat, gazdaságunkat, társadalmunkat és környezetünket. Minden nap, amikor felkapcsoljuk a villanyt, beindítjuk az autónkat, vagy fűtünk a téli hidegben, az energetikai rendszer részeseivé vállunk.

Maga az energetika egy olyan multidiszciplináris szakterület, amely alapvetően az energia termelését, átalakítását, átvitelét, tárolását és felhasználását tanulmányozza az energetikai rendszereken keresztül. Ez a rendszerszemlélet egy holisztikus megközelítés, amely az energiaellátási lánc összes elemét és azok kölcsönhatásait, valamint az ezekhez kapcsolódó gazdasági, társadalmi, környezeti és technológiai tényezőket figyelembe véve vizsgálja az energia rendszerek összetettségét. Következésképp az energetikai rendszerszemlélet fontos

eszköz a hatékony, fenntartható és ellenálló energia rendszerek tervezéséhez és üzemeltetéséhez (Molnár, 2021).

Ahogy a 2. ábrán is látható, ebben az összefüggésben az energiarendszerek elemzésének makroszintű megközelítése tehát nem csak a fizikai infrastruktúrát és a műszaki-technológiai szempontokat veszi figyelembe, hanem a társadalmi-gazdasági és természeti-környezeti dimenziókat is. Ebben a rendszerszemlélet változatban az utóbbi vetület szétbontása és külön keretek között történő értelmezése még jobban felhívja a figyelmet korunk egyik legnagyobb kihívására, a fenntartható energiagazdálkodásra.

2. ábra Az energetika rendszerszemlélete



Forrás: Kriechbaum et al. (2018) alapján saját készítésű ábra

Ennélfogva, az energetika célja és feladata sem egyszerűsíthető le egy dimenzióra, azt e négy oldalról szükséges vizsgálni, mely Bihari (2012) munkásságán alapulva, de a természeti-környezeti rendszert szétbontva, míg a gazdasági és társadalmi aspektust együtt kezelve az alábbiakat jelenti:

- ❖ *Gazdasági – társadalmi vetület:* A gazdasági és társadalmi vetületek összekapcsolása reflektál arra, hogy az energetikai döntések hogyan befolyásolják a gazdasági növekedést, az ipart, a foglalkoztatást, a versenyképességet és a társadalmi jólétet. Az energiaárak volatilitása, az energiaellátás biztonsága, az energiaszegénység kezelése és a tiszta energiákhoz való hozzáférés mind fontos tényezők, amelyek összefüggnek a gazdasági lehetőségekkel és a társadalmi egyenlőséggel;
- ❖ *Technológiai vetület:* A technológiai vetület azokat az innovációkat és fejlesztéseket öleli fel, amelyek lehetővé teszik az energetikai rendszerek hatékonyságának,

megbízhatóságának és fenntarthatóságának növelését. Ide tartozik többek között a kitermelésért, átalakításért és szállításért felelős háttérinfrastruktúra, a tárolási technológiák, és az intelligens energiahálózatok. Az innováció és technológiai fejlődés kiemelkedő szerepet játszik az energiaátmenet elősegítésében;

- ❖ *Környezeti vetület:* A környezeti vetület az energetikai rendszerek és tevékenységek természetes környezetre gyakorolt hatásait, a földrajzi lehetőségeket és korlátokat vizsgálja. Ehhez a körhöz tartozik például az üvegházhatású gázok kibocsátása, légszennyezés, vízhasználat és a biodiverzitásra gyakorolt hatások, vagy az éppen az urbanizáció, mezőgazdaság és az iparosodás földrajzi aspektusai. Az energetikai és a kapcsolódó rendszerek környezeti lábnyomának csökkentése és az energiahatékonyság javítása kulcsfontosságú a fenntartható fejlődés szempontjából;
- ❖ *Természeti erőforrások vetülete:* Az utolsó dimenzió az energiarendszerek és a rendelkezésre álló természeti erőforrások közötti kapcsolatot testesíti meg, beleértve a megújuló és a nem megújuló energiaforrásokat, az energiaföldrajzi adottságokat. A fenntarthatóság lényege a természeti erőforrások hatékony és környezettudatos felhasználása, valamint a megújuló források felé való elmozdulás.

Ez a megközelítés tehát lehetővé teszi az energetikai rendszerek komplexitásának mélyebb megértését, figyelembe véve azokat a kihívásokat és lehetőségeket, amelyekkel a jelenkorban szembesülünk az energiahasználat területén, és amelyek szabályozási keretrendszert igényelnek. Ez pedig a kapcsolódási pont az integrált energetikai rendszerszemlélet és az energiapolitikák között. Ugyanis a rendszerszemlélet az energetikában azt is jelenti, hogy a politikai döntéshozók és a szabályozók figyelembe veszik az energetikai rendszerek komplexitását és összetettségét az energiastratégiák és jogszabályok kialakítása során, valamint azoknak a gazdasági, társadalmi, környezeti és természeti rendszerekkel való kölcsönhatásait. Hiszen az energiapiacoktól önmagában nem várható el, hogy a természeti erőforrások és környezet védeleméért, valamennyi társadalmi réteg szükségleteinek kielégítéséért vagy a nemzetállamok ellátásbiztonságáért feleljen (United Nations Development Programme [UNDP], 2000). Tehát az olyan energiaszabályozások, mint a szén-dioxid kvóták, környezetvédelmi előírások, megújuló energia támogatási rendszerek és beruházásösztönzők, a szabályozott lakossági energiaárak, vagy a különféle energiahatékonysági és K+F programok mind egy-egy vagy egyszerre több vetületét érintik az energiarendszereinknek.

Összességében, az energetika rendszerszemléte egy átfogó és komplex értelmezést testesít meg, melyből az következik, hogy sem az energiarendszereket, sem az azokra épülő energiapolitikákat nem szabad önmagában vizsgálni, hanem szükséges átfogóan, az adott

gazdasági-társadalmi, természeti-környezeti és technológiai beágyazottság kontextusában elemezni és értékelni.

2.1.2. Fizikai alapismeretek és összefüggések

Az energetika tehát az energia ellátási láncának tervezésével, üzemeltetésével, gazdasági és környezeti hatásaival, valamint a kapcsolódó technológiák fejlesztésével és szabályozások bevezetésével foglalkozik. Maga az energia az ókori görög eredetű „*energeia*” szóból származik, mely Arisztotelész i.e. 400 körüli egyik munkásságában volt fellelhető filozófiai kontextusban, tehát jelentése akkoriban még egészen tág fogalomnak volt tekinthető. Majd egészen a 18-19. századig kellett várni, hogy az energia szó a fizikatudományok szempontjából a mai értelemben véve is használatba kerüljön (Smil, 2017a).

Általános (fizikai) értelemben az **energia** nem más, mint a test állapotváltoztató, azaz munkavégző képessége. Tehát az energia az anyag egy fizikai tulajdonsága, megjelenési formája, mivel azt a fizikai mennyiséget jelenti, ami egy adott test változtatóképessége. Jele *E*, mértékegysége a J (*Joule*). A definícióból adódik, hogy az energia a munkavégzéssel szoros kapcsolatban van, amely pedig akkor következik be, ha az adott test erő hatására elmozdul, tehát az erő munkát végez. Ebből következik, hogy az **erő** (jele *F*, mértékegysége a N (*Newton*)) és a **munka** (jele *W*, mértékegysége – hasonlóan az energiához – a J (*Joule*)) is szorosan kapcsolódik az energia fogalmához. Továbbá munkavégzés sebességét a **teljesítmény**, vagyis az egységnyi idő alatt végzett munka írja le. A teljesítmény a végzett munka és az idő hányadosa, jele a *P*, mértékegysége a W (*Watt*), amely tehát 1 J/s-nek felel meg (Erostyák & Litz szerk., 2003; Molnár, 2021; Smil, 2017a). Korábban használatos volt az LE (lóerő) is mértékegységként, de ez nem része a nemzetközi SI-mértékegységrendszernek, és főleg az autóipar alkalmazza még. A témához kötődő valamennyi tudományos mértékegység és átváltás a Függelék *F1. táblázatában* található meg.

Már az 1800-as évek közepén megállapították, hogy az energia mennyisége összességében állandó, tehát se létrehozni, sem pedig megsemmisíteni nem lehet, csak átalakítani egyik energiaformából a másikba, ez az energiamegmaradás elve. Egy zárt rendszerben tehát a végbemenő folyamatok fajtájától függetlenül az energiák összege állandó, míg egy környezettől nem elszigetelt rendszerben pedig a rendszer energiája pontosan annyival nő, amennyivel a környezeté csökken, és vice versa (Bihari, 2012; Goldemberg, 2012; Molnár, 2021). Az energia nem vész el, csak átalakul elve alapvetően befolyásolja a gyakorlati életünket, hogy hogyan használjuk az energiát a mindennapokban, ideértve az élelmiszer-

fogyasztás és anyagcsere összefüggését, vagy az otthoni háztartási elektronikus eszközök áramfelvételének és hőleadásának kapcsolatát. De ezen az energiamegmaradás elvén működnek az erőműveink is, amelyek egy adott energia formát alakítanak át másik energiaformává. Az energiaátalakítás lehetőségeit a Függelékben található *F2. táblázat* tartalmazza.

Ez a meghatározás magába foglalja, hogy az energia több formában is létezik, melyek tovább kategorizálhatók aszerint, hogy mozgásban vagy tárolt állapotban lévő energiátípusról van szó. A hat alapvető megjelenési formát, a számos kapcsolódó energiátárolási módszert az *1. táblázat* mutatja. Fontos megjegyezni, hogy valamennyi energiaforma (pl. mechanikai energia), illetve erőhatás (pl. centrifugális erő) visszavezethető a négy alapvető kölcsönhatásra (gravitációs, elektromágneses, erős és gyenge nukleáris). Ezek az alapvető erők irányítják az univerzumban lévő részecskék közötti kölcsönhatásokat és a természetben lezajló folyamatokat (Goldemberg, 2012; Tóthné Szalontai et al. szerk., 2018).

1. táblázat Az energiaformák alapvető klasszifikációja

Energiaformák	Energiatípusok állapot szerint		
	Mozgásban lévő energia	Tárolt energia	Tárolási mechanizmusra példák
<i>Villamos energia</i>	<i>Elektromos áram</i>	<i>Elektromos potenciál</i> <i>Elektrosztatikus mező</i> <i>Nyugvó vezető</i>	Szuperkapacitás, kondenzátorok, tekercsek, szupravezető anyagok
<i>Elektromágneses energia</i>	<i>Elektromágneses sugárzás</i>		
<i>Kémiai energia</i>		<i>Kémiai potenciál</i> <i>Belső energia</i> (= <i>Energiahordozók</i>)	Akkumulátor, szél, kőolaj, hidrogén, glükóz
<i>Nukleáris energia</i>		<i>Nukleáris potenciál</i> <i>Kötési energia</i> <i>Atomtömeg</i>	Hasadó anyagok
<i>Mechanikai energia</i>	<i>Kinetikus (mozgási) energia</i>	<i>Potenciális (helyzeti) energia</i> <i>Tehetlenségi potenciál</i> <i>Gravitációs potenciál</i> <i>Rugalmas energia</i> <i>Nyomási energia</i>	<i>Gravitációs:</i> víztorony, hidraulikus gát, megemelt súly; <i>Nyomási:</i> gázpalack, propán tartály <i>Kinetikus:</i> lendkerék, tömeg mozgásban
<i>Termikus energia</i>	<i>Hő</i>	<i>Érzékelhető hő;</i> <i>Látens hő</i>	Tömeg, fázisváltó anyagok

Forrás: Bihari (2012), Molnár (2021) és Vajda (2004) alapján saját összeállítás

A fenti táblázatból kiemelném a **villamos energiát**, mely a kutatási témám egyik fő pillérét alkotja. Az elektromosság mindennapi használata a 19. század végén kezdődött, amikor a villamos energián alapuló izzólámpák, a kezdetleges villamosenergia-hálózatok és a villamos motorok alkalmazása egyre elterjedtebbé vált a városokban. Majd a 20. század során a villamos energia használata rohamosan fejlődésnek indult, ami magának az energiahordozó

megkérdőjelezhetetlen előnyeinek volt köszönhető. Ezek közül kiemelendő a sokoldalúság, hiszen a világítástól a fűtésen és hűtésen keresztül az ipari gépek, háztartási és közlekedési eszközök működtetésén át a legkülönbözőbb alkalmazásokhoz használható, amely miatt nélkülözhetetlen a fogyasztók energiaszükségleteinek kielégítésében. Emellett viszonylag gazdaságosan és számos módon állítható elő. A villamos energia legnagyobb részét erőművel állítják elő, ahol az utolsó lépésben mechanikai energia alakul át villamos energiává. Ugyanakkor, elektromosság szintén előállítható közvetlenül például kémiai (üzemanyagcellák, akkumulátorok), elektromágneses (napelemek) vagy termikus (termoelektromos generátorok) energiából is. Továbbá jól skálázható, automatizálható, valamint flexibilis és nagy távolságokra is hatékonyan, kis veszteség mellett szállítható el. Majd a felhasználás helyén szintén viszonylag hatékonyan alakítható át hasznos energiává. Tehát a transzformálásokat tekintve jó közvetítő energiának minősül. Végezetül, fontos kiemelni azt is, hogy tiszta energiahordozónak minősül, mivel nem bocsát ki közvetlenül káros anyagot sem. Természetesen a villamos energiának hátrányai (energiatárolás nehézségei, fennálló függőség a fosszilis tüzelőanyagoktól, előállításának környezeti hatásai) és korlátai (folyamatos infrastruktúra fejlesztés szükséges) is vannak (Bodnár, 2019).

A villamos energia az elektromos töltésű részecskék (elektromos töltések) mozgásából származik, amelyek alapvetően lehetnek ionok vagy elektronok. Ezen elektromos töltések rendezett egyirányú mozgása az **elektromos áram**, melynek jele I és mértékegysége az A (*Amper*). Az elektromos áramnak alapvetően két fajtáját különböztetjük meg a töltések mozgásirányát tekintve – az egyenáramot és a váltakozó áramot –, melyeknek a gyakorlati felhasználása különböző. Utóbbi jellemzésére használatos még a **frekvencia** (jele f , mértékegysége a Hz (Hertz)), amely a váltakozó áram periodikus időbeli változásának gyakoriságát fejezi ki. Látható tehát, hogy az elektromos áram a mozgásban lévő villamos energiát testesíti meg, a továbbiakban a villamos energia és az áram kifejezéseket egyenértékűnek fogom tekinteni jelen dolgozatban.

Ezzel szemben, amikor arról beszélünk, hogy a töltéseknek mekkora munkavégző képessége (vagyis energiája) van, akkor az **elektromos feszültségről** van szó. Ha ezt a munkavégző képességet egy kitüntetett ponthoz viszonyítjuk, akkor az elektromos potenciál, ha pedig a térben két pont közötti potenciálkülönbséget vizsgálunk, akkor feszültség jelenségét írjuk le. A feszültség jele U , mértékegysége a V (*Volt*), és hasonlóan az egyen- és váltakozó áramhoz, a feszültség is lehet egyen- vagy váltakozó (Erostyák & Litz szerk., 2003; Smil, 2017a; Tóthné Szalontai et al. szerk., 2018).

Amikor tehát a munkavégzés elektromos mezőben történik, akkor hasonlóképpen, a mezőben lévő töltésre erő hat, s az adott test elmozdul, tehát munkavégzés történik. Az eltelt időn túl az elektromos munka nagysága függ a feszültségtől és az áramerősségtől is. Az elektromos munkavégzés sebességét az **elektromos teljesítmény** jellemzi, mely a feszültség és az áramerősség szorzata. Mind az elektromos munka, mind a teljesítmény SI-beli jele és mértékegysége megegyezik a nem elektromos mezőben lévőével. Az elektromos munka nem-SI-beli mértékegysége a kilowattóra (kWh), mivel az elektromos munka a teljesítmény és a munkavégzés időtartamának szorzataként is kiszámítható, melyet **elektromos fogyasztásnak** is hívunk. 1 kWh tehát az az elektromos munka, amit egy 1 kW teljesítményű elektromos fogyasztó 1 óra alatt vesz fel. Ennek a munkának nem a teljes része lesz hasznos a munkavégzés célját illetően, egy része e tekintetben „haszontalan”, és energiavesztésként foghatjuk fel. Az összes munkához képest a hasznos munkavégzés arányát a **hatásfok** adja meg (Munkácsy, 2018; Tóthné Szalontai et al. szerk., 2018).

Nézzünk utóbbiakra konkrét hazai gyakorlati példákat is, amelyek segítenek a későbbiekben bemutatásra kerülő grafikonokon és táblázatokban szerepelő értékek és mértékek megfelelő kontextusba való helyezésében. Magyarországon a hálózati feszültség effektív értéke 230 V, a frekvencia 50 Hz, míg a hálózati váltakozó áram erőssége attól függ, hogy milyen és hány db fogyasztó van bekapcsolva, de van magának az áramhálózatnak is egy maximális áramfelvételi kapacitása a vezetékvezés függvényében. Otthonainkban tipikusan 16 vagy 32 A áramerősség érhető el. Kiemelendő, hogy Bodnár (2019) szerint az emberi test ellenállása függvényében már akár 25 - 100 mA szervezeten áthaladó elektromos áram is életveszélyes lehet, ezért szükséges kellő körültekintéssel eljárni minden esetben.

Ha bármilyen otthoni elektronikus fogyasztóberendezést megnézzünk, mindegyiken feltüntetésre kerül a feszültség és frekvencia értéke és az adott eszköz elektromos teljesítménye is, mely alapján meghatározható az áramerősség nagysága. Egy hajszárító átlagos teljesítménye 1000-2000 W a fokozatok függvényében, mely alapján kiszámítható a fogyasztása egy adott időintervallum alatt: például egy 2000 W teljesítményű hajszárítónak 1 óra alatt 2 kWh a fogyasztása. A villamosenergia-felhasználás hatékonyságát az energiahatékonysági címkén is kötelező feltüntetni számos háztartási eszköz esetében. A Magyar Villamos Művek (é.n.) felmérése szerint egy hűtőszekrény és mosogatógép naponta 2-2 kWh-t, egy mosógép (négytagú család heti mosása) 10 kWh-t, míg az asztali számítógép 3 órás használata 1 kWh-t fogyaszt átlagosan. Ezek és egyéb háztartási eszközök fogyasztásának tükrében úgy becsülik, hogy egy négy fős családi ház átlagos havi villamos energia fogyasztása nagyjából 230 kWh körül alakul.

A későbbi fejezetek során bemutatott aggregált szintű szektorális, valamint iparág-, régió- és országspecifikus energiaadatoknál ennél értelemszerűen szignifikánsan magasabb értékek láthatók havi vagy éves összesítésben.

2.1.3. Energiaforrások és -hordozók csoportosítása és összehasonlítása

Az előző alfejezetben részletezésre került, hogy az elektromosság miért az emberiség számára az egyik legfontosabb és legszélesebb körben használt energiaforma. A villamos energia – más energiaformák mellett – az energiarendszerünk részét, annak gyakran végtermékét képezi. Ez az energiarendszer a gyakorlatban és nagyon leegyszerűsítve, fogyasztói szemszögből azt a keretet jelenti, amelyben a központi elemként szolgáló különféle erőművek a természetben elérhető erőforrásokat felhasználják, átalakítják, majd eljuttatják a fogyasztók számára egyedi felhasználásuk céljából (3. ábra).

3. ábra Az energiarendszerünk alapvető működése



Forrás: Saját készítésű ábra

Ennek az energialáncnak, egyes komponenseinek a részletesebb áttekintése hozzájárul az energiarendszereink működésének és kihívásainak átfogó megértéséhez.

2.1.3.1. Az energiaáramlás útja elméleti megközelítésben

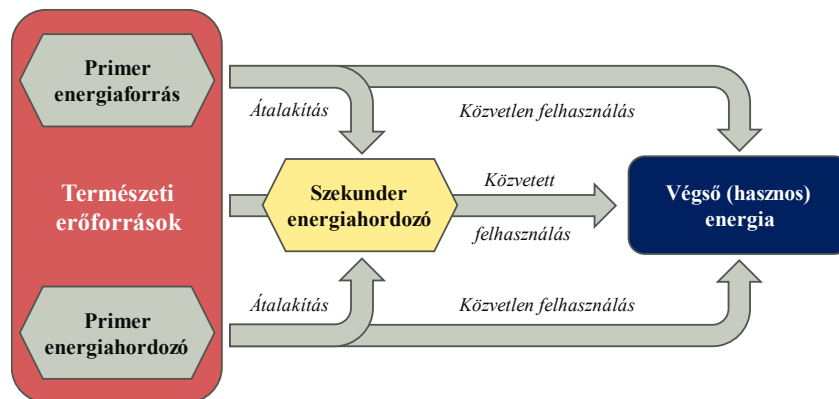
Az energiarendszerek működése során különböző fázisokban különböző energiaformákról van szó, melyek fontos szerepet játszanak az energia előállításában, átalakításában, szállításában és felhasználásában, valamint az energiamérleg alapját is képezik.

Az energiatermelés fő célja a különböző szektorbeli fogyasztókhoz a végső energia eljuttatása, hogy azt hasznos energiaként tudják felhasználni. **Hasznos energia** az a tényleges energia, amelyet a különféle fogyasztó berendezések átalakítanak és felhasználnak a kívánt munka vagy szolgáltatás elvégzésére (pl. melegítés – hőenergia, mozgatás – mechanikai energia). Mielőtt hasznos energiává alakulna át a rendelkezésünkre bocsátott energia, azt az

állapotot **végso energiának** hívjuk. Ez az, amely a fogyasztók számára közvetlenül elérhető, és még átalakításra vár a végfelhasználói eszközökben (Molnár, 2021; Norouzi, 2020).

Ez egy több lépcsős folyamat, amit a 4. ábra szemléltet, ezért megkülönböztetünk még primer és szekunder energiákat is. Ez az alfejezet ennek a kapcsolatrendszernek a feltérképezésével foglalkozik.

4. ábra Az energiaellátási rendszer elméleti alkotóelemei



Forrás: Bihari (2012) és Norouzi (2020) alapján saját készítésű ábra

Kiindulási pontként a természeti-környezeti vetületet szükséges görcsö alá venni, mivel ez biztosítja a társadalom számára a szükségletek kielégítéséhez nélkülözhetetlen természeti elemeket. A természeti erőforrások fogalmát tágran értelmezhetjük, de alapvetően olyan anyagok vagy jelenségek, amelyek természetes formában állnak rendelkezésre a Földön, és amelyeket az emberiség gazdasági, társadalmi vagy kulturális céljaira hasznosíthat, így felhasználhatóak az energiatermelésben és az ipari feldolgozásban. Ide tartoznak többek között a vízkészletek, a talaj, a fosszilis tüzelőanyagok, a Föld ásványkincsei, a növényzet, az állatvilág és az energiát biztosító természeti jelenségek, mint például a napfény és a szél (Bihari, 2012).

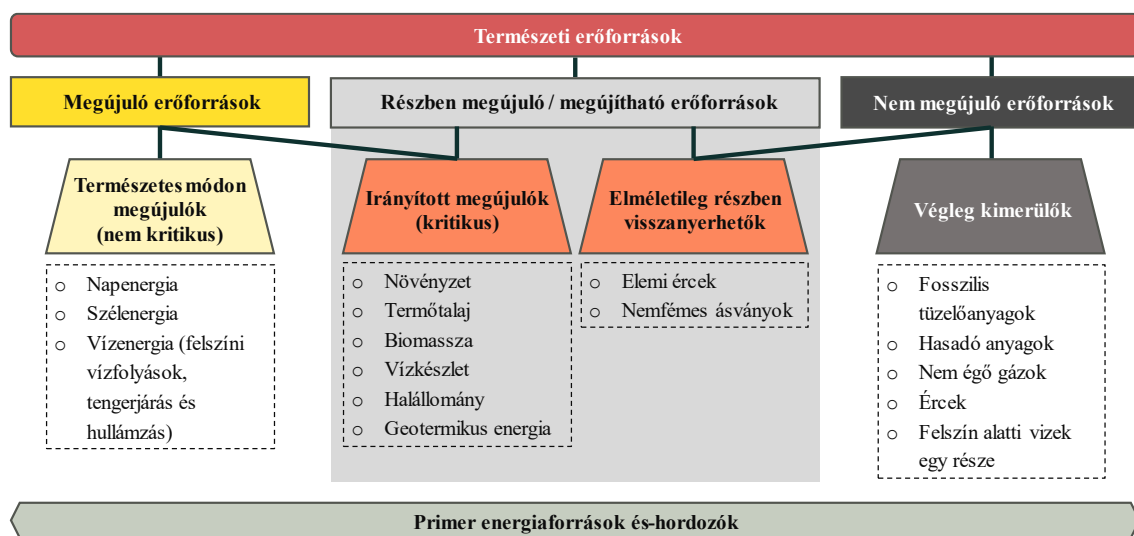
Ugyanakkor a természeti erőforrások teljes skáláját az emberiség még nem képes hasznosítani. Vannak olyan természeti erőforrások és jelenségek, amelyeket az emberi társadalom jelenleg nem, vagy csak korlátozott mértékben hasznosít. Ennek számos oka lehet, többek között a technológiai korlátok, avagy gazdasági, etikai és környezetvédelmi megfontolások. Erre jó példa a mélytengeri áramlatok vagy a Földünket érő kozmikus sugárzások effektív hasznosítása.

A természeti erőforrások elérhetősége és költsége egy összetett kérdés. Bár a természeti erőforrások egy része – mint például a napfény vagy a levegő – "ingyenesnek" tekinthetőek

abban az értelemben, hogy nem kell értük közvetlenül fizetni a használatukhoz, a legtöbb természeti elem kiaknázása, feldolgozása és szállítása jelentős költségekkel jár, amelyek meghatározzák ezen erőforrások piaci árát és hozzáférhetőségét a társadalom számára.

Az elérhetőséget tekintve pedig, ahogy Kerekes (2007) is felhívja a figyelmet rá, korábban valamennyi természeti erőforrást szabad javaknak tekintettek, mivel úgy gondolták, ezek a természetben készen és korlátlanul állnak rendelkezésre állandó minőségben. Mindazonáltal ma már tudjuk, hogy ez nem igaz, és a természeti erőforrások egy része elfogyhat, de ez nagyban függ az adott erőforrás típusától és felhasználásának módjától. A természeti erőforrások kimerülése súlyos környezeti és gazdasági következményekkel járhat, éppen ezért a fenntartható fejlődés és gazdaság központi eleme a természeti erőforrások megőrzése (Molnár, 2021). Éppen ezért, a fenntarthatóság szempontjából legalább kettő (Kerekes, 2007; Vajda, 2004), de inkább három (Bihari, 2012; Bora & Korompay, 2003; Molnár, 2021) típusra bonthatjuk a természeti erőforrásokat, amit az 5. ábra is szemléltet:

5. ábra A természeti erőforrások fenntarthatóság szerinti megbontása



Forrás: Bihari (2012), Bora & Korompay (2003) és Molnár (2021) alapján saját készítésű ábra

- 1) *Megújuló erőforrások:* Ezeknek az erőforrásoknak egy része természetes módon megújul és gyakorlatilag korlátlan módon kitermelhető, hasznosítható (pl. napenergia, szélenergia, tengerjárás). Másik részük ugyanakkor irányított megújulónak minősül, túlhasználat következtében kritikus fázisba kerülnek, a regeneráló képességük pedig nem elegendő a megújuláshoz. Ide tartozik többek között a növényzet, termőtalaj, vízkészlet, vagy a hulladék-asszimilációs kapacitás is;

- 2) *Kimerülő, azaz nem megújuló erőforrások*: Hasonlóan, itt is két altípusra bonthatóak ezen természeti erőforrások. A nagy részük véglegesen kimerülő erőforrásnak minősül (pl. fosszilis tüzelőanyagok, hasadó anyagok), tehát a társadalom számára rendelkezésre állásuk véges. Elméletileg ezek között is vannak olyan elemek, amelyek idővel visszanyerhetőek (pl. elemi érc) a felhasználásuk és regeneráló képességük közötti egyensúlyuknak függvényében, habár ezek gyakran emberi időskálán mérve nem értelmezhetőek.

A fenti ábrán megfigyelhető, hogy a természeti erőforrások fenntarthatóság szerinti osztályozása összességében megfeleltethető a primer energiaforrások és -hordozók típusainak is, csupán más megközelítésből és az energiatermelésben betöltött szerepük szerint.

Primer (elsődleges) energiák azok a természeti jelenségek vagy anyagok, amelyekből közvetlenül vagy átalakítással energiát nyerhetünk ki. Általánosságban energiaforrásoknak hívjuk azokat a természetes formájukban munkavégzésre alkalmazható energiákat, mint például a nap-, szél-, víz- és geotermikus energia, míg energiahordozóknak nevezzük azokat az anyagokat, amelyek a természetben eredeti állapotukban találhatóak meg, tárolnak energiát, és felhasználhatóak az energialáncban (pl. ásványi szén, kőolaj, földgáz, urán) (Vajda, 2009). Mindkét altípusnak vannak olyan fajtái, amely a hasznos energia függvényében közvetlenül és közvetett módon is felhasználhatóak, amit korábban a 4. ábra is szemléltetett.

Munkácsy (2018) érdekességként megjegyzi, hogy bár a napenergia önmagában is megújuló energiaforrásnak minősül, voltaképp kettő kivételtől eltekintve minden primer energiaforrás és -hordozó a napenergiára vezethető vissza. Ez a kettő kivétel a geotermikus energia (mivel ez voltaképp a Föld belsejében radioaktív bomlás során keletkezett és tárolt hőenergia), valamint a Hold által okozott árapály jelensége. Ugyanakkor ezt a felsorolást még ki kell egészíteni azzal, hogy a nukleáris energia sem a napenergiából származik, mivel a földi hasadóanyag (pl. urán) egy olyan csillag robbanásakor (szupernóva) keletkezett, amely valahol a Nap kialakulása előtt a közelben volt, és a maradványok becsapódtak a formálódó Földünk felszínébe (World Nuclear Association, 2021).

Említendő még, hogy a primer energiákat a szakirodalom és az energiával foglalkozó intézmények és szervezetek további szempontok szerint is kategorizálhatják még. Például a Nemzetközi Energiaügynökség (*International Energy Agency, IEA*) jelentéseiben megkülönbözteti az ún. hagyományos és a nem tradicionális energiaforrásokat – ahol az előbbi javarészt a fosszilis tüzelőanyagokat jelenti –, míg az Európai Statisztikai Hivatal (*European Statistical Office, Eurostat*) adatgyűjtése során éghető és nem éghető üzemanyagok szerint is kategorizálja az egyes energiaforrásokat és -hordozókat. Továbbá, gyakran előfordul, hogy a

megújuló – nem megújuló energiákat a nem fosszilis – fosszilis energiahordozókkal hozzák párhuzamba. Ez azonban csak részben igaz, hiszen nem minden nem fosszilis energia egyben megújuló, gondoljunk csak a hasadó anyagokra. Tehát mindig kellő körültekintéssel szükséges használni a kifejezéseket és adatbázisokat.

Ahogy a 4. ábrán is bemutattam, primer energiából nem csak közvetlen hasznosítással lehetséges eljutni a végső, illetve hasznos energiához, hanem közvetett úton is, a primer energiaforrások és -hordozók feldolgozása és átalakítása révén. Ebben az esetben **szekunder**, vagy másnéven **másodlagos energiákról** beszélünk. A primer energia átalakítása során a létrejövő szekunder energia könnyebben szállíthatóvá, tárolhatóvá vagy felhasználhatóvá válik. Ilyen transzformáció során keletkezik a villamos energia, a koks, a cseppfolyósított földgáz (*liquified natural gas, LNG*), a különböző gáz- és olajtermékek, és a nukleáris fűtőelem is (Vajda, 2004). Legtöbb esetben a másodlagos és a végső energia gyakorlatilag egybeesik, mint például a hálózaton elérhető elektromos áram, mint „leszállított” szekunder energia felhasználása a robotgép működtetéséhez. Ebben az esetben a villamos energia egyben végső energia is, melyet a háztartási eszköz mechanikai energiává alakít át. Ugyanakkor vannak olyan esetek, amikor a másodlagos és a végső energia nem esik egybe, tehát a szekunder energia további átalakítási folyamatban vesz részt. Erre jó példa az elektromos járművek esete, ahol a villamos energia első körben szekunder energiaként feltölti az akkumulátort, melyben így kémiai potenciál keletkezik, majd a jármű indításakor a kémiai energia átalakul villamos energiává és az elektromos motorba áramlik, majd mechanikai energiává alakul.

Az energiaellátási lánc gyakorlati megvalósulását – a villamos energia előállításának mintáján keresztül – egy későbbi alfejezet mutatja be. Az energetikához kapcsolódó fogalmi háttérismeretek utolsó részeként már csak a primer energiaforrások és -hordozók egyes altípusainak részletesebb bemutatása, azaz előnyeiknek, hátrányaiknak és korlátainak feltárása van hátra.

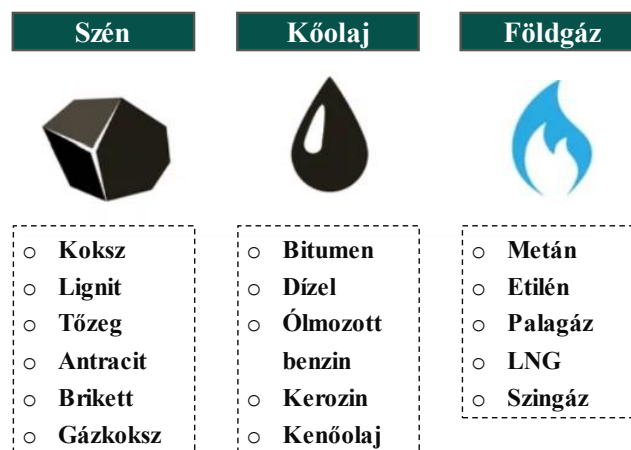
2.1.3.2. A fosszilis tüzelőanyagok jellemzői

A természeti erőforrások különböző osztályozása alapján világossá vált, hogy a környezeti hatásoktól függetlenül is hosszú távon a megújulóakra kell támaszkodnia a világnak az energiatermelés során. Annak, hogy a megújulók az elmúlt évtizedben kerültek igen jelentősen felfutásra, történelmi, gazdasági, technológiai és politikai okai vannak. Úgy is fogalmazhatunk, hogy ez egyfajta tanulási útja volt az emberiségnek, mely során megismerte a

fosszilis, nukleáris és megújuló energiákban rejlő lehetőségeket, előnyöket-hátrányokat és korlátokat.

A korábban definiált primer energiahordozók nagy részét a tüzelőanyagok, azon belül is a fosszilis és nukleáris tüzelőanyagok teszik ki. A **fosszilis energiahordozók** egy gyűjtőfogalom, mely ősi szerves anyagok maradványainak millió évek alatti geológiai folyamatok során bekövetkező átalakulásának termékeit nevezi meg. Mivel ez érzékelhetően sokkal hosszabb időt vesz igénybe, mint amennyi idő alatt felhasználjuk őket – főleg a mai modern világunkban –, ezért ezeket a forrásokat nem megújulónak tekintjük (Molnár, 2021; Smil, 2017a). Ide tartoznak a szénhidrogén-alapú szén, kőolaj és földgáz anyagok, és az ezekből átalakított termékek és származékok (6. ábra). Ezekre a másodlagos energiahordozókra azért van szükség, mert különböző ipari és háztartási alkalmazások eltérő módon hasznosítják a fosszilis energiahordozókban rejlő energiamennyiségeket.

6. ábra A fosszilis energiahordozók elsődleges és másodlagos fajtái



Forrás: International Energy Agency (IEA, 2004) alapján saját készítésű ábra

Molnár (2021) megjegyzi, hogy a szénhidrogének csak szén- és hidrogénatomokat tartalmazhatnak, tehát a kőolaj és a földgáz egyértelműen szénhidrogén-alapú anyagoknak minősülnek, hiszen a szén és a hidrogén különböző kombinációiból állnak. Ugyanakkor a szén elsősorban elemi szénből áll, de mivel fogalmazhatunk úgy, hogy a szén egy hidrogénhiányos szénhidrogén, a köznyelvben a szenet is gyakran a szénhidrogénekhez sorolják. Továbbá a szénhidrogének nem korlátozódnak csak a fosszilis energiahordozók körére, például a tisztított biogáz (biometán) is annak számít. Azonban a biogáz nem minősül tisztán szénhidrogéneknek, mivel többféle elemet tartalmaz, nem csak szénhidrogéneket (Bihari, 2012).

A Földön széles körben előforduló **szénkincs** a földtörténeti karbon időszakban, körülbelül 300-360 millió évvel ezelőtt kezdett képződni különböző ősi növények, fák és más szerves anyagok lebomlása, oxigénszegény környezetben való lerakódása és nagy nyomás alatti összepréselődése során. A szén különböző típusai – mint a lignit, a bitumenes szén és az antracit – a szerves anyagok lebomlásának különböző szakaszaiban keletkeznek, és eltérő elemi összetétellel, illetve energiatartalommal (fűtőértékkel) bírnak. A szén kitermelése főként két módon történik: felszíni, nyílt bányászattal (külfejtés) vagy mélyműveléses bányászattal. A kitermelt szén szállítása többnyire vonatokon, hajókon, teherautókon vagy futószalagokon keresztül történik. A szállítási mód függ a bányászati helyszíntől, a célpiactól és a rendelkezésre álló infrastruktúrától. A szén nemzetközi kereskedelme nagy részét tengeri úton bonyolítják, amely lehetővé teszi nagy mennyiségek gazdaságos szállítását, míg szárazföldön belül vasúttal bonyolítják le a szállítást. Tárolását tekintve általában nyílt tárolóhelyeken történik a kitermelési vagy a felhasználási hely közelében. A megfelelő tárolási körülmények biztosítása érdekében a szénhalmokat rendszeresen meg kell forgatni és szükség esetén meg kell öntözni, hogy csökkentsék az öngyulladás kockázatát. Végezetül, a szén felhasználása előtt általában szükség van előkészítési folyamatokra (tisztítás, szárítás, osztályozás, kokszosítás), hogy javítsák a tüzelőanyag minőségét (Ripudaman, 2013; Vajda, 2004).

A **kőolaj** képződése – hasonlóan a szénhez – hosszú geológiai időszakot igényel, valamint szintén szerves anyagok bomlásából, megfelelő környezeti hatások (nyomás, hőmérséklet) mellett indul be. A nyersolaj főként a tengerben elhalt élőlényekből és növényi szervezetekből származik, amely különböző folyamatokon és szakaszokon keresztül alakul át kőolajjává, mely porózus kőzetekben, úgynevezett olajmezőkben gyűlik fel gyakran víz alatti rétegekben vagy a szárazföld mélyén. Ezért a geológiai és geofizikai vizsgálatokat követően fúrótornyok segítségével érik el az olajmezőket, majd természetes és mesterséges módszerek által felszínre hozzák a kőolajat. Mivel a nyersolajat a természetes formájában nem igazán hasznosítják, így mindig feldolgozásra, finomításra kerül. Szállítását elsődlegesen tankhajókkal és csővezetékekkel oldják meg, míg tárolás szempontjából tartályokat alkalmaznak a szállítási pontok közelében (Bihari, 2012; Smil, 2017a).

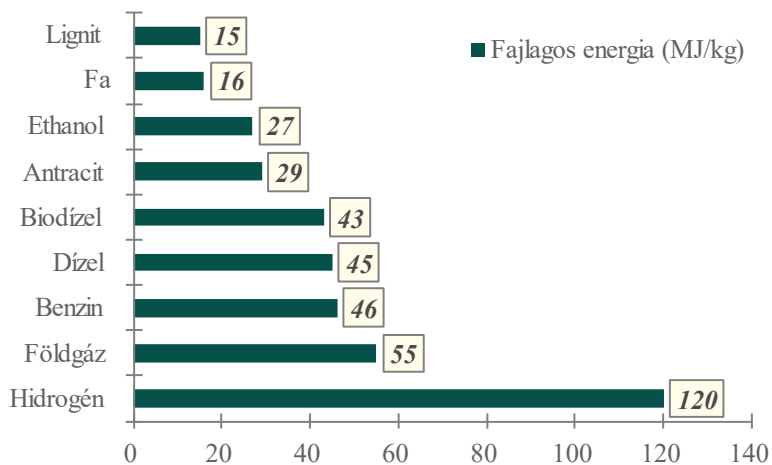
A **földgáz** és a kőolaj gyakran együtt fordulnak elő a földkéregben, de nem feltétlenül ugyanabban az arányban vagy összetételben. Az, hogy egy adott helyen kőolaj vagy földgáz, esetleg mindkettő képződik, több tényezőtől függ. Egyrészt a kiindulási szerves anyag típusa befolyásolja, hogy milyen típusú szénhidrogének keletkeznek. Másrészt alacsonyabb hőmérsékleteken és nyomáson inkább kőolaj képződik, viszont ha a hőmérséklet egy bizonyos tartomány fölé emelkedik, akkor a kőolaj tovább bomlik és földgázzá alakul. A képződött

szénhidrogének a kőzeteken keresztül vándorolhatnak, így különböző földtani csapdákbán gyűlhetnek össze. E migrációs folyamatok során a kőolaj és a földgáz elkülönülhet, ami azt eredményezi, hogy bizonyos területeken inkább kőolaj, más helyeken pedig földgáz található (Bhattacharyya, 2011; Molnár, 2021).

A földgáz kitermelése hasonlóan kezdődik, mint a kőolajnál: a földgáz a fúrólukon keresztül nyomás alatt kerül a felszínre, ahol különféle kezelési folyamatokon esik át a szállíthatóság céljából (pl. szennyeződések és víz eltávolítása). A megtisztított földgázt alapvetően csővezetékeken keresztül szállítják, míg földalatti tárolókban, például kimerült gázmezőkben vagy víztározó rétegekben és sótömbökben tárolják. Ugyanakkor a technológia fejlődésével a földgáz LNG és sűrített formában (*compressed natural gas, CNG*) is szállíthatóvá válik egyéb módokon, melyhez viszont speciális infrastruktúrára van szükség mind a feladó, mind a fogadó oldalon (Goswami & Kreith, 2017). A földgáz energiatermelésben való felhasználása közvetlenebb, mint a szén vagy a kőolaj esetében, mivel a földgázt általában nem alakítják át olyan széles körben más termékekké, mint ahogyan a másikat.

A fosszilis tüzelőanyagokban rejlő energia felszabadítása égetés útján történik. Egyéb primer energiahordozóknál is alapvetően vagy kémiai vagy nukleáris potenciál felhasználása megy végbe, előbbire jó példa a biomassza és hidrogén, utóbbira pedig az urán. De a hidrogén esetében tüzelés mellett üzemanyagcellák segítségével, elektrokémiai reakción keresztül is állíthatunk elő villamos energiát. Azt, hogy valamely energiahordozóból mekkora energia nyerhető ki, azt a **fajlagos energiasűrűség** jelöli, mely az energiát egységnyi tömegre (gravimetrikus) vagy térfogatra (volumetrikus) vetíti, illetve egyik kifejezhető a másikból is. Minél nagyobb az energiasűrűség, akkor egy adott térfogatban vagy tömegben annál több energia tárolható (Smil, 2016). A 7. ábra a fontosabb tüzelőanyagokat jellemző átlagos energiasűrűségeket mutatja be. A nukleáris fűtőanyagok azért nem kerültek rá az ábrára, mert szó szerint nem fértek volna föl rá, ugyanis azok rendelkeznek a legnagyobb energiasűrűséggel (1 gramm urán 235-ös izotópjának hasadása során átlagosan 80 000 MJ fajlagos energia szabadulhat fel (Bihari, 2012).

7. ábra Néhány tüzelőanyag fajlagos energiasűrűsége



Forrás: Smil (2016) alapján saját készítésű ábra

Az ábra alapján részben érthető, hogy a társadalom és az ipar fejlődése során miért váltotta le az emberiség a fatüzelést széntüzelésre, majd a széntüzelést olaj- és földgázhasználatra. Az azonban nem derül ki az ábráról, amire Smil (2016) is felhívja a figyelmet: a földgáz és a kőolaj tömeg helyett térfogat (liter vagy m^3) alapú energiasűrűségének összehasonlításakor az látható, hogy a nyersolaj térfogati energiasűrűsége mintegy ezerszerese a földgázénak. Ebből az következik, hogy a nyersolaj szállíthatósága szignifikánsan gazdaságosabb, mint a földgáz levegős halmazállapotában. Így a nyersolajat világszerte tartályhajókon szállítják, míg a földgázt hagyományosan csővezetéken. Ugyanakkor, a földgáz LNG vagy CNG állapotában már gazdaságosan szállíthatóvá válik.

A fosszilis energiahordozók fajlagos energiasűrűsége csak egy szempont a sok közül, amely jellemzi az egyes energiatípusokat. A 2. táblázatban összefoglaltam a szén, kőolaj és földgáz energiahordozók legjellegzetesebb közös és egyedi előnyeit és hátrányait.

2. táblázat A fosszilis energiahordozók használatában rejlő előnyök és hátrányok

Előnyök	Hátrányok
<p>Közös: Magas az energiasűrűségük (1. kőolaj, 2. szén, 3. földgáz) Nem függenek az időjárástól Kiepített infrastruktúra hálózat</p> <p>Szén: A többi fosszilis tüzelőanyaghoz képest olcsóbb Biztonságos a tárolása és szállítása Bőségesen rendelkezésre áll, széles körben elérhető</p> <p>Kőolaj: Sokoldalú felhasználás: villamos energia, fűtés, járművek üzemanyaga, gyógyszeripar Alacsony földhasználat Könnyen szállítható (vezetékek)</p> <p>Földgáz: Tisztább más fosszilis tüzelőanyagokhoz képest Gyors és hatékony energiaforrás Sokoldalú felhasználás (gáz, LNG): villamos energiára, fűtésre, járművek üzemanyaga Bőségesen rendelkezésre áll Könnyen szállítható (vezetékek)</p>	<p>Közös: Sem megújulóak, sem fenntarthatóak Véglegesen kimerülő tartalékok Magas károsanyag kibocsátást okoznak Veszélyeztetik az emberi egészséget (mérgező kibocsátások) A kitermelések negatív környezeti hatásai Jelentős vízszükséglet a villamos energia előállításához</p> <p>Szén: Jelentős szállítási igény (vonatok) Hulladék előállítás kezelésének szükségessége (hamu, salak)</p> <p>Kőolaj: Magas balesetveszély (erősen gyúlékony anyag) Gyakran geopolitikai konfliktusok eredője</p> <p>Földgáz: Metánszivárgás kockázata Magas balesetveszély (erősen gyúlékony anyag) Magas áringadozás</p>

Forrás: Goswami és Kreith (2017), Molnár (2021) és Ripudaman (2013) alapján saját összeállítás

A táblázatból kiemelném a mindegyikre jellemző káros környezeti és élettani hatásokat. Ezek a hatások több módon jelentkeznek, úgymint légszennyezés, éghajlatváltozás, valamint víz- és talajszennyezés formájában (Munkácsy, 2018; Vajda, 2001):

- ❖ **Légszennyezés:** A fosszilis tüzelőanyagok égetése során finom részecskék (PM_{2,5} és PM₁₀) kerülnek a levegőbe, melyek belélegezve légzőszervi és kardiovaszkuláris betegségeket okozhatnak. Emellett a különféle üvegházhatású gázok (ÜHG) – többek között szén-dioxid (CO₂), metán (CH₄) és a dinitrogén-oxid (N₂O) – hozzájárulnak a globális felmelegedéshez is, míg a nitrogén- és kén-oxidok olyan légszennyezők, amelyek részt vesznek a savas eső képződésben, illetve asztma és más légzőszervi problémák kialakulását is okozhatják;
- ❖ **Éghajlatváltozás:** Az előbbieken említett ÜHG-k növelik az éghajlatváltozás mértékét, ami szélsőséges időjárási eseményekhez, tengerszint-emelkedéshez, és az ökoszisztémák megváltozásához vezet, ami egyúttal befolyásolja a mezőgazdaságot, az ivóvízellátást és a bioszférát;
- ❖ **Víz- és talajszennyezés:** A kitermelés és bányászat vízszennyezéssel járhat, különböző nehézfémek és toxikus anyagok talajba történő szivárgásával, amelyek szintén veszélyeztetik az ivóvízkészleteket és az ökoszisztémákat. Továbbá a

kőolajszállítás és -finomítás során bekövetkező balesetek súlyos környezeti katasztrófákat is okozhatnak;

- ❖ *Élettani Hatások:* A légszennyezés, különösen a finom részecskék és a nitrogén-oxidok, közvetlenül befolyásolják az emberi egészséget, növelve a légzőszervi, szív- és érrendszeri betegségek, sőt, bizonyos esetekben a rák kockázatát is.

2.1.3.3. A jövő kulcsa: a megújuló energiák

A fosszilis energiahordozók jellemzőivel kontrasztban a megújuló energiák egészen más összképet nyújtanak. Természetesen ezen primer energiaforrások és -hordozók közel sem tökéletesek minden téren, ugyanakkor a legnagyobb pozitívumuk – nevezetesen a megújuló és tiszta (tisztább) jellegük – messze felülmúlja a fosszilis tüzelőanyagok alapvető előnyeit.

Földünk legjelentősebb megújuló energiaforrása a **napenergia**. A napenergia fény és hő formájában érkezik a Földre, azonban bolygónk légköri adottságai miatt egy része visszaverődik, vagy elnyelődik, továbbá a sugárzás mértéke ingadozik annak függvényében is, hogy mely földrajzi szélességen és az év mely szakaszában járunk, valamint milyenek az éppen adott meteorológiai körülmények. Mindazonáltal, a napsugárzás felületegységre jutó teljesítményét állandó nagyságúnak, átlagos értékét $1,35 \text{ kW/m}^2$ -ben határoztuk meg (ez a napállandó), mely azt az átlagos napenergia-mennyiséget jelzi, amely a Föld légkörének külső szélén, merőleges beesési szög mellett érkezik a Napból egy négyzetméternyi területre. A tényleges besugárzás mértéke, melyet energetikai célra hasznosíthatunk, ennél jelentősen alacsonyabb (Bihari, 2012).

Az emberiség már az ókorban is felismerte és kihasználta a napenergia előnyeit úgy, mint a tűzgyújtás, vízmelegítés, épülettervezés vagy a mezőgazdaság területén. Utóbbi esetében jelenleg is a legszélesebb körben hasznosítja közvetetten a napenergiát, hiszen a növények termesztése fotoszintézisen alapszik, amely részben az állattenyésztést és -tartást is megalapozta. A napenergia energiatermelés célú felhasználása csak az elmúlt évszázadban indult fejlődési útjának, elsősorban hőfejlesztés terén (napkollektorok). Ugyanakkor a technológia fejlődésével villamosenergia-fejlesztésre is létrejöttek megoldások, ilyenek a fotovillamos (*photovoltaic, PV*) naperőművek vagy a koncentrált napenergián (*concentrated solar power, CSP*) alapuló naphőerőművek (Bartholy et al., 2013; Molnár, 2021). Ezek az erőművek alapvetően ipari célokat szolgálnak ki, de a háztartási méretű kiserőművek (HMKE) terjedésével a lakossági fogyasztók is részesülhetnek a napenergiának köszönhető lokális

energiatermelésben, amely ideális lehet egy átlagos háztartás energiaszükségletének kielégítésére.

Közvetetten a Nap által okozott hőmérsékleti és légnyomáskülönbségek generálják a **szélenergiát** is. A szélenergia előállítására szélturbinák segítségével történik, melyeket ott érdemes telepíteni, ahol legalább 4-5 m/s az átlagos szélesség és megfelelő topográfiai paraméterek adottak. Ugyanakkor a nagy szélesség sem kedvező, egy bizonyos szint felett már biztonsági okok miatt le kell állítani a turbinák működését. Ideálisak a körülmények tengeri környezetben (*offshore*), ahol gyakorta nagyobb szél erőmű parkok (szélfarmok) is létrejönnek, de szárazföldi (*onshore*) helyeken is kialakulhatnak szélfarmok. Ugyanúgy időjárásfüggő, mint a napenergia, de ellentétben a naperőművekkel, a szél erőművek elméletben egész nap termelhetik az áramot (Goswami & Kreith, 2017).

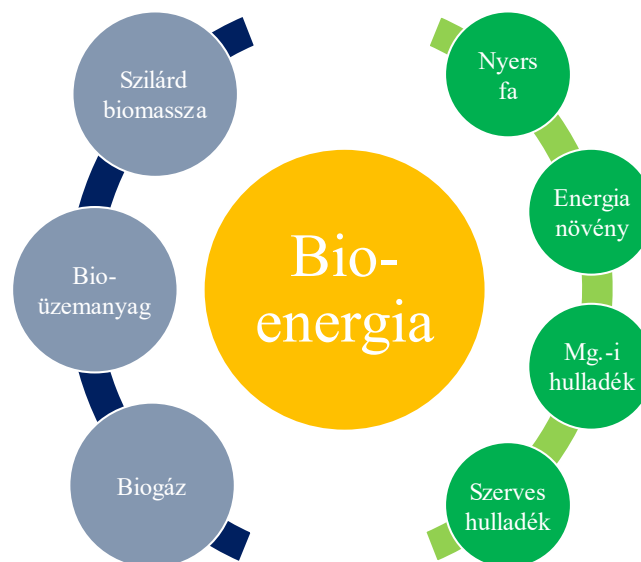
A **vízenergia** vagy másnéven hidroenergia hasznosításában rejlő potenciálok, hasonlóan a napenergiához, már nagyon régen felismerték. A vízi közlekedés mellett a mezőgazdaságban (vízimalmok) is jelentős szerepet kapott a vízenergia, majd később a vízturbinák megjelenésével a villamosenergia-termelésben is nagy jelentőséggel bírtak a vízerőművek. Maga a vízenergia egy gyűjtőfogalom, mely számos vízhasználathoz köthető energiaforrást takar, amelyek mindegyike a víz mozgási vagy potenciális energiájának kiaknázásán alapul. A folyami vízerőművek az áramló víz energiáját hasznosítják, míg ha az adott folyót elrekesztik, akkor mesterséges tározót hoznak létre. Ekkor a víztározóból a víz meredek csatornán keresztül, majd a turbinákon áthaladva képes villamos energiát termelni, tehát a kezdeti helyzeti energiából mozgási energia lesz, amely meghajtja az áramfejlesztő generátor rotorját. Abban az esetben, ha a vízerőmű szivattyúval is el van látva, akkor energiátárolóként és csúcsidőszakban rugalmas kapacitásként is szolgálhat, mivel képes visszapumpálni a lefolyt vizet a fenti tározóba. Ez természetesen akkor éri meg gazdaságilag, ha olyan időszakban történik a visszapumpálás, amikor az áram ára viszonylag olcsó. A folyami és a víztározós megoldások mellett a tengeri hullámzásban, valamint a tengerjárásban rejlő potenciálok is kiaknázhatóak, bár igaz, hogy a technológia és az energiakonvertálási hatékonyság még gyerekcipőben jár a többi megújulóhoz képest. A tengeri hullámok kinetikai energiáját lehet hasznosítani elektromos energia előállítására, míg az árapály erőművek az árapály által okozott vízszint-különbségeket hasznosítják (Bartholy et al., 2013; Vajda, 2004).

A **geotermikus energia** a Föld belsejéből származó hőenergia, amely a bolygó magjának hőjéből, radioaktív bomlási folyamatokból ered. Átlagosan 100 méterenként 3,3 °C-kal nő a hőmérséklet, de ez nagyban függ a földrajzi helyzettől, a geológiai szerkezettől és a helyi geotermikus aktivitástól. Ezt a hőenergiát közvetlenül fűtésre lehet hatékonyan felhasználni,

míg villamosenergia-termelés szempontból jelenleg csak minimális szinten járul hozzá az energiamérleghez. Korábban az 5. ábrán a geotermikus energia irányított megújulóknak lett osztályozva. Ez azért van így, mert a kitermelés a gőznyomás fokozatos csökkenésével jár, tehát nagyfokú a bizonytalanság a víz hőmérséklete és nyomása terén, vagyis a geotermikus erőforrás gazdaságos felhasználhatóságával kapcsolatban (Bihari, 2012).

A **bioenergia** szintén egy összetett fogalom, mivel a mögöttes energiahordozó különféle megjelenési formában létezik, illetve a nyersanyaga szintén többféle eredetű lehet. Alapvetően bioenergia az élő vagy nemrégiben elhunyt biológiai anyagokból, más néven biomasszából származó energia. Ide tartozik a nyers fa (tűzifa és maradványok), az energianövények (energetikai ültetvények, mezőgazdasági energiafűvek), a mezőgazdasági száraz és nedves hulladékok (kukoricacsutka, állati eredetű trágya) és a szerves háztartási és ipari hulladékok (ételmaradékok, fás és nem-fás hulladékok). A felsorolásból következtethető, hogy a bioenergia alapvetően növényi fotoszintézisből ered. Éppen ezért léteznek energianövények, amelyeket kifejezetten energetikai célból termesztenek és viszonylag magas energiatartalmú biomasszát képesek produkálni (Munkácsy, 2018). Továbbá, a szerves anyagokból létrejövő biomassza átalakítás útján háromféle formát ölthet: szilárd, folyékony és légnemű halmazállapotot (8. ábra).

8. ábra A bioenergiahordozók formái és forrásaik



Forrás: Bartholy et al. (2013) alapján saját készítésű ábra

A szilárd biomasszát, azaz a faanyagokat, pelletet, energianövényeket közvetlenül égethetjük el hőenergia és/vagy villamos energia előállítására céljából, vagy más formákba

(például bioüzemanyagokká vagy biogázzá) alakíthatják át. A bioüzemanyagokat, úgy, mint a bioetanolt vagy biodízelte különféle mezőgazdasági terményekből állítják elő (pl. kukorica, cukornád, olajos magvak) és jellemzően közlekedési célokra használják, míg a biogáz anaerob lebontás során keletkező gázkeverék. A biogáz fő alkotórésze a metán, amely éghető gáz, így energiatermelésre használható (Molnár, 2021).

A biomassa az egyik legnagyobb megújuló energiaforrás globális szinten, mivel széles körben elérhető és sokféleképpen hasznosítható. Ugyanakkor a helyi adottságok, mint a klíma, a földhasználat és a gazdasági tényezők jelentősen befolyásolják a hasznosításának gazdaságosságát. A biomassa termelést és felhasználást gondos tervezéssel és fenntartható módszerekkel kell megvalósítani, hogy maximalizáljuk előnyeit és minimalizáljuk a lehetséges környezeti és társadalmi kockázatokat. Éppen ezért került az irányított megújuló kategóriába a bioenergia, mivel a kitermelés fenntarthatósága nagyban függ a forrás rendelkezésre állásától. Tisztaságát tekintve elméletileg karbonsemleges. A növények növekedésük során CO₂-t vesznek fel a légkörből, ami ellensúlyozhatja a biomassa elégetésekor vagy energetikai feldolgozásakor felszabaduló CO₂-t. Ez az egyensúly azonban szintén a biomassa energiagazdálkodási gyakorlatától függ (Juhász et al., 2009). Kiemelendő, hogy a biometán – mely a szén-dioxidtól és a többi szennyező anyagtól tisztított biogáz – minősége és összetétele hasonló a földgázéhoz, így közvetlenül felhasználható bármely olyan alkalmazásban, ahol földgázt használnak. Ennek ellenére, infrastrukturális és gazdasági okokból széleskörű elterjedése nem történt még meg (Bartholy et al., 2013).

A 3. táblázatban összefoglalásra kerültek a megújuló energiaforrások és -hordozók egyes altípusai szerinti főbb előnyök és hátrányok.

3. táblázat A megújuló energiaforrások és -hordozók használatában rejlő előnyök és hátrányok

Előnyök	Hátrányok
<p><u>Közös:</u> Megújuló energiák (kifogyhatatlan / irányítottan megújuló) Megfelelő körülmények között fenntartható energiának minősülnek Tiszta energiák (nap, szél, víz), vagy nagyon alacsony kibocsátással rendelkeznek (geotermikus) működésük során Alacsony karbantartási költségek</p> <p><u>Napenergia:</u> Elterjedt HMKE kiépítésének lehetősége és értéknövelő hatása Visszatáplálási lehetőség Energiaellátás biztonságát növeli (mindenhol elérhető)</p> <p><u>Szélenergia:</u> Éjjel-nappal termelhet áramot Energiaellátás biztonságát növeli (mindenhol elérhető)</p> <p><u>Vízenergia:</u> Folyamatos ellátás Megbízható átmenetileg magas energiaszükséglet esetén (szivattyús tároló) Magas áramerőállítási hatékonyság Állítható a vízszint függvényében Energiatárolóként is funkcionálhat</p> <p><u>Geotermikus energia:</u> Nincs extra vízszükséglet igénye a villamos energia előállításához</p> <p><u>Bioenergia:</u> Folyamatos ellátást nyújthat (emberi és állati hulladékból) Energiatárolóként is funkcionálhat (szükség esetén égethető) Energiaellátás biztonságát növeli (mindenhol elérhető) Potenciálisan karbonsemleges működés</p>	<p><u>Közös:</u> Legtöbb esetben időjárásfüggő a termelés Legtöbb esetben telepítésük potenciálisan negatív topográfiai következményekkel járhat Építési költségek és következmények magasak lehetnek</p> <p><u>Napenergia:</u> Napszakfüggő termelés Rekultivációs költsége magas Energiatárolás szükségessége Előállítása részben ártalmas anyagokból történik</p> <p><u>Szélenergia:</u> Negatív életleni hatások (hangzavar, bioszféra) Energiatárolás szükségessége</p> <p><u>Vízenergia:</u> A regenerációs periódusra figyelni kell Negatív életleni hatások (hangzavar, bioszféra) Korlátozott kiépítési lehetőségek Biztonsági kockázatok (árvíz) Összességében magasabb károsanyag kibocsátás (kiépítés következtében kevesebb erdő)</p> <p><u>Geotermikus energia:</u> A regenerációs periódusra figyelni kell Nem teljesen tiszta energia Korlátozott kiépítési lehetőségek</p> <p><u>Bioenergia:</u> Összességében nettó zéró kibocsátásának tekinthető megfelelő körülmények között A regenerációs periódusra figyelni kell Gazdaságilag hatékonytalan működés Jelentős vízszükséglet a villamos energia előállításához</p>

Forrás: Juhász et al. (2009), Smil (2017a) és Vajda (2004) alapján saját összeállítás

Összességében a megújuló vagy irányítottan megújuló energiák megfelelő energiatervezés és -gazdálkodás mellett kifogyhatatlanok, ezért a folyamatosan növekvő gazdasági, társadalmi és technológiai igényeknek elméletben maradéktalanul eleget tudnának tenni. Ugyanakkor, a gyakorlatban ezeknek is vannak hátrányaik, korlátjaik. Legtöbb megújuló erőmű esetében az elektromos áramtermelés volumene nagyban időjárás-függő, amely korlátozza az éves átlagos termelhető mennyiséget. Emellett legtöbbjüket csak olyan helyekre lehet telepíteni, ahol megfelelőek a topográfiai és földrajzi adottságok, azonban ezt a kört tovább szűkíti egyes esetekben a társadalmi elfogadottság, a jogszabályi környezet vagy éppen a háttértulajdonosi struktúra. Továbbá, a kutatás-fejlesztés, technológiai fejlődés és kormányzati ösztönzők is nagyban befolyásolják, hogy mely megújuló energiátípusban rejlő lehetőségek kiaknázása éri meg adott korszakban a leginkább gazdaságilag. Ennélfogva

jelenleg vannak érettebb és kevésbé érett technológiák. Előbbire jó példa a nap-, szél-, valamint a folyami és tározós vízenergiára épülő erőművek. Míg utóbbira a hullám- és árapály, illetve geotermikus erőművek.

Bár a megújuló energiaforrások különböző típusú energiákat hasznosítanak, az energia átalakulási folyamat végén gyakran egy közös lépés van: a mechanikai energia villamos energiává való átalakítása. Ebből kivételt képeznek a fotovillamos naperőművek, ahol az elsődleges napenergiából a PV cellák közvetlenül állítják elő az áramot, az akkumulátorok és üzemanyagcellák, ahol ezen másodlagos energiahordozók a bennük lévő kémiai potenciált hasznosítják, illetve a termoelektromos generátorok, amelyek közvetlenül a hőenergiát képesek átalakítani a Seebeck-effektusnak¹ köszönhetően villamos energiává (Erostyák & Litz szerk., 2003; Goswami & Kreith, 2017).

Hasonlóan, mint a fosszilis tüzelőanyagoknál, a megújuló energiáknál is fontos kérdés az, hogy mekkora mennyiségű energia állítható elő fajlagosan. Ezeknél korábban használtuk a volumetrikus (MJ/m^3) és gravimetrikus (MJ/kg) energiasűrűségeket, melyet azért lehetett értelmezni, mert ezek a természeti erőforrások tárolhatóak, szállíthatóak, közvetlenül égethetőek, tehát energiahordozónak minősülnek. Azonban a megújuló energiáknál más a helyzet, hiszen ezeknél az energiatermelésük nem az anyag égetésén alapszik, kivéve az egyedüli megújuló energiahordozónál, a biomasszánál, ahol értelmezhetőek ezen korábbi fajlagos energiasűrűségek is. A megújuló energiaforrások energiasűrűségét **teljesítménysűrűségben** (W/m^2) szokás kifejezni, az alábbiak szerint (Smil, 2016):

- ❖ *Napenergia:* A fotovillamos naperőműveknél a napelempanelék fényelnyelő képessége átlagosan négyzetméterenként 150-200 W elektromos teljesítményt képes előállítani optimális körülmények között, amely több tényező együttes függvénye, például a napsütéses órák száma, a napsugárzás intenzitása, a napelem panelek elhelyezésének szöge és iránya, az árnyékolás nagysága és a hőmérséklet értéke;
- ❖ *Szélenergia:* A szél egységnyi keresztmetszetre eső energiaértéke függ a széláramlás sebességétől, valamint az adott szélturbina elhelyezkedésétől (magasság, domborzat) és rotorlapátjainak kialakításától, az általuk lefedett területektől. Ez az érték átlagosan 100-1000 W/m^2 ;

¹ A Seebeck-effektus akkor következik be, amikor két különböző anyagú, de összekötött vezető két végpontja között hőmérséklet-különbség alakul ki, ami elektromos feszültséget generál a két anyag között. Ez a jelenség lehetővé teszi a hőenergia közvetlen átalakítását elektromos energiává anélkül, hogy mozgó alkatrészekre lenne szükség.

- ❖ *Vízenergia*: A vízenergiánál az teljesítménysűrűség a vízfolyás sebességétől, a vízesés vagy gát magasságától, valamint a turbinák hatékonyságától függ;
- ❖ *Geotermikus energia*: Ebben az esetben az energiaérték – ami gyakorlatilag egy fajlagos hőáram – változik a Föld geotermikus gradiensének és a hőforrás mélységének nagyságától;
- ❖ *Bioenergia*: A biomassza esetében is értelmezhető az átlagos négyzetméterenkénti teljesítmény, melynek számításához figyelembe kell venni az adott biomassza termelési vagy energiaátalakítási hatékonyságát, valamint a terület nagyságát.

Mindazonáltal, Smil (2016) felhívja arra is a figyelmet, hogy a gyakorlati teljesítménysűrűség számításoknál nem elegendő magára a közvetlen termelőeszközre (pl. napelemre, szélturbinára) hagyatkozni, hanem szükséges a teljes létesítményeket, minden kiegészítő térrel együtt figyelembe venni a számításban. A térbeli viszonyok felmérése után, ebben az aspektusban már egy jóval alacsonyabb teljesítménysűrűséggel bíró primer energiaforrásokról és -hordozókról beszélhetünk, ahogy az a 4. táblázatban is látható.

4. táblázat Elsődleges energiaforrások és -hordozók átlagos teljesítménysűrűségei (a teljes térbeli viszonyok függvényében)

Energiaforrás	Teljesítménysűrűség (W/m ²)	
	Minimum	Maximum
Földgáz	200	400
Szén	100	1 000
Napenergia	4	9
Szélenergia	0,5	1,5
Bioenergia	0,5	0,6

Forrás: Smil (2016) alapján saját összeállítás

A teljesítménysűrűség inverzét véve megkapjuk a **fajlagos területigényt**, amely kifejezi, hogy mekkora területre van szükséges adott mennyiségű energia előállításához. Ez egy fontos faktor, hiszen az emberiség számára korlátozottan rendelkezésre álló földterület hasznosíthatósága lehetőségeket és korlátokat is rejt magában. Az 5. táblázat alapján látható, hogy míg egy év leforgása alatt 1 GWh energia biomasszából történő előállításához mintegy 460 000 m² területre van szükség, addig ugyanezt egy nukleáris erőmű minden földigényével együttvéve is hozzávetőlegesen 1200 m² területfoglalással képes előállítani.

5. táblázat Elsődleges energiaforrások és -hordozók fajlagos területigényei

Energiaforrás	Földhasználat	
	(m ² /GWh/év)	Kiegészítő megjegyzések
Geotermikus	900	Kigőzöltető erőmű kutakkal és csővezetékekkel
Szél - onshore	1 100	Turbina és a hozzáférhetőséget biztosító utak
Nukleáris	1 200	Atomerőmű, bele értve a hűtővizet is
Nap - hő	3 200	Sivatagi lokáció, 6 órás tárolókapacitással
Szén - felszíni bányászat	5 700	Bányaterületet is bele értve
Nap - PV	7 500	Napelemlétele
Víz - tározós	200 000	100 m magasság, 20 m mélység
Biomassza	460 000	Faterület 20 éves tüzelőanyag-ellátással

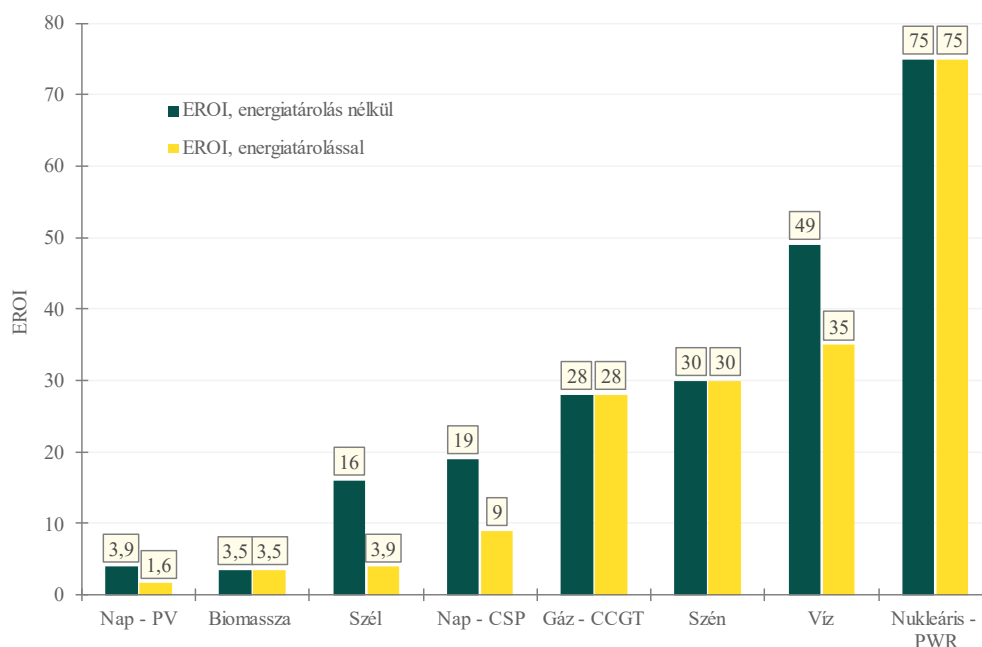
Forrás: Nicholson (2013) alapján saját összeállítás

A fajlagos területigény fontos szempont a megújuló energiaprojektek tervezésekor is, mivel befolyásolhatja többek között az előállítás környezeti hatását és a projekt gazdaságosságát. Ugyanakkor, ezek mérésére egy másik mutató, az Energetikai Megtérülési Mutató (*Energy Return on Investment, EROI*) is rendelkezésre áll, mely széles körben elterjedt a különféle energiaforrások és -hordozók értékelésében. Az EROI azt mutatja meg, hogy egy adott energiaforrás kitermelése során mekkora energiát nyerünk vissza a befektetett energiához képest. Tehát ha egy energiaforrás kitermelése során 1 egységnyi energia befektetése mellett 10 egységnyi energia nyerhető ki, akkor az EROI értéke 10 (10:1) (Hall et al., 2014). Továbbá Hall et al. (2009) kutatásuk során arra a következtetésre jutottak, hogy egy új energiaprojektnek minimum 3-as EROI-val kell rendelkezni, vagy ennél jelentősen magasabbal, ha figyelembe veszik a humán erőforrás szükséglet, valamint a negatív környezeti hatások kompenzálására tett erőfeszítések energiaköltségét is. Weißbach et al. (2013) munkásságában ez a küszöb EROI-érték 7-re tehető, mely alatt a szerzőtársak szerint a fejlett gazdaságokban funkcionális problémák keletkezhetnek a társadalmak működésében, míg ennél magasabb arány esetében pedig nagyobb a potenciál a gazdasági növekedésre.

Az EROI mutató használatában ugyanakkor rejlik egy bizonytalansági faktor is, nevezetesen az, hogy hol kell meghúzni a figyelembe vevő rendszerhatárokat. Ezért érdemes külön megvizsgálni az EROI mutató nevezőjét és számlálóját is, mint bemeneti és kimeneti energiamennyiségeket. Egy átlagos energiaprojekt három fázisból tevődik össze: kivitelezés, működtetés és leszerelés, ahol mind a három fázisban történik energiabefektetés, míg energiakinyerés csak a működtetés során jelentkezhet. A nehézségek alapvetően ott kezdődnek, hogy a jelenlegi energiarendszerünket képező energiaprojektek többnyire ma is működésben vannak, tehát nem lehet megbecsülni pontosan se az összesen befektetett, se a kitermelt

energiamennyiségeket. A befektetett energiákhoz szokták sorolni a felhasznált anyagokba beágyazott energiákat, a humán erőforrások energiafogyasztását, az erőművek önfogyasztását, valamint egyéb kapcsolódó szolgáltatások energiaigényességét. Ezek nagy része közvetett energiának minősül, így nagyon nehezen becsülhetőek meg, míg a leszerelési költségek nem is szerepelnek e listán, hiszen azoknak a pontos bekövetkezési idejük és mértékük nem adható meg. Hasonlóan nehézségek adódnak a kitermelt energiamennyiség számszerűsítésénél, hiszen mialatt a végső energiák hasznos energiákká alakulnak át, további veszteségek (szállítási, konverziós) érik a megtermelt energiamennyiséget. Továbbá az energiakeresleti görbék, valamint külső környezeti hatások szélsőséges eseményeket generálhatnak a megtermelt és hasznosításra kerülő mennyiségek tekintetében, amelyeket akár érdemes lehet kiszűrni a számításokból (pl. magas energiakereslet idején alacsony szélerősség szemben egy fordított esettel, avagy olajkiömlések és gázszivárgások esetei). Tehát megnehezíti az EROI számítását és a különböző erőforrások EROI-értékeinek összehasonlítását a standardizált megközelítés hiánya (Hall et al., 2014; Kelly, 2016; Weißbach et al., 2013). A 9. ábra számos energiaforrás és -hordozó EROI-értékeit mutatja meg Weißbach et al. (2013) eredményei alapján.

9. ábra Különböző energiaforrások és -hordozók szerinti EROI-értékek energiatárolással vagy anélkül



Forrás: Weißbach et al. (2013) alapján saját készítésű ábra

Az ábrán két érték látható mindegyik erőműtípushoz, mivel a korrekt összehasonlíthatóság miatt figyelembe kell venni a tárolókapacitás kiépítésének szükségességét

is egyes energiaforrások időjárás- és termelésfüggő jellege miatt (pl. nap- és szélenergia), míg a tüzelőanyagok magukban tárolják az energiapotenciált, ezért nincs szükség külső tárolóra. A becslések szerint jelenleg az atomenergiának van a legnagyobb EROI-a, míg a legalacsonyabbal a fotovillamos naperőművek rendelkeznek. Összességében viszont, ha azzal számolunk, hogy az elérhető karbonsemleges technológia folyamatosan javulni fog a jövőben (mind az output, mind az input tekintetében), akkor ezzel együtt az EROI-mutató is javulni fog.

Tehát míg a nap- és szélenergia megújuló energiaforrásnak minősül, addig az ezek kiaknázására kiépített – és jelen technológiai korlátok között behatárolt – erőművek már nem feltétlenül tekinthetők megújulónak összességében, mivel jelentős az energiaigényessége ezen eszközök legyártásának és a felépítmények megvalósulásának, nem beszélve arról, hogy ezen erőművek tervezett hasznos élettartama 25-30 évre tehető szakértői becslések alapján. Mindazonáltal, az EROI-mutató hasznos információval tud szolgáltatni afelől, hogy milyen energiamegtérülése van az egyes projekteknek.

A megújuló energiák definíciójának és típusainak áttekintése után szükséges még tisztázni egy, gyakran rokonértelmű szónak tekintett energia minősítést is: az energia tiszta jellegét. **Tiszta energiának** legszigorúbb értelemben azokat az energiaforrásokat és -hordozókat tekintjük, melyek működésük során nem bocsátanak ki károsanyagot, mint például a nap-, szél-, és vízenergia (Iberdrola, é.n.). Ugyanakkor, a szakirodalomban szokás a tiszta vagy tisztább jelzőt is használni az olyan erőforrásokra, melyek egy adott értékhatáron belüli károsanyag kibocsátást produkálnak (pl. geotermikus energia). A tiszta és a megújuló energiák között nagy az átfedés, ugyanakkor van legalább két kivétel: az atomenergia és a bioenergia. Előbbi esetében a nukleáris hasadóanyagokat véglegesen kimerülő, nem megújuló erőforrásnak kategorizáltuk. Ugyanakkor az urán alapú atomenergia termelés alacsony karbonkibocsátásúnak minősül. Emiatt ceteris paribus „tisztábbnak” lehet tekinteni a működési szakaszán az atomenergiát, még ha nem is megújuló erőforrás a nyersanyaga.

A bioenergia kérdése szintén megosztja az EU-t. A bioenergia tisztaság szempontjából korántsem a legmegfelelőbb, legalábbis nem minden formájában. Ugyan a biomassza előállításakor a növények fotoszintézis következtében valamennyi CO₂-t megkötnek a légkörben, de ez nem feltétlenül van egyensúlyban a felhasználásuk (égetésük) során keletkező kibocsátással. A biogáz és a bioetanol égetése tisztábbnak minősül, mint a biomasszáé. Ezért a tiszta jelző helyett a karbonsemleges minősítés közelebb áll a valósághoz.

Fontosnak tartom azt kihangsúlyozni, hogy a „tisztaság” kérdése annak is függvénye, hogy csak az adott erőművek működését vizsgáljuk-e, vagy teljes életciklus-elemzést végzünk. Utóbbi esetben, ha figyelembe vesszük az építési munkálatokat, vagy éppen a leszerelési

következményeket, már más képet festhet a működésük során zéró kibocsátású erőművek összképe (Munkácsy, 2018).

Összességében az megállapítható, hogy a megújuló energiaforrások és -hordozók tekintetében a kimerülés és a megújulás egyes esetekben időfüggő, relatív tényezők, akárcsak a tiszta és a későbbiek bemutatandó fenntarthatósági minősítések is.

2.1.3.4. A nukleáris energiában rejlő potenciálok és kihívások

Az 5. ábrán szerepelt egy olyan elsődleges energiatípus is, amely alapvetően nem sorolható a megújuló energiák közé, mégis tiszta jellege, illetve a technológia fejlődésével adott esetben az egyik típusú energiahordozóból kinyerhető energia még fenntartható is lehetne. Ez pedig nem más, mint az atomenergia.

Maga az **atomenergia** az atommagokban tárolt energiákból származik, amelyet kétféle magreakció útján lehet felszabadítani: fission (maghasadás) és fusion (magegyesülés) átalakulások során. Az előbbi esetében megkülönböztethetünk a természetben lezajló, spontán maghasadást is az olyan instabil maggal rendelkező atomoknál (radioizotópok), amelyek idővel spontán bomlanak, hogy stabilabb állapotba kerüljenek, miközben energiát szabadítanak fel. Gyakorlatilag ennek a szándékos és kontrollált folyamata az atomerőművekben lezajló maghasadás (Bihari, 2012).

A fission atomerőművekben nehéz atommagok (pl. urán, plutónium) maghasadása történik neutronok becsapódásának hatására, ami hatalmas hőenergia felszabadítással jár a folyamatos láncreakciók következtében. Ez a hő gőzt generál, ami turbinákat hajt meg, így állítva elő a villamos energiát. Ehhez képest a fusion atomerőművekben a könnyű atommagok (pl. hidrogén izotópjai) magegyesülése során keletkezik hatalmas mennyiségű energia. Egyébként a Nap és más csillagok energiatermelése is ezen az elven alapul (Pátzay, 2011). A fusion erőművek nagy előnye lenne, hogy gyakorlatilag kimeríthetetlen fűtőanyaggal működnek (a hidrogén rendkívül széles körben elérhető), valamint alacsony környezeti kockázattal rendelkeznek (nem lennének olyan súlyos atomkatasztrófa kockázatok). Ugyanakkor a gyakorlatban ez a technológia még nem kiforrott, a tudomány számára egyelőre kihívást jelent a megfusionban rejlő potenciálok hasznosítása, így kereskedelmi célra, ipari termelésre még nem áll rendelkezésre fusion erőmű (Vajda, 2004).

A 6. táblázatban összefoglaltam a két nukleáris fűtőanyag előnyeit és hátrányait. Bármely technológiát is vesszük alapul, az biztos, hogy mindkettőnél az energiahordozók nagyon magas energiasűrűséggel rendelkeznek, ezért hatalmas potenciál van bennük a folyamatos

energiatermelés szempontjából. Továbbá, működésük során nagyon alacsony mértékben bocsátanak ki károsanyagot, tehát tiszta energiának is minősülnek, valamint független az időjárási viszonyoktól és képes folyamatosan energiaellátást biztosítani. Ugyanakkor, ehhez kapcsolódik egyik hátránya is, mivel a folyamatos termelés mellett elég rugalmatlan, csúcserőműnek nem alkalmazható. Emellett elég magas beruházási költséggel jár az erőművek felépítése, illetve a fúziós atomenergiánál említett technológiai és tudományos korlátok miatt a későbbiekben kiforrott technológián alapuló atomerőművek beruházási költsége jelenleg még csak nem is becsülhető meg.

6. táblázat A nukleáris fűtőelemek használatában rejlő előnyök és hátrányok

Előnyök	Hátrányok
<p><u>Közös:</u> Magas energiasűrűségük van Tiszta energiának minősülnek Megbízható, folyamatos energiaellátás</p> <p><u>Fúziós (egyesüléssel):</u> Korlátlan fűtőanyagot jelent Alacsony biztonsági kockázata van Minimális radioaktív hulladékot termel Nincs károsanyag kibocsátás</p>	<p><u>Közös:</u> Magas beruházási költségek</p> <p><u>Fissziós (maghasadásos):</u> Alacsony károsanyag kibocsátása azért van Rugalmatlan termelés Véglegesen kimerülő erőforrás Radioaktív hulladék Balesetveszély lehetősége és komoly következményei Negatív társadalmi megítélés Nukleáris fegyverkezés pillérje A kitermelések negatív környezeti hatásai</p> <p><u>Fúziós (egyesüléssel):</u> Technológiai kihívások Hosszú fejlesztési idő</p>

Forrás: Molnár (2021), Pátzay (2011) és Vajda (2004) alapján saját összeállítás

Mindemellett, korunk fissziós atomenergia-termelését számos negatív politikai, természeti és társadalmi aspektus árnyékolja. Ezen erőművek működéséhez alapvetően olyan hasadóanyag (gyakorlatban általában urán) szükséges, amely véges mennyiségben érhető el a természetben. Továbbá, az uránban található 235-ös izotópot dúsítani is szükséges 3-5%-os szintre a megfelelően kontrollálható, de még nem robbanásveszélyes fűtőanyag létrehozásának érdekében. Azonban, ha az urándúsítás szintje eléri a 80-90%-os szintet, akkor atomfegyverként is bevethető lehet a hasadóanyag, tehát egy nemzet urándúsítási technológiai képessége szorosan összefügg az atomfegyverek előállításának potenciális képességével is. A nukleáris biztonság érdekében ezért szigorú kontroll szükséges. Ettől függetlenül, nukleáris katasztrófák kockázata sajnos mindig fennállhat, erre legjobb példa az 1986-os csernobili és a 2011-es fukusimai atomerőmű-balesetek, melyek súlyos környezeti és egészségügyi következményekkel jártak. Emellett, a maghasadás során keletkező radioaktív hulladékot is tárolni szükséges (Vajda, 2009).

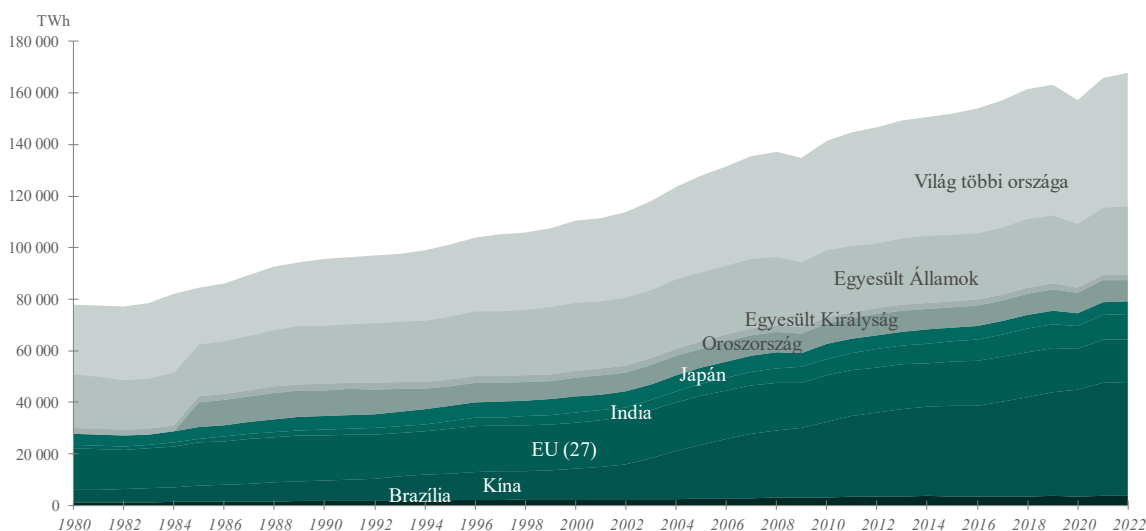
Mindezeket összefoglalva tehát megalapozott az atomenergia vitatott szerepe és szükségessége az energiaellátásban. A magfúzió potenciálisan forradalmasíthatja az atomenergia használatát, hosszú távon akár fenntartható energiának is minősülhetne, de még jelentős K+F szükséges a széleskörű energiatermelés előtt. Tehát jelenleg gyakorlati energetikai jelentősége csak a hasadóanyagokon alapuló fissziós atomenergiának van.

2.2. Az energiaellátás lehetőségei területi adottságok kontextusában

A Worldometer (é.n.) statisztikai adatbázis becslése szerint 2023-ban az emberiség átlépte a 8 milliárd fős lélekszámot. Az elmúlt évszázad során általánosságban az egészségügyi ellátások fejlődése, a betegségek elleni védőoltások elterjedése, a higiéniai körülmények javulása, de az élelmiszerellátás magasabb fokú biztonsága, az urbanizáció és migráció jelensége mind hozzájárult a folyamatos népességnövekedéshez. Tehát a társadalmi-gazdasági fejlődés alapvetően meghatározza a népességnövekedés ütemét és dinamikáját.

Ennek a természetes népességnövekedésnek a következménye az energiaszükségleteink növekedésének üteme is (10. ábra). Az energiához való hozzáférés esszenciális kérdés a társadalom számára, melyet a technológiai és infrastrukturális fejlődés, valamint a szabályozói környezet is támogat.

10. ábra A világ primer energiafelhasználása* 1980 és 2022 között



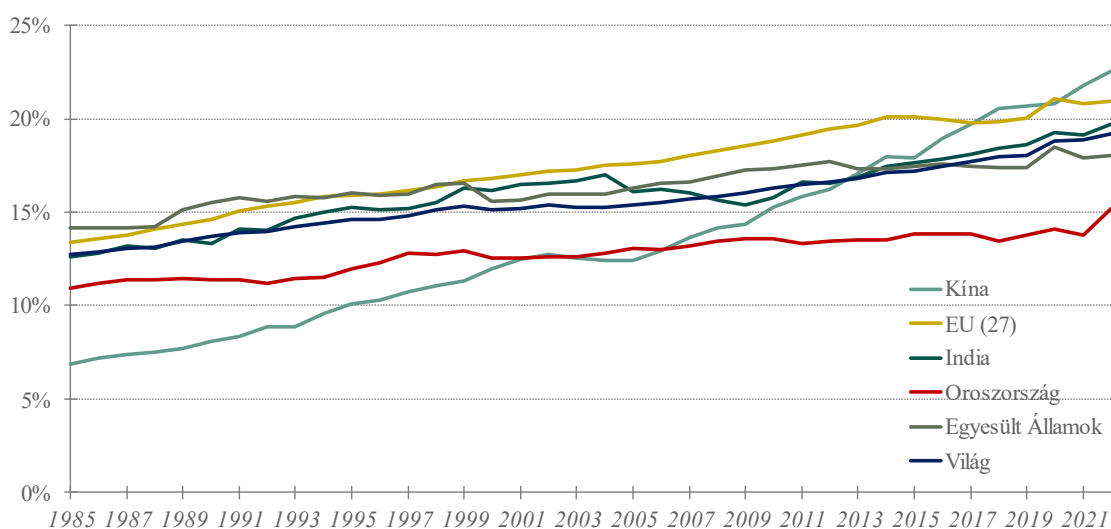
*Megjegyzés: Hagyományos biomassza felhasználás nélkül.

Forrás: Energy Institute (2023), Ritchie et al. (2023) és U.S. Energy Information Administration (EIA, é.n.-b) alapján saját készítésű ábra

Az életszínvonal, a városiasodás és az általános gazdasági növekedés egy energiaintenzív folyamat, így folyamatosan nő az emberiség energiaigénye, különösen a fejlődő és feltörekvő gazdaságokban. Erre jó példa Kína esete, amely a 2000-es évektől kezdve jelentős növelte gazdasági növekedésen ment keresztül, így válva a világ jelenlegi legnagyobb energiafogyasztójává. Az Egyesült Államok hosszú ideig volt a világ legnagyobb energiafogyasztója, de a 21. század elején Kína megelőzte. Továbbá, az EU is jelentős energiaigényekkel rendelkezik, de az össz fogyasztás viszonylag stabilnak vagy mérsékelt növekvőnek mondható, mely részben az energiahatékonyságot ösztönző energiapolitikának tudható be.

Ahogy korábban már részleteztem, az elsődleges energiafelhasználásba mindazon energiaforrások teljes mennyisége beletartozik, amelyeket közvetlenül a természeti erőforrásokból nyerünk ki és használunk fel például fűtés-hűtésre, közlekedésre, ipari felhasználásra vagy éppen áramtermelésre, azaz másodlagos energiahordozóvá alakítjuk át ezen energiaforrásainkat és -hordozóinkat. Az elsődleges energiafogyasztás növekedésével párhuzamosan a villamosenergia-termelés is folyamatosan növekedett, méghozzá ahogy a 11. ábrán is látszik, nem azonos ütemben.

11. ábra A teljes villamosenergia-termelés aránya a primerenergia-fogyasztásban 1985 és 2022 között



Forrás: EMBER Climate (é.n.-b), Energy Institute (2023) és Ritchie et al. (2023) alapján saját készítésű ábra

Míg az 1990-es évek elején világszinten 13,5% volt ez az arány, addigra ez 2022-re 19,2%-ra nőtt meg. Ennek a folyamatnak szintén Kína az éllovasa, amely az elmúlt bő 30 évben majd megháromszorozta a villamosenergia-termelés arányát a teljes elsődleges energiafogyasztásban. Az EU esetében ez az arány egy kicsivel a világátlag fölött volt, 21%-on állt 2022-ben.

Ez a növekedés egyértelműen az elektrifikáció jelenségének köszönhető. Maga az elektrifikáció az a folyamat, amely során a villamos energia egyre inkább az emberi tevékenységek, mint például a világítás, fűtés, közlekedés és ipari folyamatok központi energiaforrásává válik. Ez a történelmi folyamat mély és tartós változásokat hoz a társadalomban és a gazdaságban, fokozatosan átalakítja az energiafelhasználás módjait és hozzájárul a mai modern életforma kialakulásához. Tehát az ipari, kereskedelmi és lakossági szektorokban végbemenő elektrifikáció egyaránt hozzájárul a villamos energia iránti növekvő igényhez.

Látható, hogy ez a folyamatosan növekvő (villamos) energia igény kielégítése egyre nagyobb kihívást jelent az energiaellátási rendszereknek világszerte. A kapacitásbővítésnek, azaz az energiaellátási infrastruktúra minden elemének lépést kell tartania a növekvő szükségletekkel az ellátásbiztonság biztosítása céljából. Ez azonban csak az egyik része a feladatnak. Ugyanis az egész energiarendszer alapvető bázisát képező energetikai szempontú természeti erőforrások, tehát a primer energiaforrások és -hordozók elérhetősége kritikus jelentőségű minden ország számára. Ezen ásványivagyon földtani bizonyossága, mennyisége, gazdaságos kitermelhetősége, illetve a megújuló energiaforrásokkal együttvéve mindezek földrajzi koncentrációja és potenciálja az ellátásbiztonság lényegi részét képezi.

2.2.1. Geoenergia, avagy a természeti erőforrások geopolitikája

Az EU-n belül fellelhető energetikai szempontú természeti erőforrások eloszlásának bemutatása előtt fontosnak tartom megfelelő kontextusba helyezni a témakört, amely egy multidiszciplináris megközelítést követel meg, melynek a középpontjában a **geopolitika** áll.

Szilágyi István professzor a klasszikus és modern geopolitika különböző értelmezéseit, kereteit és definícióit gyűjtötte össze, rendszerezte és szintetizálta olyan klasszikusokat figyelembe véve, mint pl. Friedrich Ratzel, Rudolf Johan Kjellén, Karl Haushofer, Geoffrey Sloan, Colin Gray, Peter Taylor, Colin Flint, Therezinha de Castro, Saul Bernard Cohen, valamint Ricardo Méndez Gutiérrez del Valle. Megfogalmazása szerint „*A geopolitika, mint a nemzetközi viszonyok elméletének térbeli és részben földrajzi aspektusaival foglalkozó*

multidiszciplináris társadalomtudomány, a politikatudomány része.” (Szilágyi, 2018, 28. o.)

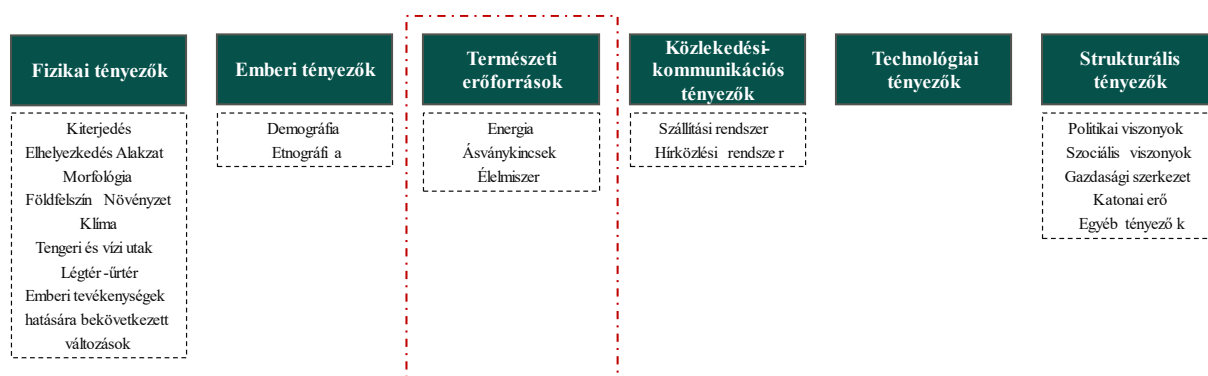
Mindemellett kiemeli, hogy a geopolitika szorosan kapcsolódik a politikai földrajzhoz, a történeti földrajzhoz, a társadalomföldrajzhoz, a kulturális földrajzhoz, a regionális tudományhoz, a történettudományhoz, a közgazdaságtanhoz, a nemzetközi viszonyok elméletéhez és más politikai jellegű társadalomtudományokhoz (Szilágyi, 2018).

Tehát a geopolitika az államok, régiók és globális erők földrajzi és politikai dinamikájával foglalkozik, beleértve a hatalom és befolyás eloszlását a nemzetközi rendszerben, és melynek elemzési keretébe beletartozik többek között a tér, a földrajzi elhelyezkedés, a határok, a természeti erőforrások, demográfia és a globalizációs folyamatok, melyek együttesen befolyásolják az országok politikai viselkedését, külpolitikáját és hatalmi dinamikáját a globális szinten. Ezeket a tényezőket geopolitikai vagy geostratégiai tényezőknek nevezzük (Szilágyi, 2018).

Maga a **geostratégia** egyrészt tekinthető a geopolitikai gondolkodás fejlődésének egyfajta eredőjének is, ahol kiemelkedő szerepe van a politikai tevékenység keretében létrejövő stratégiai folyamat földrajzi-térségi aspektusainak (Domonkos, 2013; Glassner & de Blij, 1989), míg más, ugyanakkor kapcsolódó megközelítésben a geostratégia a geopolitikai ismeretek gyakorlati alkalmazását jelenti, amely magában foglalja az államok által a földrajzi tényezők és a nemzetközi politikai környezet figyelembevételével kialakított, a geopolitikai célokhoz vezető stratégiákat és politikákat (Sashalmi, 2021; Sloan, 2017; Vidakis et al., 2017). A geostratégia és geopolitika viszonyával kapcsolatban azonban Mező (2006) megjegyzi, hogy egyértelmű különbség van a kettő között, mivel a (geo)stratégia egyben egy cselekvési tervet is jelent, ami tehát konkrét politikai döntést is feltételez, míg a (geo)politika tér-ideológiai keretet nyújt (pl. Heartland-elmélet, Rimland-elmélet, Truman-doktrína stb.).

A fent említett geostratégiai tényezők Carlos Manuel Mendes Dias szerinti csoportosítását a 12. ábra mutatja be. A klasszifikáció alapján látszik, hogy a geopolitikai irányokat és a geostratégiai célkitűzéseket számos szempont befolyásolhat, tehát nem feltétlenül csak földrajzi kiterjedtség lehet elsődleges motiváció a cselekvésre, hanem ideológiai okok, különféle érdekcsoportok, avagy a természeti erőforrásokhoz való hozzáférhetőség is szolgálhat okozatként.

12. ábra Természeti erőforrások, mint geostratégiai tényezők



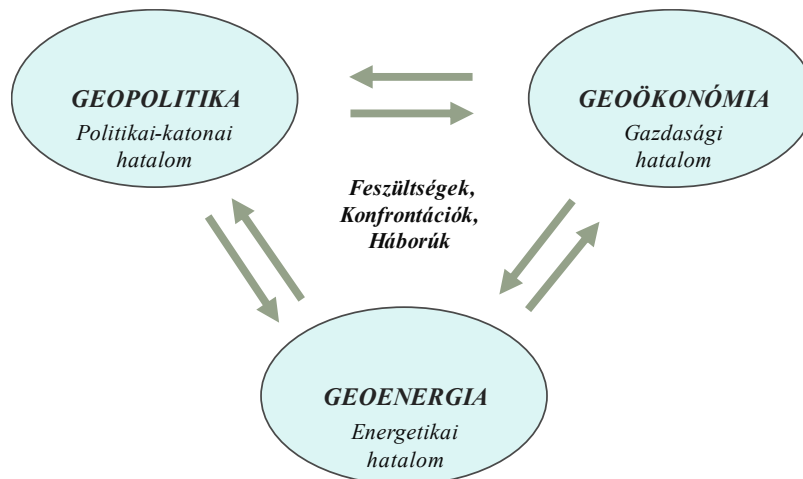
Forrás: Szilágyi (2018) alapján saját készítésű ábra

Ez a cselekvési kényszer pedig onnan ered, hogy ezek a tényezők alapvetően meghatározzák a nemzetközi rendszer hatalmi viszonyait, a politikai uralom kereteit, így az államok adott korszakbeli geostratégiáját is. Szilágyi István felhívja a figyelmet arra is, hogy a politikai küzdelem központi kérdése a hatalom megszerzése, illetve megtartása, melyeknek ezen geostratégiai tényezők a forrásai (Szilágyi, 2018).

Kezdetben elsődlegesen a geopolitika középpontjában a nemzeti hatalom és a földrajzi terület feletti ellenőrzés állt, így a történelem során általában azok az országok bizonyultak dominánsnak, amelyek a leginkább tudták növelni földrajzi kiterjedésüket különféle politikai-katonai eszközök segítségével (Vidakis et al., 2017). Azonban a nemzetközi viszonyok dinamikus fejlődésével és átalakulásával az 1990-es években Edwin Luttwak és Neil Smith nevéhez köthetően megjelent a **geoökonómia** irányzata, amely már a globális kereskedelmi rendszerek térnyerését helyezte előtérbe a katonai rendszerek helyett, tehát a katonai hatalmi pozíció helyett – *mellett* – a gazdasági hatalom lesz hangsúlyos (Szilágyi, 2018).

Vidakis et al. (2017) azonban bevezetnek egy új megközelítést, amely gyakorlatilag már közvetetten megjelent mind a geopolitika, mind a geoökonómia vonatkozásában, ez pedig a **geoenergia**, illetve az energetikai hatalom koncepciója (13. ábra). Már a 12. ábrán is kiemelésre került a természeti erőforrások elérhetősége, mint a geostratégiai tényezők egyik kulcseleme, amely szorosan kapcsolódik ehhez a témakörhöz. A szerzők megfogalmazása szerint ott jelenik meg a geoenergia fontossága, ahol az energiához való hozzáférés a meghatározó tényező a geopolitikai döntéshozásban. Ebből az is következik, hogy az olyan országokban, ahol ez korlátozott, ott a geoenergia, mint stratégiai szempont prioritást élvez, szemben azokkal az államokkal, ahol bőségesen elérhetőek ezen erőforrások.

13. ábra Geoenergia a hatalom és fölény koncepciójának háromszögében



Forrás: Vidakis et al. (2017) alapján saját készítésű ábra

Habár a szerzők a fenti ábrán egymással ellentétes állapotban ábrázolták e három területet, ugyanakkor a geoenergia, avagy az erőforrások geopolitikája a geopolitika és a geostratégia azon részének is tekinthető, amely kifejezetten a természeti erőforrásokkal, az energiaforrásokkal és az energiapolitikával foglalkozik. Ez magában foglalja az energiaforrások hatékony eloszlásának, az energiaellátási útvonalak biztonságának, az energiaforrások feletti ellenőrzésért folytatott versengésnek és a megújuló energiaforrások kiaknázásából eredő geopolitikai hatásoknak a vizsgálatát is.

Ezzel tehát végleg el is jutottunk a természeti erőforrások fontosságához. Ugyanis az erőforrásokért folytatott versengés olyan globális jelenség, amely az emberi történelem kezdete óta jelen van. Ez a verseny a különböző természeti erőforrások, mint például víz, termőföld, ásványi anyagok, olaj és gáz iránti igényből fakad. Ezek az erőforrások alapvetően szükségesek a gazdasági fejlődéshez, a társadalmi jóléthez és a nemzetbiztonsághoz, így az államok, vállalatok és egyéb csoportok gyakran versenyeznek a hozzáférésért és az ellenőrzésért.

A természeti erőforrások rendelkezésre állása és eloszlása alapvetően befolyásolja a nemzetek geopolitikai és stratégiai döntéseit, mivel az országok földrajzi elhelyezkedése, amely meghatározza az erőforrásokhoz való hozzáférésüket, gyakran előnyöket és kihívásokat is jelent a globális szinten való pozicionálásuk szempontjából. Ez az eloszlás egyenlőtlen, ami bizonyos régiókat gazdaggá tesz, míg másokat erőforrás-szegénnyé. Ez a különbség pedig geopolitikai feszültségeket és konfliktusokat eredményezhet az erőforrásokban gazdag és szegény területek között, ugyanakkor egyben lehetőséget is kínál az együttműködésre (Sarpong, 2021; Yergin, 2011).

Összefoglalva, ma már széles körben elfogadott, hogy a természeti erőforrások biztosítása egy adott nemzet geopolitikájának kulcsfontosságú eleme, geostratégiai érdeke. A kőolaj, földgáz és ásványi vagyon biztosításáért folytatott küzdelem a történelem egyik mozgatórugójaként szolgált, befolyásolva a nemzetközi politikát, nagyhatalmi rivalizálást és a globális versenyt. A folyamatos energiaellátás, tehát az energiabiztonság kérdése az első és második világháború során felértékelődött, hiszen kritikus fontosságú volt a hatalmi játszák kimenetelét tekintve. A hidegháború idején az energiapolitika geostratégiai jelentősége tovább erősödött az energiapiacok feletti ellenőrzéssel és az energiaforrások stratégiai felhasználásával, illetve meghatározta a nemzetközi kapcsolatok alakulását is, rávilágítva ezzel az energiaforrások és az energiapolitikák hatalmi viszonyrendszerben betöltött fontosságára (Sarpong, 2021; Szilágyi, 2018).

A folyamatos technológiai innováció és a megújuló energiaforrások fejlődése újraértelmezi a klasszikus geopolitikai és geostratégiai paradigmákat. Az országok immár nem csak a fosszilis tüzelőanyagokhoz való hozzáférésért versenyeznek, hanem a megújuló energiákon alapuló energetikai megoldások fejlesztésének és alkalmazásának élvonalába is igyekeznek bekerülni. Habár, ahogy korábban ismertetésre került, ezek jelenleg alacsonyabb EROI-értékekkel bírnak, mint a hagyományos tüzelőanyag alapú erőművek, valamint nem lehet elmenni amellett sem, hogy bár maguknak a primer megújuló energiaforrásoknak egy jó része, úgymint a nap- és szélenergia kevésbé függenek a földrajzi korlátoktól, ugyanakkor ezek hasznosíthatóságához szükséges eszközök előállítása, üzemeltetése, majd leszerelése is energia (anyag és munkaerő)-igényes folyamat. Az ezekhez kapcsolódó földrajzi megoszlások pedig fontos (régi-új) geoenergetikai dilemmákat vetnek fel – mindezeket figyelembe véve szükséges elemezni mind a (környezetileg) megújuló, mind pedig a (gazdaságilag) megtérülő és (társadalmilag) hasznot nyújtó pozitív jelzőket valamennyi energiarendszert illetően.

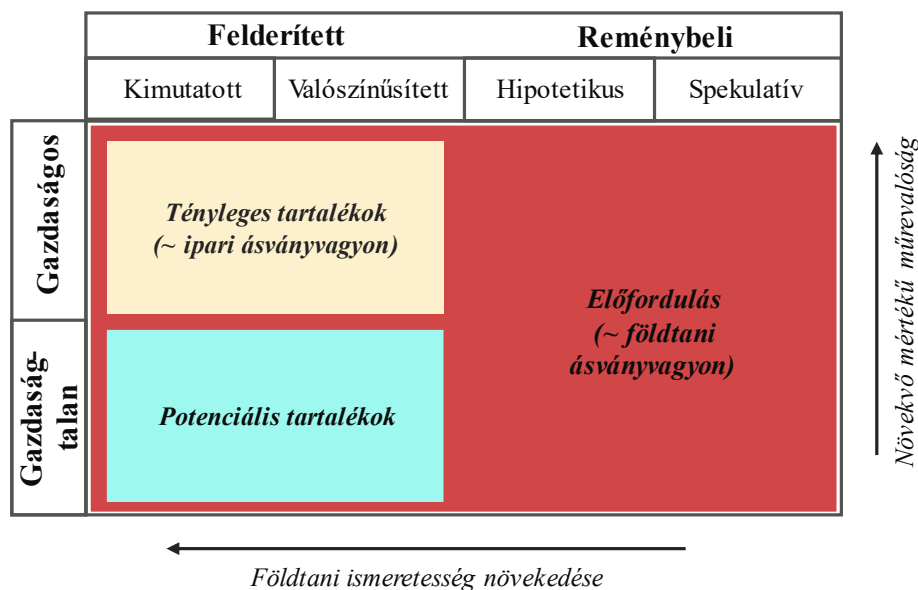
2.2.2. Természeti erőforrások egyenlőtlen regionális eloszlása

2.2.2.1. Ásványi energiahordozók kitermelési lehetőségei

Az ásványianyersanyag-vagyon mérlegszerű nyilvántartásának elemzéséhez érdemes tisztázni néhány releváns alapfogalmat. Az amerikai bányászati hivatal taxonómiája alapvetően három kategóriát különböztet meg: tényleges tartalékok (*current reserves*), potenciális tartalékok (*potential reserves*) és erőforrás-ellátottság (*resource endowment*). Ezek a gazdaságosság és a földtani bizonyosság ismeretében egy ún. McKelvey's box mátrix

formátumban is szemléltethetőek (14. ábra). A legszélesebb halmazt az előfordulás (erőforrás-ellátottság) jelenti, amely a már felderített, illetve reménybeli erőforrások természetes előfordulását jelenti a földkéregben. Ez a földtani vagyon tehát egy geológiai fogalom, amely a természetes erőforrások felső határát jelöli meg. Ennél szűkebb kört jelentenek a tartalékok, amelyek bizonyítottan, illetve egy meghatározott hibahatáron belül jól becsülhetően fellelhetőek a Földön (Mádai, 2011; Tietenberg & Lewis, 2012).

14. ábra Az ásványvagyon klasszifikációja



Forrás: Máдай (2011) és Tietenberg és Lewis (2012) alapján saját készítésű ábra

A potenciális tartalékok mennyisége relatív, inkább függvényszerűen írható le, mely mennyiségnek csak a kitermelés technológiai költsége szab határt (Bohn, 1992). Például olajmezők esetében újabb és drágább módszerek segítségével lehetséges nagyobb arányban olajat kitermelni, tehát ez a vagyontömeg költség-haszon elemzés kérdése már, semmint a geológiai ismeretek függvénye. Ezzel szemben a tényleges tartalékok jelentik azt az ásványvagyon mennyiséget, amely adott költségek mellett jövedelmezően is kitermelhető. Szervezeti jelentésekben leginkább ezt szokás számszerűen bemutatni (Mádai, 2011; Tietenberg & Lewis, 2012).

Ebből a kategorizálásból is látszik, hogy a rendelkezésre álló tartalékok mennyisége valójában relatív, hiszen attól függ, hogy adott időpillanatban mennyi tartalékot tekintünk gazdaságilag kitermelhetőnek és technológiailag hozzáférhetőnek. Az ásványi anyagok piaci árai jelentősen befolyásolják, hogy melyik erőforrásokat tekintjük gazdaságilag kitermelhető

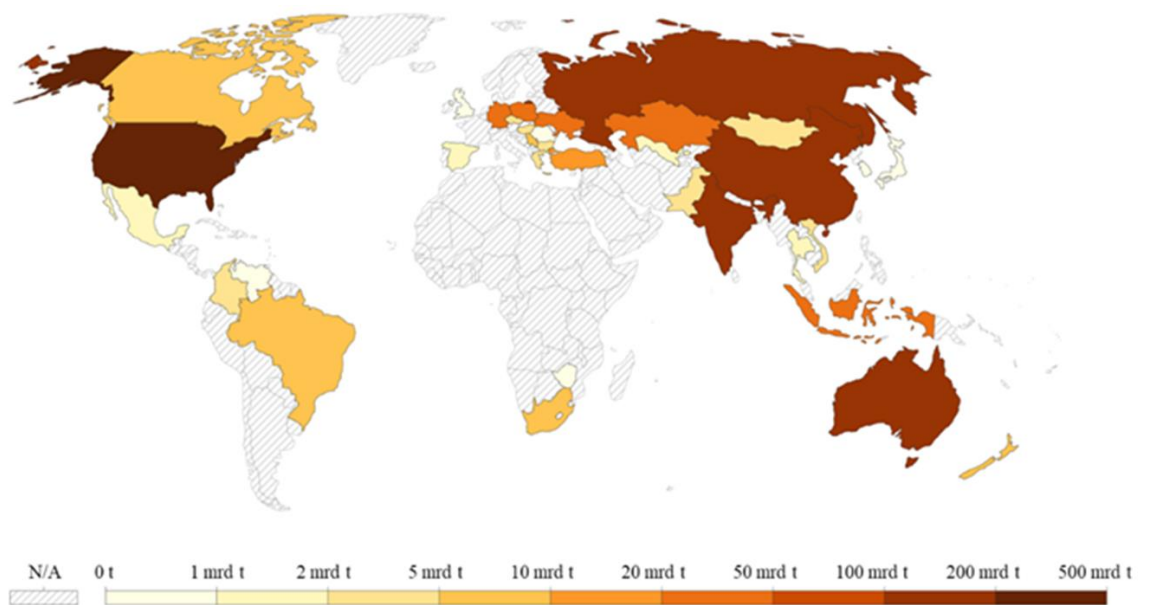
tartaléknak, míg az új bányászati, kitermelési és feldolgozási technológiák lehetővé teszik korábban elérhetetlen vagy gazdaságtalan erőforrások kiaknázását is. A reménybeli előfordulást erősíthetik az újabb geológiai felfedezések (pl. a globális felmelegedés miatt az eddig kevésbé feltárható északi sark potenciális lelőhelyet jelenthet kőolaj és földgáz tartalékok tekintetében) és pontosabb földtani modellezések, ugyanakkor a jogszabályok és környezetvédelmi előírások szigorításai korlátozhatják is a folyamatot.

Tehát az ásványi tartalékok mennyisége nem egy statikus szám, hanem dinamikus érték, amely a fent említett változók függvényében változik. Továbbá, szokás a rendelkezésre álló tartalékok alapján megbecsülni azt is, hogy egy adott pl. fosszilis energiahordozóból hány évre elegendő ez a tartalék. Itt is fontosnak tartom kiemelni a számadat megfelelő kontextusában történő értelmezését. Ugyanis a felhasználás is egy adott időpontban, adott technológia, illetve termelési és fogyasztási mintázat mellett értelmezendő. Amennyiben az ellátási lánc bármely pontján növekszik az energiahatékonyság, illetve, ha megváltoznak fogyasztási-felhasználási szokásaink, így a kitermelés volumene, az nagyban befolyásolhatja a kimerülésig tartó időszak hosszát (Tietenberg & Lewis, 2012).

A következőkben arra keresem a választ, hogy a világ mely részein koncentrálnak a kritikus energiahordozóink. Így röviden és általánosságban áttekintem a világot, illetve az EU szén, kőolaj, földgáz és uránium tartalékait, illetve a kapcsolódó kereskedelmi potenciált a lehető legfrissebb hivatalos adatok alapján. Ez befolyásolta azt is, hogy egy adott ország a történelme során milyen típusú tüzelőanyagra építette fel energiarendszerét. Természetesen ez nem kizárólagosság, hiszen az energiahordozók szállíthatósága miatt olyan területeken is épülhettek például szénércművek, ahol nincs vagy nem jelentős a szénbányászat, de összességében gazdaságossági szempontból szénércművek létesítése kifizetődő volt.

Ha már a szénkitermelésről volt szó, a 15. ábra alapján látható, hogy a legnagyobb ismert széntartalékokkal rendelkező országok közé tartozik 2020. végén az Egyesült Államok (248,9 milliárd tonna), Oroszország (162,2 milliárd tonna), Kína (143,2 milliárd tonna), Ausztrália (150,2 milliárd tonna) és India (111,1 milliárd tonna), míg az egész világban nagyjából 1 074,1 milliárd tonnára becsülik a felfedezett és gazdaságosan kitermelhető szénvagyont. Ehhez képest az EU-ban 78,6 milliárd tonna ez a becsült mennyiség, ahol az élmezőnyt Németország (35,9 milliárd tonna), Lengyelország (28,4 milliárd tonna) és jócskán lemaradva tőlük Csehország (3,6 milliárd tonna) jelenti. Magyarország mindössze 2,9 milliárd tonna széntartalékkal bírt 2020. év végén, illetve vannak olyan tagállamok, ahol nincs ismert, vagy nagyon csekély mennyiségben van gazdaságosan kitermelhető széntartalék (pl. Luxemburg, Málta, Ciprus, Franciaország, Olaszország).

15. ábra Széntartalékok a világban (2020. év végi állapot szerint)



Forrás: BP (2021), Energy Institute (2023) és Ritchie et al. (2023) alapján saját szerkesztésű ábra

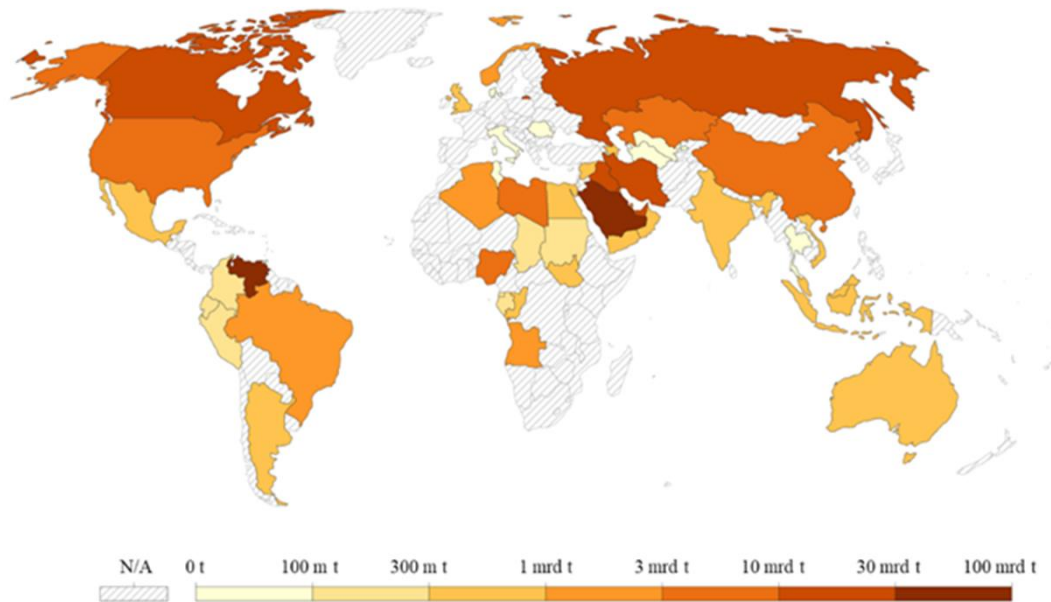
Összességében az EU 2020-as szénkitermelési üteme mellett mintegy 266 évre elegendő tartalékkal rendelkezik a 2020-as tartalék és termelés arányt (*reserves-to-production, R/P*) alapul véve. Így a széntartalékok az EU-ban összességében hosszú távú energiaforrást jelenthetnek, de az EU energiapolitikája, így a dekarbonizációs törekvései miatt folyamatosan törekszik csökkenteni a szén alapú energiatermelést (BP, 2021). Ez meg is látszik abban, hogy 2022-ben a világ széntermelésének mindössze 2,3%-árt volt felelős (Energy Institute, 2023). Ettől eltekintve, a szén olcsó és bőséges energiahordozóként jelentős gazdasági jelentőséggel bír sok országban.

Meglepő, de nem a fent említett legnagyobb tartalékokkal rendelkező országok mindegyike minősül egyben a legnagyobb szénexportőrnek is. 2022-ben Ausztrália és Oroszország mellett Indonézia volt a legnagyobb globális exportőr, együttesen 71%-os arányt képviseltek. Ezzel szemben a legnagyobb importőr Kína volt, annak ellenére, hogy a TOP3-ban van a széntartalékokat tekintve. Továbbá szintén jelentős India, Japán és egyéb ázsiai országok importtevékenysége, melyek együttesen (Kínát is beleértve) több mint 65%-át tették ki a teljes szénimport mennyiségnek (Energy Institute, 2023).

Áttérve a kőolajtartalékok vizsgálatához, a 16. ábrán láthatjuk, hogy az EU megint csak nem fog az élvonalba tartozni ezen energiahordozó természetes rendelkezésre állása tekintetében sem. 2020 végén a világ kőolajtartalékai (236,3 milliárd tonna / 1 732,4 milliárd

hordó) nagyrészt a Közel-Keleten (113,2 milliárd tonna / 835,9 milliárd hordó) koncentrálódtak, különösen Szaúd-Arábiában, Iránban, Irakban, Kuvaitban és az Egyesült Arab Emírségekben. Ezek a tartalékok jelentős részét adják a globális tartalékoknak (48,3%).

16. ábra Kőolajtartalékok a világban (2020. év végi állapot szerint)



Forrás: BP (2021), Energy Institute (2023) és Ritchie et al. (2023) alapján saját szerkesztésű ábra

Továbbá olyan országokban is jelentős tartalékok találhatóak, mint Venezuela (41,3 milliárd tonna / 303,8 milliárd hordó), Kanada (22,9 milliárd tonna / 168,1 milliárd hordó olajhomok formájában), Oroszország (14,7 milliárd tonna / 107,8 milliárd hordó) és Líbia (6,6 milliárd tonna / 48,4 milliárd hordó)

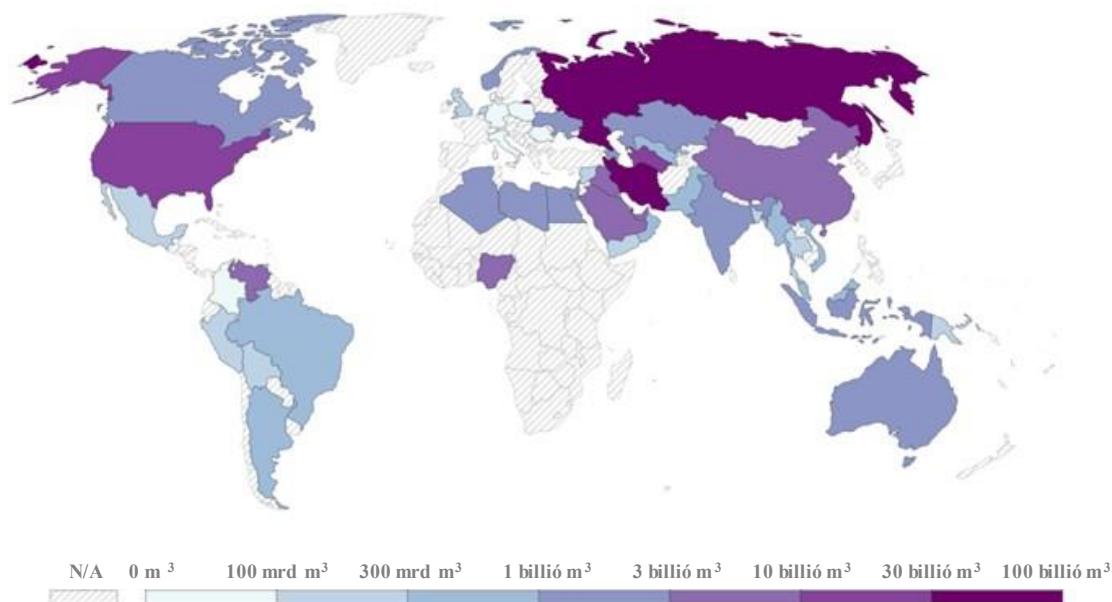
Az EU tartalékai mintegy 2,4 milliárd hordóra (330,7 millió tonnára) tehetőek 2020. év végén, amellyel mindössze 0,1%-át teszi ki a világ kőolajtartalékainak, és nagyjából 17 évre elegendő készletet jelentene az olajtermelés tekintetében, ceteris paribus. Ez, a világban mintegy 54 évre becsülhető átlagosan a 2020-as termelési és tényleges tartalékok függvényében. Egyébként Európában az Északi-tengeren vannak kőolaj lelőhelyek, amely az Egyesült Királyság és Norvégia számára nyújt elsődlegesen forrást (BP, 2021; Energy Institute, 2023).

A nyersolajkereskedelmet tekintve, a legnagyobb exportőr 2022-ben a Közel Kelet (43%) és Oroszország volt (12,4%), míg legnagyobb importőrnek Kína (23,9%), Európa (23,5%) és az Egyesült Államok (14,7%) számítottak (Energy Institute, 2023). Európa jelentős

kőolajimportja tehát a saját kőolajtartalékainak korlátozottságából fakad – a kapcsolódó fő európai csővezetékrendszer látható a Függelék F3. ábráján. A kontinens gazdasága, kiváltképp a közlekedési szektor nagy mértékben függ az olajtól, míg a kőolaj szerepe a villamosenergia-termelésben – ahogy a következő fejezetekben be fogom mutatni – egyáltalán nem számottevő.

A harmadik fosszilis tüzelőanyagot, a földgázt vizsgálva megint csak hasonló következtetésekre fogok tudni jutni (17. ábra). A világ gáztartalékai szintén jelentősek és földrajzilag eltérően oszlanak el, ugyanakkor mivel a kőolaj és a földgáz gyakran együtt fordul elő, így a földgáztartalékokban gazdag országok köre hasonló lesz a kőolajtartalékoknál listázott országokéval. Ennélfogva a legnagyobb tartalékokkal rendelkező országok (régiók) közé tartozik a Közel Kelet (75,8 billió m³) – azon belül is 75%-ban Irán és Katar együttesen –, Oroszország (37,4 billió m³), Türkmenisztán (13,6 billió m³), valamint az Egyesült Államok (12,6 billió m³), és amelyek együttesen domináns (74,1%) részét képezik a globális tartalékoknak 2020 végén. Ehhez képest az EU mindössze 441,8 milliárd m³ tényleges tartalékkal rendelkezett 2020. év végén, amely alig kilenc évre adna elegendő fedezetet a gáztermeléshez ceteris paribus (BP, 2021).

17. ábra Földgáztartalékok a világban (2020. év végi állapot szerint)



Forrás: BP (2021), Energy Institute (2023) és Ritchie et al. (2023) alapján saját szerkesztésű ábra

A földgáz esetében a kereskedelem két fő csatornán zajlik: régiókon átívelő csővezetéseken, illetve LNG terminálok között. Ez utóbbi 2022-ben a teljes régiók közötti kereskedelem mintegy 56%-át tette ki. Míg a hagyományos csatornákon Oroszország (29%) és

Norvégia (23%), addig LNG szempontból a legnagyobb exportőrnek a Közel Kelet, Ausztrália és az Egyesült Államok minősültek (együttesen 65%-át tették ki a teljes LNG exportkereskedelemnek). Importtevékenység tekintetében a szűkös tartalékok, valamint a történelmi infrastruktúrahálózat kiépítettsége miatt Európa, illetve az Egyesült Államok és Kína voltak a legnagyobb importőrök (együttesen 68,4%), míg LNG-import esetében az ázsiai-csendes-óceáni térség (65%) és Európa (30%) voltak a legjelentősebb importőrök (Energy Institute, 2023). Ezek a tartalékok és kereskedelmi tevékenységek kulcsfontosságúak az energiaellátás szempontjából, különösen a fűtés, az ipari tevékenységek és a villamosenergia-termelés szempontjából. Az európai gázellátás csővezetékeken alapuló része jelentős mértékben Oroszországból (pl. Északi Áramlat 1, Testvériség, Yamal-Europe, Török Áramlat) érkezett, kisebb részben pedig az északi-tengeri gázmezőkről (Europipe 1-2), Algériából (Medgaz, Maghreb-Europe gázvezeték) és Azerbajdzsánból (Trans Adriatic Pipeline) (a 2019-ben már működő, valamint épülőben lévő és tervezett csővezetékrendszer látható a Függelék *F4. ábráján*) (Marin, 2021). Ehhez képest a rugalmasabb LNG szállítás Európába főleg az Egyesült Államokból és Katarból érkezik. Mindezek pedig fontos geopolitikai és gazdasági következményekkel járnak együtt.

Végezetül következik a nukleáris fűtőanyagok, azon belül is az uránium tartalékainak bemutatása. Ahogy a *18. ábra* szemlélteti, a világ legnagyobb ismert urániumlelőhelyei Ausztráliában, Kazahsztánban és Kanadában találhatók. Ezek az országok jelentős részét képezik a globális urániumtartalékoknak (51%) a 130 USD/kgU egységár alatt kitermelhető uránium tekintetében. Az EU-ban korábban számos helyen volt uránbánya, ám ezek nagyrésze mára már bezárásra került. Romániában és Csehországban továbbra is egy-egy helyen aktívan bányásszák az urániumot, míg Finnországban, Svédországban, Spanyolországban, Portugáliában, Lengyelországban, Szlovákiában és Magyarországon is vannak (voltak) tervek, illetve kezdeményezések a bányák újrainyitására. 2021-ben 11 975 tonna uránt importált az EU, amellyel a teljes világpiaci kereskedelem közel negyedét lefedte (Wallner & Stein, 2012; World Nuclear Association [WNA], 2024).

18. ábra Urántartalékok* a világban (2021. év végi állapot szerint)



*Megjegyzés: 130 USD/kgU egységár alatt kitermelhető urántartalékra vonatkozólag.

Forrás: Nuclear Energy Agency és International Atomic Energy Agency (NEA, IAEA, 2023) alapján saját szerkesztésű ábra

A WNA (2024) jelentése szerint 2020 végén a globális éves urántermelés a világ összes reaktorának közel 79%-át fedezte, illetve elegendő urántartalék áll rendelkezésre az atomenergia folyamatos használatához és a nukleáris kapacitás jelentős növeléséhez a villamosenergia-termelés és más felhasználási módok tekintetében a következő 130 évben, figyelembe véve a 2020. évi uránszükségletet. Az előrejelzések szerint középtávon, 2040-re a kelet-ázsiai régióban lesz a legnagyobb az éves uránszükséglet. Az elmúlt évtizedben az urániapi árak ugyan jelentősen csökkentek a 2011-es fukusimai katasztrófa következtében, amely negatív hatással volt a feltérési és bányafejlesztési projektekre is, de a világ nukleáris kapacitása a belátható jövőben várhatóan növekedni fog, köszönhetően a globális energiaigény növekedésének, valamint a tiszta energiára való átállás szándéka miatt (NEA & IAEA, 2023).

Mindebből azt a következtetést tudom levonni, hogy az EU se a fosszilis tüzelőanyagok, se a nukleáris fűtőanyag tekintetében nem számít gazdasági nagyhatalomnak az ismert és gazdaságosan kitermelhető tartalékok ismeretében. Így a hagyományos és atomerőműveinkhez szükséges energiahordozók importálása nélkülözhetetlen. Ennek egyik oldalról nézve van egy pozitív hozadéka is, miszerint az energiahordozók fizikai tulajdonságai lehetővé teszik a szállítást és a stratégiai készletezést. Erre jó gyakorlati példa a téli gáztárolás jelensége, amely lehetővé teszi az energiaellátók számára, hogy a téli hónapokban, amikor a gázfogyasztás jelentősen megemelkedik a fűtési igények miatt, kielégítsék a megnövekedett keresletet. Ez a

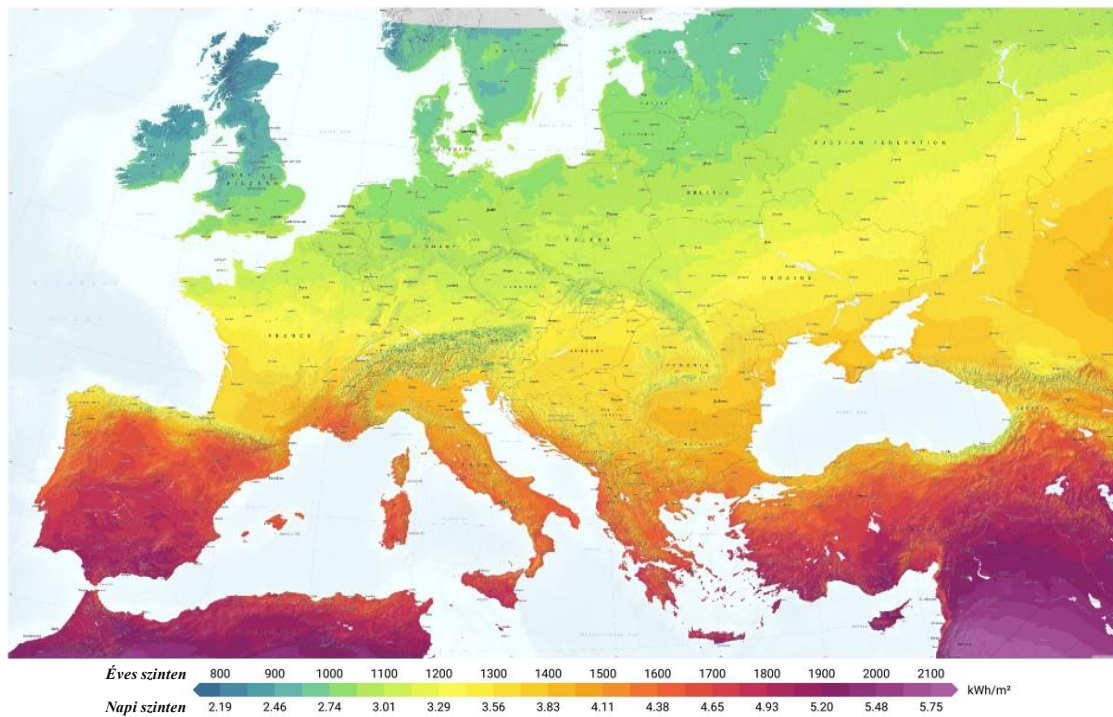
gyakorlat segít kiegyensúlyozni a gázpiac szezonális ingadozásait, stabilizálhatja az árakat, és növeli az energiaellátás biztonságát azáltal, hogy biztosítja a szükséges gázmennyiséget a csúcsfogyasztási időszakokban, vagy amikor a megújulóakra az időjárási körülmények miatt nem számíthatunk. Másik oldalról nézve, az olaj- és gázipar különösen érzékeny a geopolitikai kockázatokra, mivel ahogy láthattuk az ásványvagyon földrajzi koncentrációját, javarészt a világ politikailag és gazdaságilag instabil régióinak többségei bővelkednek ezen tüzelőanyagokkal. Végezetül, ahogy az első fejezetben említésre került, az atomenergia, így az uránbányászat társadalmi elfogadottsága nagyon megosztó, ugyanakkor várhatóan az urán iránti globális kereslet növekedni fog a jövőben az atomenergia tiszta és viszonylag gazdaságos villamosenergia-termelő jellegéből kifolyólag.

2.2.2.2. Megújuló energiaforrások és -hordozók területi sajátosságai

Az előző alfejezetben arra a konklúzióra jutottam, hogy az EU energetikai szempontú ásványvagyon regionális eloszlásának tekintetében egyáltalán nem bővelkedik számottevő lehetőségekkel. Mindazonáltal, a megújuló energiaforrások és -hordozók terén ez a helyzet már egészen más képet mutat, hiszen, ha csak általánosságban arra gondolok, hogy mindenhol süt a nap, fúj a szél, van növényzet és vízkészlet, illetve forró kőzetanyag található a földkéregben, akkor az érvek egyértelműen a megújulók mellett szólnak. Érdekes azonban egyesével is megnézni ezeket a fő megújuló energia tényleges potenciálokat az EU tekintetében, itt is a lehető legfrissebb adatokat alapul véve (az elmúlt évtizedek trendjeinek bemutatása szorosan kapcsolódik a későbbiekben részletezendő témakörhöz, így attól most eltekintek, csupán egy aktuális helyzetértékelés a célom).

Első körben a napenergia kiaknázásában rejlő lehetőségeket tekintem át röviden. Az EU-ban a napenergia potenciálja országonként eltérő, függ a földrajzi helyzettől, az éghajlati viszonyoktól és a napsütéses órák számától. Ezáltal különböző országokban különböző mértékű az átlagosan elérhető teljesítménysűrűség (19. ábra). Dél-Európában, például Spanyolországban, Olaszországban és Görögországban általában magasabb a napenergia potenciál a több napsütéses óra és erősebb napfény miatt. Északabbra, például az Egyesült Királyságban és Skandináviában, pedig alacsonyabb ez a potenciál.

19. ábra Horizontális besugárzáson alapuló napenergia potenciál Európában

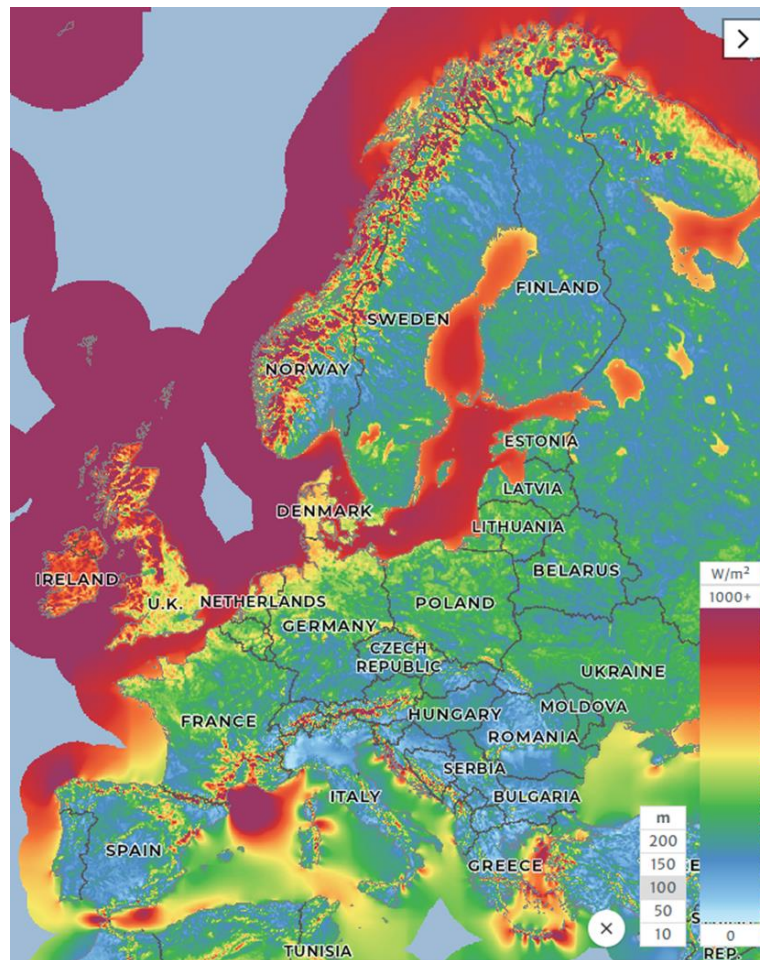


Forrás: Solargis (2021) alapján saját szerkesztésű ábra

Ehhez képest 2023-ra becsült EU-ban telepített napenergia-kapacitás (263 GW) közel 60%-a az északibb európai területeken, például Németországban (82,1 GW), Hollandiában (22,5 GW), Franciaországban (18,7 GW), Belgiumban (9,5 GW) és Skandináviában (9 GW) található, ahol az időjárási körülmények és adottságok nem a legoptimálisabbak éves átlagban nézve. Ezek közül is az egy főre vetített kapacitásban Hollandia, Németország és Belgium vezet az élmzőnyt. Így potenciálisan más területekhez képest viszonylag alacsonyabb napenergia-hozamokat tudnak elérni. Egyébként Spanyolország közel 50%-kal nagyobb napenergia-potenciállal rendelkezik, mint Németország. Ezt felismerve, Spanyolországban is rohamosan épülnek ki az új kapacitások, így 2023-ban jelenleg 35,6 GW-al a második a rangsorban. E rangsor végén jelenleg pedig Horvátország, Luxemburg, Málta és Lettország áll, mind 0,5 GW alatti összkapacitással. A jövőbeli kilátásokat tekintve pedig, az előrejelzések szerint 2027-re a legrosszabb esetben is 471 GW-ra bővül a kumulált napenergia-kapacitás az EU-ban, míg legjobb esetben ez akár meghaladhatja a 700 GW-ot is. Mindezen kilátások élvonalába továbbra is Németország prognosztizált Spanyolország és Olaszország mellett (SolarPower Europe, 2023).

A napenergia potenciál mellett a szélenergiában rejlő lehetőségek kiaknázása jelenti az EU másik fő megújulókon alapuló energiastratégiáját. E tekintetben az EU-ban jelentős lehetőségek rejlenek mind az onshore, mind az offshore szélerőművek telepítésében (20. ábra).

20. ábra A szélenergia potenciál Európában



Forrás: Davis et al. (2023) és Global Wind Atlas (é.n.) alapján saját szerkesztésű ábra

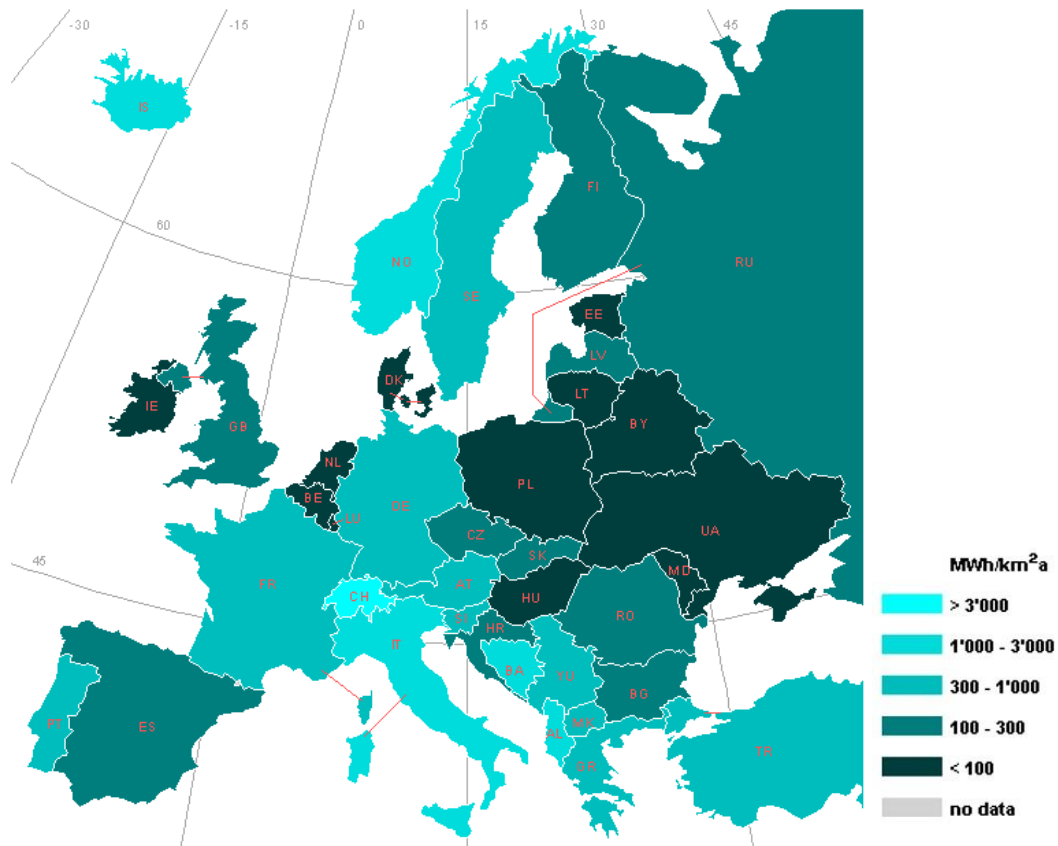
Az előbbieket széles körben elterjedtek a kontinensen, például Németországban, Spanyolországban és Franciaországban, míg az offshore szélerőművek tekintetében az Északi-tenger és a Balti-tenger kiváltképp optimális helyszínnek minősül, emiatt nem véletlen az sem, hogy Európa vezető szerepet tölt be a tengeri szélenergia területén, 2022-ben a globális tengeri szélenergia-kapacitás 47,1%-át tudhatja magáénak (Global Wind Energy Council, 2023).

Az EU 2023-ban az onshore és offshore szélerőművek tekintetében, együttesen 220 GW szélenergia kapacitással rendelkezett, melynek jelentős része Németországhoz (31,8%), Spanyolországhoz (13,9%) és Franciaországhoz (10,4%) tartozott. Az összkapacitás nagyrésze szárazföldi erőművekből tevődik össze (91%). Ugyanakkor offshore tekintetében is

Németországé (9 GW) a vezető szerep, melyet Hollandia (5 GW) és Dánia (3 GW) követ. Az előrejelzések tekintetében, összhangban az EU-s direktívákkal nagyjából majdnem akkora kapacitásbővülésre számítanak a szakértők 2030-ra, mint amekkora a teljes EU-s szélenergia kapacitás volt 2020-ban (200 GW) (WindEurope, 2024).

A vízenergia hasznosítása az EU-ban régmúlta nyúlik vissza. Napjainkban a vízenergia egy érett szektornak minősül mind építési-technológiai, mind földrajzi potenciálok tekintetében. Ahogy a *21. ábra* is szemlélteti, az egy négyzetkilométerre jutó energiapotenciál tekintetében leginkább Európa északi, közép és délkeleti részein van kimagasló potenciál. Ezért is van az, hogy 2022-ben Európában legnagyobb kiépített vízenergia kapacitással (beleértve a szivattyús tárolókat is) Norvégia (34 GW) és Törökország (32 GW) rendelkezett. Az EU esetében nagyjából 152 GW kiépített vízenergia kapacitásról beszélhetünk, mely nagyrésze Franciaországhoz (26 GW), Olaszországhoz (23 GW) és Spanyolországhoz (20 GW) kapcsolódik. Tehát összességében többnyire alpesi környezetben találhatóak meg az EU-s kiépített kapacitások és döntően duzzasztós víztározós formában, míg a folyóvizes, valamint nyitott és zárt rendszerű szivattyús-tározós erőművek egyenlő arányban oszlanak meg. Az Eurostat jelentése alapján a szakértők a vízenergiához kapcsolódó beruházási lehetőségeket főleg a már meglévő infrastruktúra hibrid megújuló technológiákkal történő modernizálásában (pl. hidrogéntermelés vagy úszó naperőmű kiépítésének lehetősége), másrészt pedig a szivattyús víztározók további kiépítéseiben, illetve a magasan fekvő területeken a gleccserek visszahúzódása által létrejövő új tavak víztározós lehetőségeiben látják. Mindazonáltal, a vízerőművek számára a legmegfelelőbb helyszíneket már kiaknázták, további bővítések esetében számos akadályozó tényező van, mint például a szigorú szabályozási környezet, környezetvédelmi területek vagy magas beruházási költségek (European Commission [EC], 2023).

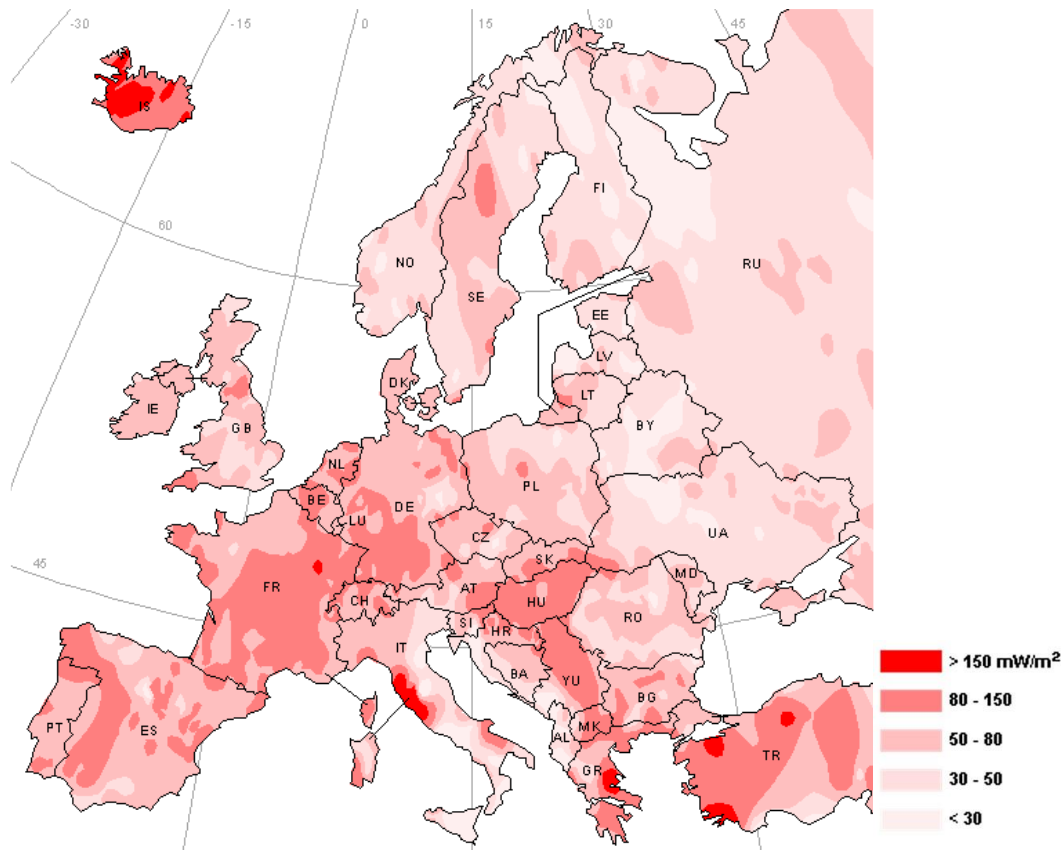
21. ábra Elméleti vízenergia potenciál Európában



Forrás: Global Energy Network Institute (2017) alapján saját szerkesztésű ábra

A geotermikus potenciálról csak röviden érdemes megemlíteni, mivel elsősorban inkább távfűtésre és egyéb épületenergetikai célokra alkalmas, mint villamosenergia-termelésre. A 40 °C és 150 °C közötti hőmérséklet ideális a távfűtéshez, míg villamosenergia-termeléshez elméletileg legalább 90 °C hőmérsékletű forrásokra van szükség a gőz előállításához, amely meghajthatja a turbinákat, de ez a gyakorlatban inkább a 150 °C feletti hőmérsékletet jelenti. Ezért is van az, hogy világszerte a geotermikus energia csak kb. 30 országban biztosít villamosenergia-termelési lehetőséget, míg több mint 80 ország használja fűtésre-hűtésre (International Renewable Energy Agency [IRENA] & International Geothermal Association, 2023). A 22. ábrán látható, hogy az egyes országok földtani adottságai milyen mértékben alkalmasak a geotermikus energia kiaknázására, azaz adott területegységre vetítve mekkora energia nyerhető ki. Alapvetően a geológiai aktív zónák, mint a vulkanikus területek jellemzően magas geotermikus gradienssel rendelkeznek, ami elősegíti a geotermikus energia gazdaságos kinyerését.

22. ábra Geotermikus potenciál Európában



Forrás: Global Energy Network Institute (2017) alapján saját szerkesztésű ábra

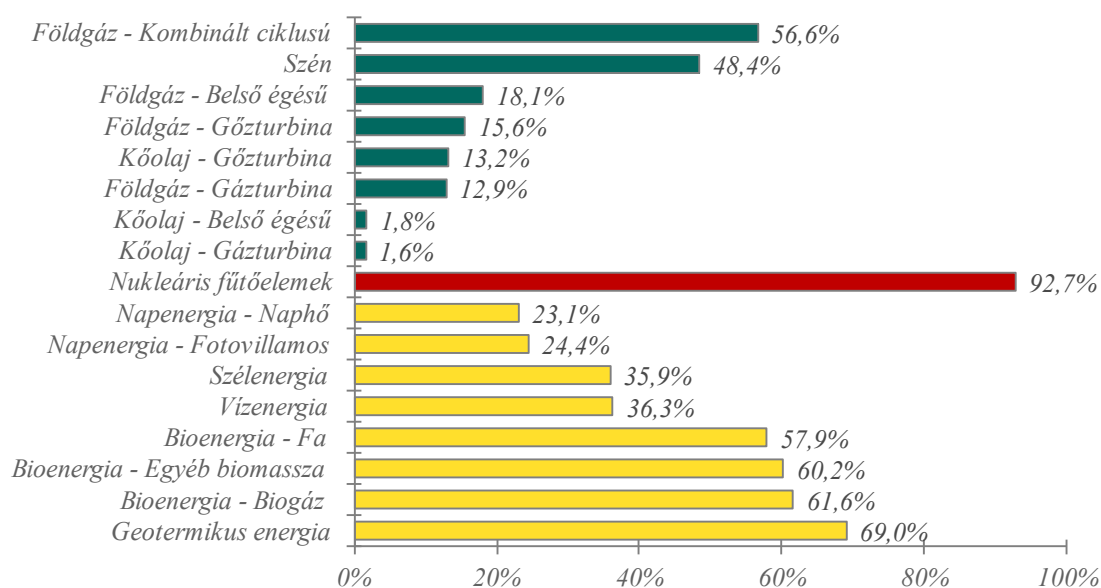
2021-ben a geotermikus villamosenergia-termelés globális beépített kapacitása 15,96 GW volt. 2022-ben egész Európát tekintve (3,5 GW) Törökországban volt a legnagyobb villamosenergia-termelést szolgáló geotermikus kapacitás beépítve (1,7 GW), míg Izlandon található területarányosan a legnagyobb a potenciál, mely 754 MW kiépített kapacitással bír. Az EU-ban Olaszországban (916 MW) volt a legmagasabb, míg a soron következő Németországban már csak 50,1 MW állt rendelkezésre villamosenergia-termelésre (European Geothermal Energy Council, 2023). Megjegyzésként, ahogy a fenti ábra is sugallja, Magyarországon jelentős geotermikus potenciál áll rendelkezésre, ám eddig ez nem került még kellően kiaknázásra – melyet jól érzékeltet a beépített kapacitás 3,35 MW nagysága –, habár itthon is szintén inkább a fűtés-hűtéshez kapcsolódó geotermikus energia részarányt lehetne növelni (Kujbus & Talamon, 2024).

Érdeemes még szót ejteni a bioenergiában rejlő potenciálokról is regionális aspektusban. Alapvetően a bioenergia Európa legfontosabb megújuló energiaforrása, 2021-ben a megújuló energiaforrásokból származó bruttó végső energiafogyasztás mintegy 56%-át tette ki. Ugyanakkor ennek nagyrésze a fűtés-hűtés területén kerül hasznosításra, míg a

villamosenergia-termelésben, gyakran kogeneráció (kombinált hő- és villamosenergia-előállítás) formában mindössze az EU teljes bruttó villamosenergia-termelésének kb. 5-6%-át tette ki. Ezt főleg szilárd biomassza (51%), illetve biogáz (34%) felhasználásából nyert áramtermelés szolgáltatta. A megújuló energiák felhasználásán belül a bioenergia villamosenergetika felhasználásában jelenleg Németország, Olaszország és Finnország van az első három helyen (Bioenergy Europe, 2022). A bioenergia alapjául szolgáló biomassza elérhetőségéhez másképp szükséges hozzáállni, hiszen ennek eredete származhat éppúgy a természetes vegetáció termékeiből (elsődleges források), mint másodlagos (állatvilág és állattenyésztés melléktermékei) és harmadlagos (ipari fő és melléktermékek) forrásokból. Az EU biomasszájának nagy részét lokálisan állítják elő, illetve az EU-n belüli kereskedelem jelentős szerepet játszik ebben az erőforrás-allokációban (European Environment Agency [EEA], 2023).

Fontosnak tartom azt kiemelni, hogy különböző energiaforráshoz, illetve erőműhöz kapcsolódó beépített kapacitások azonos értékei (pl. 20 MW beépített kapacitással rendelkező nap- és szél erőmű) még nem jelentik azt, hogy ugyanakkora mértékben fognak tudni villamos energiát előállítani. Ezt számos erőműspecifikus tényező befolyásolja. Ezért érdemes összevetni a különféle energiaforrások és -hordozók (pontosabban a kapcsolódó technológiák) kapacitásfaktorait is (23. ábra).

23. ábra Különböző közüzemi méretű generátorok átlagos kapacitásfaktorai az áramtermelésben



Forrás: EIA (é.n.-a) alapján saját szerkesztésű ábra

A kapacitásfaktor azt mutatja meg, hogy egy adott erőmű adott időegység alatt ténylegesen termelt, valamint ugyanezen időszak alatt folyamatosan, teljes üzemmódban elméletileg előállítható villamos energiának az aránya mekkora. Más szóval azt méri, hogy egy adott erőmű milyen gyakran működik maximális teljesítményen.

Az Egyesült Államokbeli erőművek alapján végzett felmérés alapján jól látszik, hogy messze az atomerőművek rendelkeznek a legmagasabb kapacitásfaktorial (92,7%), tehát egy átlagos atomerőmű az üzemidő több mint 90 százalékában termel áramot. Ehhez képest egy fotovillamos naperőmű csak 24,4%-ban termel áramot. Az összehasonlítást ugyanakkor megfelelő kontextusban érdemes tenni, figyelembe véve valamennyi erőmű esetében az egyedi jellemzőket (pl. naperőművek időjárásfüggő jellege, atomerőművek fel-le kapcsolásának gazdasági és technikai jellemzői stb.).

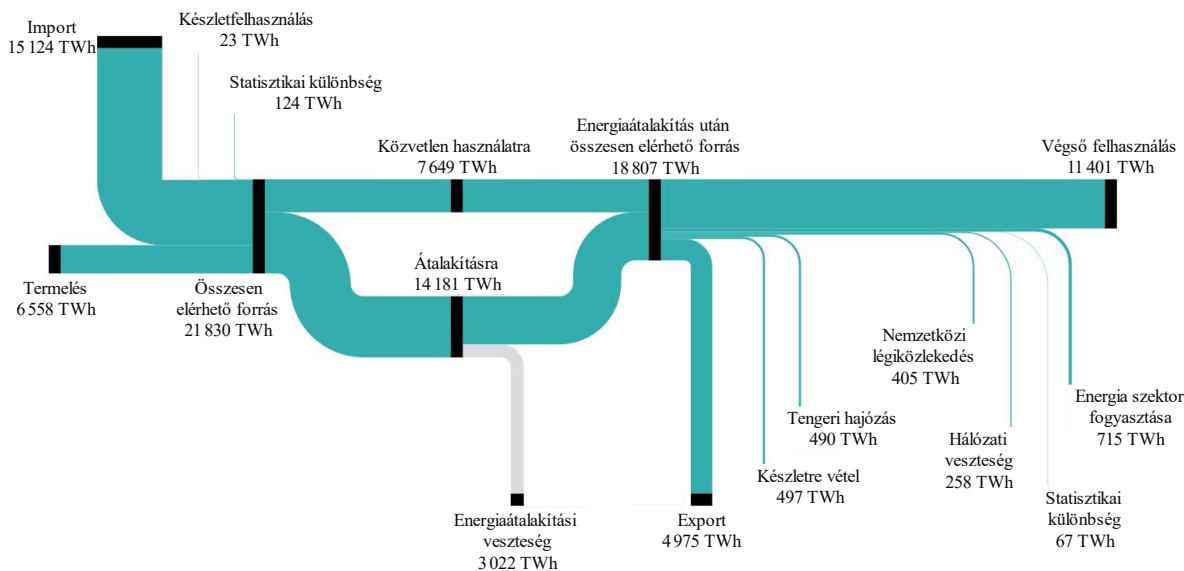
Mindebből az következik, hogy az EU különböző régiói különböző mértékben rendelkeznek nap-, szél-, víz- és geotermikus energia potenciálokkal. Összességében tehát jelentős, de egyúttal korlátozott potenciálok rejlenek a megújuló energiaforrások és -hordozók további kiaknázásában az EU-ban, jóllehet megoszlik az EU preferenciarendszere az egyes lehetőségek között, mely nem csak földrajzi adottság, hanem energiapolitikai irányelvek és gazdasági szempontok (ideértve az EROI-számítások) kérdése is. Ettől eltekintve – ahogy azt a következő fejezetekben ismertetésre fog kerülni – az EU egy integrált megközelítést alkalmaz, így valamennyi megújuló energiaforrás fejlesztését ösztönzi, amely lehetővé teszi az erőforrások diverzifikációját és az energiaellátás biztonságának növelését. Azonban a megújulók melletti elköteleződés mellett számos korábban már ismertetett problémát és korlátot kell áthidalnia az EU-nak. Szemben az energiahordozókkal, a megújuló energiák tárolása még nem megoldott, korunk egyik nagy kihívását jelenti. Az infrastruktúra korszerűsítésének, valamint a villamosenergia-hálózat folyamatos bővítésének igénye, a sokszor lassú engedélyeztetési folyamatok, illetve számos esetben a lakossági ellenállások további nehézségeket okozhatnak a megújuló energiát felhasználó erőművek terjedésében.

2.3. Az EU villamosenergia-rendszere a gyakorlatban

Az energiarendszerben az energia átalakulása a primer energiától a hasznos energiáig több lépcsőn és átalakítási folyamaton keresztül történik, minden lépés hatékonysága pedig befolyásolja az elérhető hasznos energia mennyiségét és minőségét. Korábban a 3. és 4. ábrán egyszerűsített sémában mutattam be az energiaellátási rendszereket, ahogy az elsődleges energiából végső soron hasznos energia jön létre. A következő 24. ábra már konkrétan az EU-

ra vetítve és a 2022-es tényadatokra építve ismerteti ún. Sankey-diagramm segítségével az energiamérleget a főbb energiaáramlásokon keresztül.

24. ábra Az EU-27 energiamérlege 2022-ben



Forrás: Eurostat (2022) alapján saját szerkesztésű ábra

Ez alapján az látszik, hogy az összes elérhető primer energiamennyiség csak mintegy 52,2%-a fog végso, azaz lakossági, kereskedelmi és szolgáltatási, ipari, közlekedési és közvetlen felhasználásra kerülni. A különbszet nem csak veszteségből és önfogyasztásból keletkezik, hanem jelentős volt az energiaexport mennyige is.

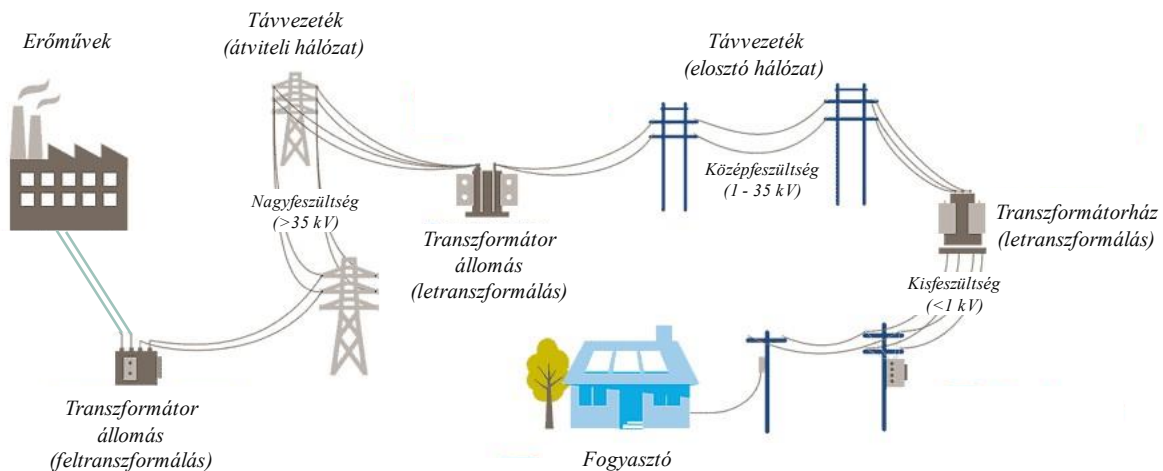
A következőkben e logika mentén az EU villamosenergia-rendszerének elemeit ismertetem röviden, amit a villamosenergia-piac működési mechanizmusának részletezése követ.

2.3.1. Termelőktől a fogyasztókig

A villamosenergia-rendszer lelke alapvetően a fizikális infrastruktúrában rejlik, amelynek központi eleme a villamosenergia-hálózat. Ez igaz a világ bármely villamosenergia-rendszerére, függetlenül annak egyedi és specifikus jellegétől, centralizált vagy decentralizált voltától. A villamosenergia-hálózat szerepe a megtermelt villamos energiának eljuttatása a fogyasztókig. Összességében a villamosenergia-rendszer elemei, mely magába foglalja többek között az erőműveket, a távvezetéseket, és a fogyasztókat, együttesen biztosítják, hogy az áram biztonságosan és a lehető leghatékonyabban jusson el a fogyasztókig (25. ábra). A rendszer

fizikai és jogi szabályozása nagyban összefügg, utóbbira az EU energiapolitikájának ismertetése során fogok kitérni részletesen.

25. ábra A villamosenergia-hálózat rendszere



Forrás: Saját szerkesztésű ábra

A rendszer kiindulópontja az erőművek köre, mint villamosenergia-termelő egységek. Alapvetően kétféleképpen lehet áramot előállítani, melyek közül az erőművek döntő többsége turbinák és generátorok segítségével, ahol a kiindulási energiaforrástól és -hordozótól függetlenül végső soron mozgási energiát alakítunk át elektromos árammá (váltóárammá). A másik út, amikor egyenesáramot termelünk, amit a fotovillamos naperőművek állítanak elő (de az akkumulátorok, üzemanyagcellák és a termoelektromos generátorok is DC-t termelnek, csak ezek most kevésbé relevánsak). E tekintetben lehet csoportosítani is az erőműveket: megkülönböztetünk hőerőműveket, ahol a fosszilis tüzelőanyagok, nukleáris fűtőanyagok, vagy éppenséggel megújuló biomassza égetésével, illetve a napfény koncentráálásával termelünk hőt. Ez a hő vagy közvetlenül, pl. gáz- és olajégetés során keletkező nyomáskülönbség miatt, vagy egy vizes közeg segítségével gőzfejlesztés során hajtja meg a turbinákat, mely erőgép forgatja az áramtermelő generátor mozgó részét, feszültséget indukálva ezáltal. Hőerőműveken kívül még van fotovillamos naperőmű, szél- és vízerőmű. Hagyományosan az erőműveket a rendszer terhelésének, azaz kihasználásuk függvényében szokás kategorizálni alaperőművekre (melyek egész évben egyenletesen képesek termelni, pl. szén- és atomerőművek, geotermikus és biomassza alapú erőművek, folyóvízi erőművek), csúcserőművekre (melyek gyorsan indíthatóak, rugalmasak, így a csúcsfogyasztások idején szolgáltathatnak energiát, pl. gázturbinás és olajtüzelésű erőművek, szivattyús-tározós vízerőművek), valamint menetrendtartó erőművekre (melyek a csúcsidőn kívüli, közepes terhelésváltozásokat képesek

fedezni, pl. kombinált ciklusú erőművek) (Bihari, 2012). A nap- és szélenergiaforrások nehezen illeszthetők be ebbe a kategorizálásba, hiszen időjárásfüggő jellegükből fakadóan se alap-, se csúcserőművek nem minősülhetnek, így ezeket gyakran használják a köztes terhelés kielégítésére (Bodnár, 2019; Creti, 2019).

Ahogy Evans et al. (2009) is rámutat, az erőművek összehasonlítása során a bemeneti elsődleges energiaforrások és -hordozók villamos energiává történő átalakításának hatékonysága fontos paraméter. Ugyanis, ahogy a 24. ábrán is látszott, az átalakítás során is éri veszteség a rendszert az erőművek berendezéseinek hatásfokából adódóan, valamint a szállítás során a távvezetékek ellenállása miatt. Hatékonyságot lehet növelni pl. kombinált ciklusú erőművekkel, ahol a gázturbinából keletkező hőenergiával gőzt fejleszthetünk, meghajtva ezzel egy másodlagos generátort, vagy olyan (ko-, illetve trigenerációs) erőművekkel, ahol ugyan másodlagosan nem áramfejlesztés a cél, de legalább a keletkező extra energia hasznosulhat fűtés, illetve fűtés-hűtés céljából. Továbbá magának az erőműnek is van egy alap önfogyasztása. Mindezeket együttevén, jelentős energiaveszteség történik az átalakítás során. A 7. táblázat tartalmazza az egyes erőműtípusok átlagos villamosenergia-termelő hatékonyságát.

7. táblázat A villamosenergia-termelés hatékonysága különböző technológiák használata mellett

Technológia	Hatékonyság
Geotermikus energia	10% – 20%
Napenergia - Fotovillamos	4% – 22%
Napenergia - Naphő	8% – 26%
Atomenergia	30% – 36%
Bioenergia	16% – 43%
Szélenergia	23% – 45%
Kőolaj-tüzelésű	30% – 42%
Széntüzelésű	32% – 45%
Földgáz	45% – 53%
Vízenergia	– 95%

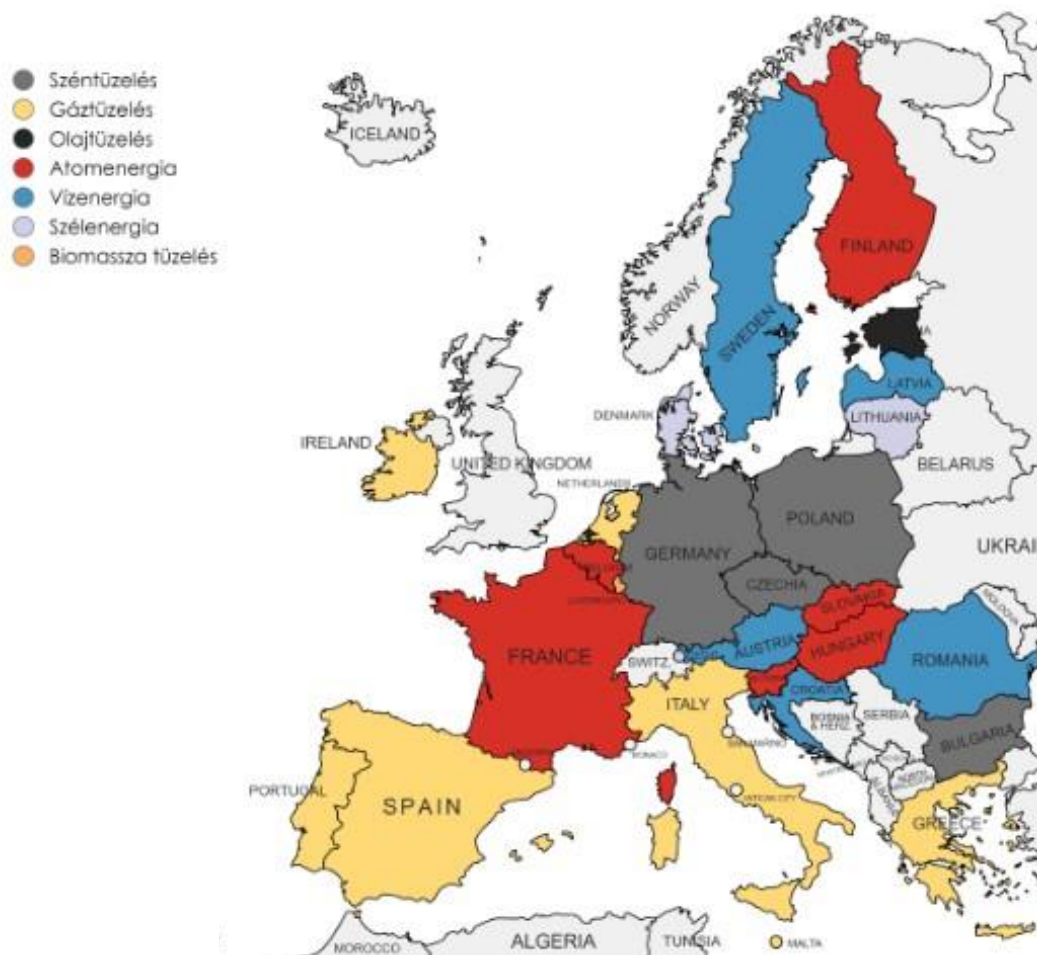
Forrás: Evans et al. (2009) és Lawson (é.n.) alapján saját összeállítás

Messze a vízerőművek rendelkeznek a legnagyobb hatékonysági fokkal, melyet a földgáztüzelésű hőerőművek követnek. A nap- és szélenergia esetében a hatékonyság nagyban függ a technológiától, illetve a telepítés során figyelembe vett földrajzi adottságtól, míg a

geotermikus energiánál a hőforrás hőmérséklete határozza meg a keletkező gőz mennyiségét, így a generátor áramtermelő képességét (Evans et al., 2009).

Vizualizálható az is, hogy 2022-ben Európa egyes országaiban milyen forrásból származik az áramtermelés domináns része (26. ábra). 2022-ben az EU villamosenergia-termelésének közel 22%-át az atomenergia tette ki, mellyel párhuzamosan Franciaországban (62,8%), Belgiumban (46,6%), Magyarországon (44,2%), Finnországban (35,3%), Szlovákiában (60%), valamint Szlovéniában (42%) az atomenergia volt a legnagyobb arányban az áramtermelés forrása. Az atomenergiát követően a gáztüzelés (19,3%), valamint hasonló arányban a széntüzelés (16,2%) és szélenergia hasznosítás (15,1%) következett EU-s átlagszinten.

26. ábra Európa legnagyobb villamosenergia-forrása országonként 2022-ben



Forrás: EMBER Climate (é.n.-a) alapján Mapchart segítségével készített ábra

Az ábrán jól látszik, hogy 2022-ben az Ibériai félsziget, a görög szigetvilág, valamint az olasz csizma területén volt jelentős a gáztüzelés hasznosítása áramtermelés céljából, míg

dominánsan széntüzelésre Németország, Lengyelország, Csehország és Bulgária támaszkodott. Habár a megújuló erőforrásokon alapuló áramtermelés elsődlegessége már jó pár EU-s tagországban megjelent, kihasználva az adott országok kedvező természeti erőforrás adottságait (pl. Ausztria, Dánia, Horvátország, Lettország, Litvánia, Románia, Svédország), összességében 2022-ben az EU villamosenergia-termelés átlagának mintegy 39%-a származott megújuló energiaforrásokból.

Visszatérve a hálózatok szerepére, a villamosenergia-termelők számára lehetőség van közvetlenül nagyfogyasztóhoz eljuttatni a megtermelt áramot, vagy exporttevékenységet végezhetnek, valamint közvetetten betáplálni a villamos energiát a hálózatba, így juttatva el azt a többi lakossági és ipari fogyasztóhoz. Az erőművi alrendszer tehát távvezetéseken keresztül kapcsolódik a végfelhasználókhoz. E távvezetékrendszert feloszthatjuk átviteli (alap) és elosztó hálózatokra. Előbbi nagy távolságokra képes szállítani az elektromos energiát az erőművekből az elosztóhálózatok felé. Ehhez először fel kell transzformálni nagyfeszültségű az elektromos áramot, mivel így gazdaságos (azaz kevésbé veszteséges) a szállítása nagyobb távolságok között. A lokális elosztóhálózatokhoz érve az egyes alállomásokon a nagyfeszültséget letranszformálják az elosztóhálózati feszültségszintre. Ez lehet középfeszültség nagyfogyasztók esetében, illetve kisfeszültség egy újabb, vég kisfogyasztókhoz közelebbi transzformátorház közbeiktatásával. Az átviteli és elosztói hálózatokat külön-külön rendszerüzemeltetők irányítják (rendre *transmission system operator*, *TSO* és *distribution system operator*, *DSO*), melyek gazdasági és jogi működését szigorú szabályozás keretezi (Molnár, 2021).

A villamosenergia-rendszereknek azonban egy adott ország határai nem szabnak tényleges határt. Globálisan általánossá vált, hogy nemzetközi kooperációs villamosenergia-rendszerek alakulnak ki, amelyek az összekapcsoltságuk révén jelentősen csökkentik az egyes országok sebezhetőségét az ellátási zavarokkal szemben, továbbá gazdasági előnyökkel is jár az export-import tevékenység révén. Az uniós összekapcsolt villamosenergia-piac biztonságát, valamint optimális működését és fejlődését hivatott nyomon követni az európai átviteli rendszerüzemeltetők szövetsége, a Villamosenergia-piaci Átvitelirendszer-üzemeltetők Európai Hálózata (*European Network of Transmission System Operators for Electricity*, *ENTSO-E*). A rendszer műszaki és piaci vonatkozású üzemviteli szabályok fejlesztésén, valamint a résztvevő felek és egyéb hivatalos szervek közötti kommunikációs platform biztosításán felül az ENTSO-E konkrét célja, hogy támogassa az EU energiapolitikájának végrehajtását és elérje Európa energia- és klímapolitikai célkitűzéseit. Vagyis elősegítse a megújuló energiaforrásokból előállított villamos energia betáplálását és az új technológiák

integrációját. Az ENTSO-E jelenleg 40 tagot számlál 36 országból, melybe az EU valamennyi tagállama beletartozik, kivéve Málta, ahol jelenleg nincsen még TSO a villamosenergia-rendszerében – a 2023-as ENTSO-E térkép megtalálható a Függelék *F5. ábráján* (European Network of Transmission System Operators for Electricity [ENTSO-E], 2023).

Mindent összevetve, a villamosenergia-hálózatot a 19. és 20. századok fontos vívmányának tekinthetjük. A megújuló energiatermelés és az elosztott energiaforrások növekedése azonban folyamatosan technikai kihívások elé állítja a jelenlegi hálózatot. Az infrastruktúra modernizálására számos innováció lát napvilágot, mint például hogy olyan intelligens hálózatra van szükség, amely képes önállóan döntéseket hozni az egész rendszer biztonságának és stabilitásának megőrzése érdekében, kombinálja a hálózatot automatizálással és egyéb digitális megoldásokkal.

Tehát ez az alfejezet csak a villamosenergia-rendszer és az áramellátás fizikai megvalósulását mutatta be lényegre törően. Azonban az elektromos áram nem áramlik közvetlenül a fogyasztókhoz közvetítők nélkül, gazdasági kontextusban. Erre szolgálnak a villamosenergia-piacok, melyeknek alapvetően két fajtáját különböztetjük meg, a nagy- és kiskereskedelmi villamosenergia-piacot. A következőkben – a dolgozatom kutatási céljából kifolyólag – a nagykereskedelmi villamosenergia-piac működését fogom áttekinteni, azon belül is fókuszálva a nagykereskedelmi áramár alakulását befolyásoló tényezők feltérképezésére.

2.3.2. A nagykereskedelmi villamosenergia-piacok működési mechanizmusa

Maga a villamos energia egy speciális szekunder energiahordozónak minősül, melynek árát is különböző tényezők kombinációja határozza meg. Alapvetően az egyensúlyi árat a kereslet és kínálat egyensúlya alakítja, mint valamennyi árucikk esetében, azonban az elektromos energia olyan egyedi jellemzőkkel bír, amely miatt a villamosenergia-piac eltérő viselkedéssel rendelkezik más árupiacokhoz képest (Bahar & Sauvage, 2013; Creti, 2019; Zachmann et al., 2023).

Először is, sok áruval ellentétben a villamos energia önmagában nem tárolható semmilyen méretben. Az energia tárolható, de maga a villamos energia nem. Ugyanakkor az is igaz, hogy a termodinamika törvényének megfelelően a villamos energia tárolhatóvá válik miután átalakul más energiaformákká, például kémiai (akkumulátorok) vagy potenciális (szivattyús-tározós erőmű) energiává, de a jelenlegi technológia korlátai miatt nehéz nagy mennyiségű villamos energiát tárolni. Ezért a villamosenergia-kínálatnak mindig meg kell felelnie az éppen aktuális

keresletnek, miközben mind a kereslet mennyisége, mind a kínálat forrása folyamatosan változik egy adott átlagos nap folyamán (Zachmann et al., 2023).

Ami a keresleti oldalt illeti, a villamosenergia-fogyasztás szintje szektoronként (lakossági, ipari, kereskedelmi vagy közlekedési szektor) eltérő. Általánosságban az áramkeresletet az ipari tevékenységek, a technológiai fejlettség, az időjárás viszonyok, a mindennapi társadalmi és gazdasági tevékenységek, az otthoni szokások és a modern elektronikus eszközök használata befolyásolja. A fogyasztás nagysága gyorsan változik és szezonálisan ingadozik. Mindazonáltal, az elektromos áram mindennapi életünk mozgatórugója, így a villamos energia iránti kereslet viszonylag rugalmatlan, amikor az áramár emelkedik, főleg a lakossági szektorban, ahol gyakran az árak szabályozottak. Továbbá, a fogyasztás kategorizálható az időszerű mennyiségi igény alapján alapterhelési (ami a 24 órán keresztül szükséges legkisebb mennyiségű villamos energiára utal), csúcsterhelési (amikor a magas kereslet jellemzően rövid időszakokra jelentkezik) és közepes terhelési tartományra. A terhelési görbék mind napközben, mind hónapról hónapra eltérnek az időjárás szezonálitása miatt (Bhattacharyya, 2011).

Mivel a villamosenergia-ellátásnak meg kell felelnie ezeknek a folyamatosan változó fogyasztási szinteknek, a szolgáltatók általában negyedórás időközönként mérnek, és az így becsült mennyiségekkel kalkulálnak a termelőktől való vásárlásuk során. Ez a folyamat elsősorban a nagykereskedelmi villamosenergia-piacon történik, ahol a villamos energiát nagy tételben vásárolják, illetve értékesítik, és magában foglalja a villamosenergia-kereskedelem minden formáját és résztvevőjét, tehát a villamosenergia-termelőket, a szolgáltatókat, a kiskereskedőket és a nagyfogyasztókat is (Hafner & Luciani, 2022). A nagykereskedelmi piacon a kereskedés különböző platformokon keresztül történhet, amelyek időbeli és termékbeli eltéréseket mutatnak (Bahar & Sauvage, 2013; Creti, 2019):

- ❖ Az azonnali piacokon a villamosenergia-kereskedelem közel azonnali szállítással történik. A résztvevők a másnapi piacokon keresztül egy nappal előre licitálhatnak a következő napi villamosenergia-szállításra. Ezzel szemben a napon belüli piac lehetővé teszi a szállítást a kereskedés napján;
- ❖ A határidős piacokon a piaci szereplők szerződéseket kötnek arra vonatkozólag, hogy egy jövőbeli időpontban az adott napon megállapított áron vásárolnak vagy adnak el villamos energiát. Így a résztvevők a határidős piacokon fedezhetik a kockázataikat, melyeknek két fajtájuk van. A *forward* ügyletek a decentralizált piacokra vonatkoznak, ahol az egyedi határidős szerződésekkel közvetlenül két fél között

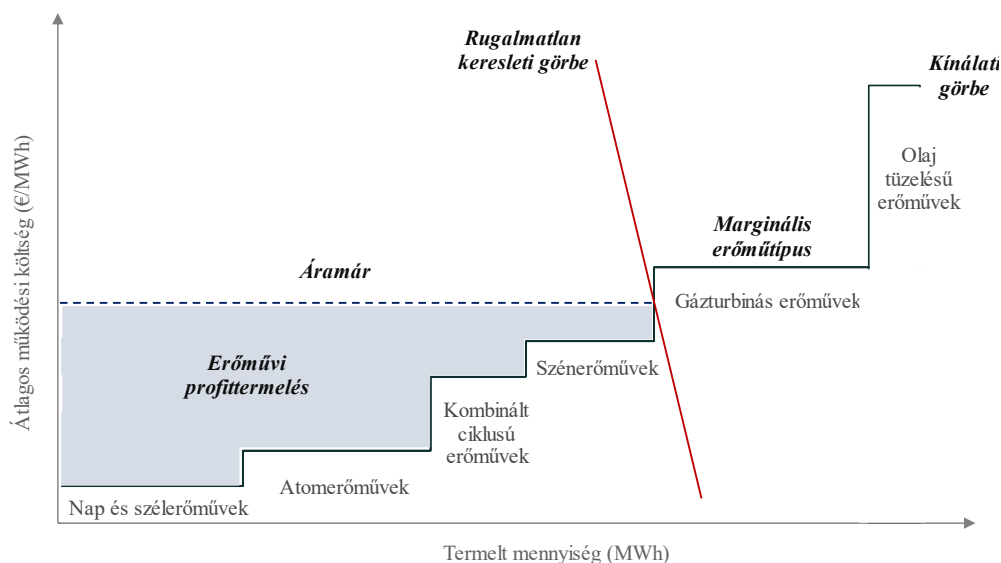
kereskednek (tőzsdén kívüli kereskedelem), míg a *futures* olyan szabványosított határidős ügyletek, amelyekkel tőzsdén kereskednek.

A nagykereskedelmi villamosenergia-kereskedelem jelentős része energiátőzsdén keresztül történik (azonnali és határidős piacok), de a felek kétoldalú megállapodásokat is köthetnek, melyek köre az általános szállítási szerződésektől a tőzsdén kívüli szerződésekig terjednek. Utóbbiakhoz a tőzsdén kívüli, klíringházak nélküli megállapodások tartoznak, például áramvásárlási megállapodások (*power purchase agreement, PPA*) és swap ügyletek, melyek általában határidős ügyletekre vonatkoznak (de rövid távú ügyletek a tőzsdén kívüli azonnali piacokon keresztül is lebonyolíthatók). Továbbá, a harmadik típusú villamosenergia-piaci forma, nevezetesen a kiegyenlítő piac a valós idejű piacot jelenti, ahol a TSO valós időben kereskedik az energiával, hogy kiegyenlítsse a hálózatot (Zachmann et al., 2023).

A villamos energia ára tehát a kereslet és kínálat egyensúlyának függvénye, amely azonban attól függ, hogy mennyi és milyen típusú erőmű termel olyan mennyiségű elektromos áramot, amely kielégíti a keresletet. Ezt a koncepciót határkölség-alapú árképzésnek nevezzük, mely szerint a mindenkori árat a kereslet maradéktalan kielégítéséhez szükséges utolsó egységnyi villamos energia határkölsége határozza meg. Ezt az egységet határegységnek nevezzük, azt az erőművet, amelyik pedig legutoljára került bekapcsolásra, tehát a határegységet szolgáltatja, marginális erőműtípusnak hívjuk (Bahar & Sauvage, 2013).

A határkölség nagysága a villamosenergia-termeléshez használt technológiától, a tüzelőanyagtól, valamint az aktuális kereslet szintjétől függően változhat. Az adott időszakra vonatkozó villamosenergia-kereslet előrejelzés után a termelők ajánlatot tesznek arra vonatkozóan, hogy mennyi villamos energiát tudnak szállítani és milyen áron, ami a határkölségüket jelenti. Ezután a piacműködtető a kereslethez igazítja a kínálatot, a legalacsonyabb ajánlatokkal kezdve, majd a kereslet növekedésével a nagyobb határkölséggel működő erőművekkel folytatva. Ez a rangsor a 27. ábra által illusztrált bekapcsolási sorrend (*merit-order*) néven ismert. Végül a kereslet kielégítéséhez szükséges utolsó egység ára (a bekapcsolt erőmű egységnyi határkölsége) határozza meg a villamos energia elszámolóárát az adott időszakban az adott licit zóna (*bidding zone*) szerinti összes villamosenergia-ellátás számára (a villamosenergia-piacon a licit zónák olyan meghatározott földrajzi területek, amelyekben belül az áram ára egységesen kerül meghatározásra) (Bhattacharyya, 2011; Hafner & Luciani, 2022).

27. ábra A merit-order mechanizmusát szemléltető mintapélda



Forrás: Bahar és Sauvage (2013) alapján saját készítésű ábra

A fenti ábra alapján az is látszik, hogy amennyiben csökken a kereslet, úgy azt nagyobb valószínűséggel tudják kielégíteni a megújuló erőművek, tehát elméletileg csökkenni fog az áramár. Továbbá, a marginális erőműtípus előtt bekapcsolt erőművek egyetemlegesen szolgáltatnak áramot azért az árért, amelyben a marginális erőmű is részesül. Ennélfogva, ezen olcsóbban értékesítő erőművek profithoz jutnak annak függvényében, hogy mekkora volt a saját operációs költségük.

Az erőművek határköltségei magukba foglalják az adott erőmű üzemeltetési és fenntartási költségét, de nem tartalmazzák a telepítési és a jövőbeli rekultivációs költségeket. Következésképpen, a megújuló energiaforrások közül a nap- és szélenergia áll az első helyen a rangsorban, mivel ezek nem igényelnek tüzelőanyagot, csak ütemezett karbantartást, ami viszonylag alacsony a fosszilis tüzelőanyaggal működő erőművekhez képest. A többi megújuló energiaforrással működő erőműnek is általánosságban alacsonyabbak a működési költségei, mint a nem megújuló forrásoknak, amely összességben versenyelőnyt biztosít a piacon a hagyományos erőművekkel szemben (Timmons et al., 2014). Ez pedig a fogyasztók szempontjából megfizethetőséget jelent, amely fontos szempont az EU energiastratégiájában. Így a megújuló energiákon alapuló technológiákra való áttérés nem csak az éghajlatváltozás elleni küzdelmet hivatott biztosítani, hanem a merit-order mechanizmus révén támogatja az elektromos áram megfizethetőségét is mindamelllett, hogy csökkentheti a külső

energiaimporttól való függőséget is (ha feltételezzük, hogy az időjárás-függő megújuló energiaforrások adott időben elérhetőek a kereslet fedezéséhez) (Tol, 2023).

A merit-order mechanizmusán keresztül jól látszik, hogy valamennyi primer és szekunder energiaforrás közvetlenül, de különböző nagyságban tud szerepet játszani az áramár alakulásában. Ugyanakkor megjegyezzük, hogy ugyan köszönhetően az EU integrált piacának a historikus nagykereskedelmi villamos energiaárak magas fokú összekapcsoltságot mutatnak, de az egyes régiók között továbbra is vannak kisebb-nagyobb árkülönbségek olyan tényezők miatt, mint az átviteli korlátok, infrastrukturális fejlettségi szintek vagy az egyedi energiamixek és regionális geopolitikai események (Creti, 2019; Deutsch et al., 2018). Tehát általánosságban az EU összekapcsolt energiapiacain az árak konvergálnak.

A villamosenergia-piac működési mechanizmusának áttekintése után azt a következtetést tudom levonni, hogy a nagykereskedelmi áramár alakulásának számos befolyásoló tényezője van, melyek közül keresleti oldalon közvetlenül az áramfogyasztási szükséglet a mérvadó, amelyet többek között az időjárási viszonyok (hőmérséklet), gazdasági aktivitás, ipari termelés, technológiai fejlettség, lakosság mérete és mindennapi szokásai határoznak meg. Mivel leegyszerűsítve a villamosenergia-fogyasztás megegyezik az erőművek önfogyasztásával, a hálózati veszteségekkel, valamint a nettó export értékével csökkentett áramtermeléssel, így a fogyasztást a kínálati oldalról is meg lehet közelíteni. A kínálati oldalon pedig alapvetően a köztes és csúcsidőszakok termelési jellege szabhatja meg az árat, így – a merit-order mechanizmusán keresztül – jelentős hatással kell, hogy legyen a megújuló energiaforrások aránya az össztermelésben a nagykereskedelmi áramárra, valamint annak az utolsó, marginális erőműnek a költsége, amelyet bekapcsolni szükséges a fogyasztói igények maradéktalan kielégítése céljából. Amennyiben a megújuló erőművek ezt nem képesek fedezni, úgy a gyakorlatban – ahogy a 27. ábra is szemlélteti – valamely fosszilis, gyakorta földgáztüzelésen alapuló erőmű rugalmas használata indokolt. Így ennek a fosszilis energiahordozónak a teljes egységköltsége lesz hatással a végső nagykereskedelmi villamosenergia-árra. Ugyanakkor azokon a területeken, ahol a megújuló energiaforrások nagyobb mértékben kerültek hasznosításra, ott a fosszilis tüzelőanyagok árának volatilitása az áramárra kevésbé van befolyással optimális időjárási körülmények esetén.

A nagykereskedelmi villamosenergia-árak előrejelzése kiemelkedően fontos az energiapiacok hatékony működése, a hálózati irányítás működési hatékonysága és a fogyasztók védelme szempontjából. Az árampiac jellemzői és valamennyi befolyásoló tényezője miatt azonban az áramárak közép- és hosszútávú előrejelzése kihívást jelent. Nem is beszélve egy olyan multiváltságokkal terhelt időszak vizsgálatáról, mint amilyenben a közelmúltban volt

részünk, és mely biztosan újfajta próbatételeket és tanulságokat hozott a villamosenergia-árak előrejelzése tekintetében.

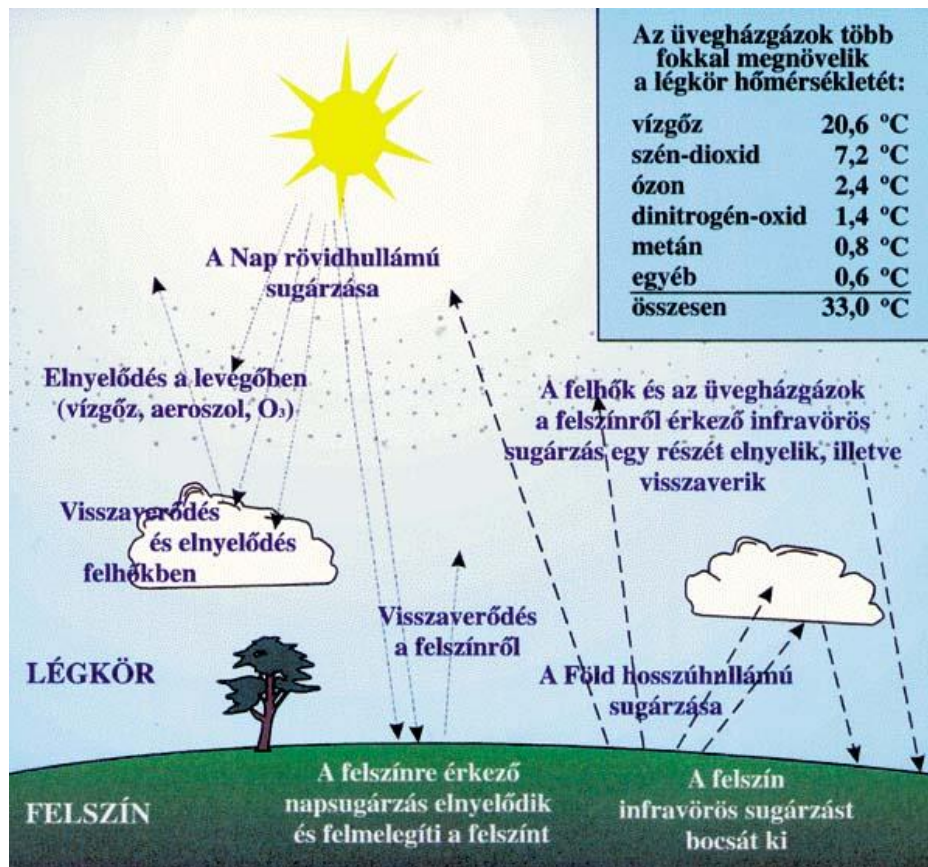
2.4. A globális éghajlatváltozás jelensége és következményei

Egy korábbi fejezet elejét azzal indítottam, hogy a folyamatos népességnövekedés az elmúlt bő két évszázad során végbement társadalmi-gazdasági fejlődés egyik következménye. Most hasonló megközelítésből indulok ki, így e folyamathoz szorosan kötődő, ámde (sajnálatosan) negatív következményt kell ismertetnem az utolsó körben.

Ha kiindulópontként megvizsgáljuk a népességnövekedés (illetve az energiaszükségleteink) robbanásszerű emelkedésének kezdetét, akkor nagyjából egészen az első és a második ipari forradalom, vagyis a különféle találmányok és a tömeggyártás kora okozta hatalmas technológiai, gazdasági és társadalmi változásokig nyúlhatunk vissza. Amellett, hogy ezek megváltoztatták a gyártási folyamatokat és az emberiség életkörülményeit, az ipari forradalmak jelentősen hozzájárultak a széntüzelés használatának növekedéséhez, mivel valamennyi gőzgépet és egyéb mechanikát ezzel hajtották elsődlegesen. A szén egységnyi égetése során, ahogy korábban ismertettem nagyon jelentős CO₂ és más káros anyag, mint például kén-dioxid (SO₂), nitrogén-oxidok és szálló por szabadul fel. Ezek az anyagok az atmoszférába jutva hozzájárulnak az üvegházhatású gázok (tehát a CO₂, metán, dinitrogén-oxid és egyéb nyomgázok) koncentrációjának növekedéséhez, amely fokozza az üvegházhatást, valamint a levegőszennyezéshez, ami egészségügyi problémákat és környezeti károkat okoz.

Az üvegházhatás a Föld légkörének képessége arra, hogy megőrizze a Napból érkező hőt a Földfelszínen a légkörben található üvegházhatású gázok a felszínről induló infravörös kisugárzásnak visszaverésével (28. ábra). Belátható, hogy bizonyos mértékig ez egy kedvező folyamat, hiszen lehetővé teszi az élet fenntartását a bolygón, mivel ez a jelenség nélkül a Föld középhőmérséklete nagyjából 33 °C-al lenne alacsonyabb. Az üvegházhatás mintegy 62,4%-ért a légköri vízgőz a felelős, amit 21,8%-os arányban a CO₂, illetve 7,3%-ban a troposzferikus ózon okoz (Karátson & Száraz, 1997).

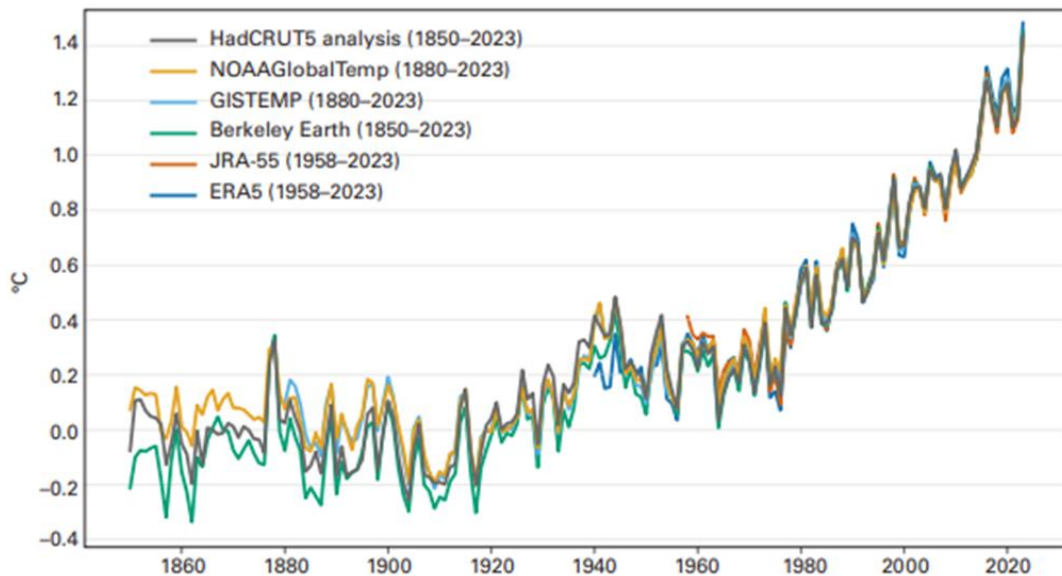
28. ábra Az üvegházhatás vázlatos folyamata



Forrás: Karátson és Száraz (1997)

Így az erősen iparosodott gazdaságok és társadalmi tevékenységeik – amelyek motorja máig a fosszilis tüzelőanyagok égetése – növelik az ÜHG-k szintjét a légkörben, ami erősíti ezt a természetes folyamatot és a Föld átlaghőmérsékletének emelkedéséhez vezet. Ráadásul a CO₂ és más ember által kibocsátott gázok hosszú ideig maradnak a légkörben, hozzájárulva ezzel a hőmérséklet hosszú távú emelkedéséhez (29. ábra). Ez a globális felmelegedés tehát a Föld klímarendszerének hosszú távú változását okozza, amely a klímaváltozás elleni globális küzdelem fő kiváltója. A cél – ahogy az EU 2019-ben megfogalmazta – legalább a klímasemlegesség (nettó zéró kibocsátás) elérése lenne, azaz a légkörbe csak annyi ÜHG kerüljön, amennyit a természet (erdők, óceánok és a talaj) el tud nyelni.

29. ábra A Föld átlaghőmérsékletének alakulása 1850 és 2023 között különböző kutatócsoportok becslései alapján



Forrás: World Meteorological Organization (WMO, 2024)

Az éves átlaghőmérséklet-növekedésnél általában az 1850-1900 közötti átlaghőmérsékletet szokták alapul venni az összehasonlításhoz, mint a második ipari forradalom előtti időszak alapértékét. A Berkeley Earth (2024) jelentése szerint a globális átlaghőmérséklet 2023-ban $1,54 \pm 0,06$ °C-kal² magasabb volt az akkori értéknél. Emiatt több mint 77 országban mértek új rekordokat éves átlaghőmérséklet szinten, valamint megdőltek mind a szárazföldi, mind az óceáni korábbi éves hőmérséklet átlagok. Ugyanakkor a jelentés felhívja a figyelmet arra is, hogy a 2023-as felmelegedés rendkívüli volt, mivel természetes és emberi okozta tényezők együttesen okozták a növekedést. Amellett, hogy az ÜHG-k kibocsátása, amely a globális felmelegedés alapvető oka, 2023-ban rekordmagasságot ért el, az El Niño éghajlati jelenség és a vulkánkitörések mind hozzájárultak a globális felmelegedéshez.

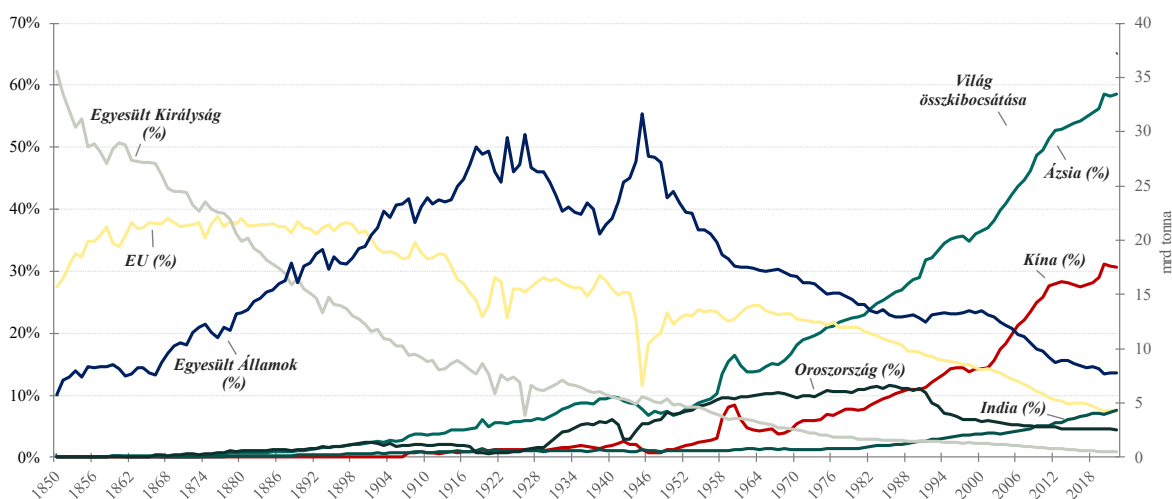
A 30. ábra azt mutatja meg, hogy 1850 és 2022 között adott országok mekkora mértékben járultak hozzá az éves globális CO₂-kibocsátáshoz, valamint, hogy a világ összkibocsátása milyen mértékben változott ez idő alatt. Az ábráról egyértelmű trendek olvashatók le. A becslések szerint míg 1850-ben globálisan nagyjából 196,75 millió tonna volt az éves karbonkibocsátás nagysága, ez 2000-re 25,50 milliárd tonnára nőtt, és mely 2022-re már meghaladta a 37,15 milliárd tonnát is. Ez a vizsgált időszakra vetítve egy 3,1%-os éves

² A jelentés ugyanakkor megjegyzi, hogy módszertani különbségek miatt más kutatócsoportok (pl. EU Kopernikusz Éghajlatváltozási Szolgálata, NASA) 2023-ra valamivel kevesebb, mint 1,5 °C-os hőmérséklet emelkedést jelez elő.

növekedési ütemnek felel meg. A növekvő trend bár egyértelmű, de azért kisebb visszaesések láthatóak az ábrán, például 2020-2021-ben, melynek háttérében a COVID-19 pandémia okozta időszakos gazdasági visszaesések és lezárások álltak.

A globális karbonkibocsátás megoszlását tekintve, a legnagyobb kibocsátással a megfigyelt időszak elején az Egyesült Királyság rendelkezett, hiszen az angol birodalom az elsők között vett részt az iparosodás folyamatában. Majd az első világháborút megelőzően már az Egyesült Államok vette át a vezető szerepet, mígnem a második világháborút követően – amely alatt kiugróan magas volt a karbonkibocsátása az országnak a hadászati és hadiipari tevékenységekből adódóan – meredeken csökkenni kezdett ez az arány. Mindeközben az EU (illetve a 27 jelenlegi tagország együttevét) az 1900-as évek eleji közel 40%-os részarányából a két világháború ideje alatt összességében meredeken beeső karbonkibocsátási aránnyal bírt, mely egyértelműen az eltolódó súlypontok, valamint a súlyos európai veszteségek és gazdasági visszaesések következményei voltak. Ez az arány napjainkra 10% alá került, mely betudható részben az EU-s nettó zéró karbonkibocsátási törekvéseknek is, ugyanakkor leginkább annak a következménye, hogy jelenleg a világ legnagyobb kibocsátóinak egy nagy része az ázsiai térségben található meg (58,6% 2022-ben) (Friedlingstein et al., 2022).

30. ábra A globális CO₂-kibocsátás* részaránya egyes országok szerint 1850 és 2022 között



*Megjegyzés: A fosszilis tüzelőanyagokból és az iparból származó szén-dioxid kibocsátást tartalmazza, míg a földhasználatból eredő kibocsátást nem.

Forrás: Friedlingstein et al. (2022) alapján saját készítésű ábra

Az ázsiai országok, például Kína, India, Japán és Dél-Korea, jelentős gazdasági fejlődésen mentek keresztül a második világháborút követő évtizedekben. A fokozatosan

felfutó iparosodás és az infrastrukturális fejlődés, valamint a gyors gazdasági és népességnövekedés miatt ezen országok, kiváltképp Kína jelentős mennyiségű energiát és nyersanyagokat használnak fel, amely nagyfokú CO₂-kibocsátással párosul. Ezen országok energiaigénye pedig folyamatosan növekszik, melynek kielégítéséhez nagymértékben támaszkodnak fosszilis tüzelőanyagokra, ahogy azt a 8. táblázat is szemlélteti.

8. táblázat Egyes országonkénti (régiókénti) fosszilis tüzelőanyag fogyasztás (TWh)

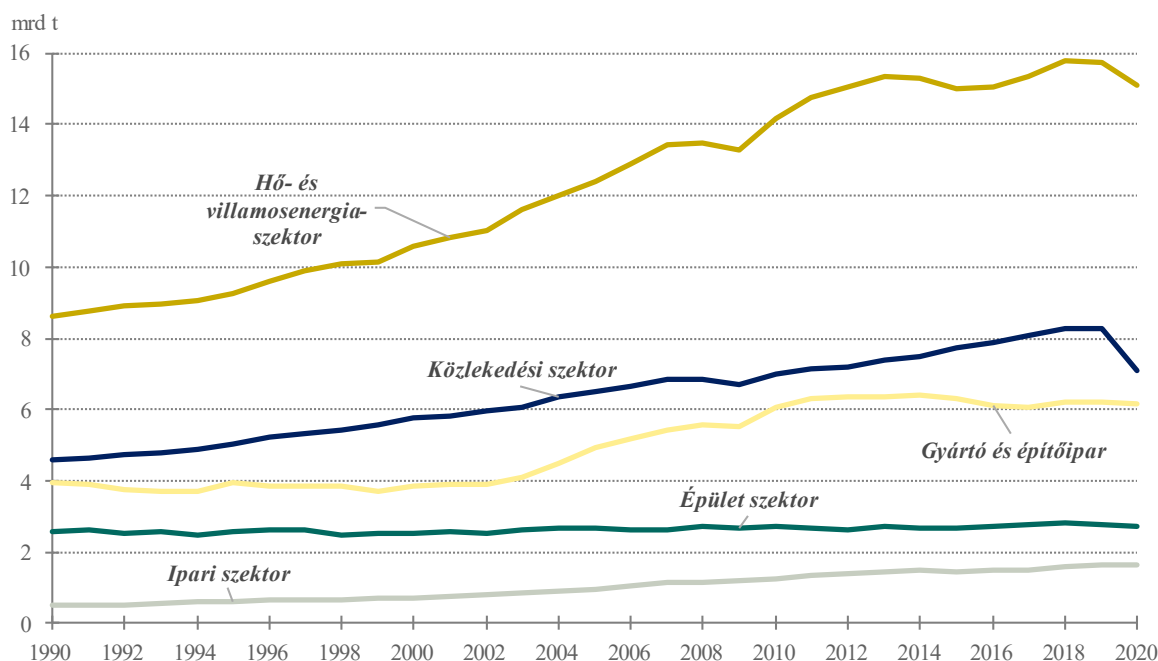
Ország/régió	1970	1980	1990	2000	2010	2020	2022
Egyesült Királyság	2 464	2 264	2 305	2 393	2 225	1 452	1 520
Egyesült Államok	17 340	19 085	19 816	23 225	22 174	19 917	21 595
Európai Unió	11 788	14 827	14 524	14 326	14 031	11 130	11 521
Kína	2 291	4 655	7 563	11 085	26 644	34 753	36 138
India	670	1 048	2 086	3 446	5 771	7 839	8 955
Ázsia	7 955	13 441	23 515	33 616	58 716	73 061	77 567
Világ	53 194	70 620	83 064	94 407	121 503	129 446	137 237

Forrás: Energy Institute (2023) és Ritchie et al. (2023) alapján saját összeállítás

Világviszonylatban 1970-ben és 2022-ben rendre 97,6%-át, valamint 91,7%-át tették ki a fosszilis tüzelőanyagok a primer energiafogyasztásnak. A fenti táblázatban jól látszik, hogy míg az 1970-es évek elején ennek nagy részéért az Egyesült Államok volt a felelős (32,6%), addigra ez az arány áttolódott az Ázsiai régió (56,5%), azon belül is Kína (26,3%) irányába, miközben a globális fosszilis tüzelőanyagfogyasztás több mint két és félszeresére nőtt ez idő alatt (Energy Institute, 2023; Ritchie et al., 2023).

Függetlenül a regionális karbonkibocsátási különbségektől, általánosságban az is látszik, hogy a CO₂-kibocsátást elsődlegesen okozó fosszilis tüzelőanyagfogyasztás alapvetően az energiaipar működési sajátosságaiból ered. Az országok (régiók) szerinti bontás helyett a 31. ábra a karbonkibocsátás ágazatok közötti megoszlását mutatja meg. Az egyes gazdasági szektorok különböző módon és mértékben járulnak hozzá a karbonkibocsátáshoz, a kapcsolódó energiaforrás-használat és az adott tevékenységek jellegétől függően. Az egyértelműen látszik, hogy a villamosenergia- és hőtermelés karbonlábnyoma a legszignifikánsabb köszönhetően a fosszilis tüzelőanyagok égetésének, és amely a termelési trendekkel párhuzamosan növekedett, igaz, időről-időre kisebb visszaeséseket produkált. A villamosenergia-termelés mintegy 60,7%-át tették ki 2023-ban a fosszilis energiahordozók, s bár a megújuló részaránya vitathatatlanul növekszik évről évre (2000: 18,7%, 2023: 30,2%), továbbra is a szén- és gáztüzelés a domináns a globális villamosenergia-termelésben (Climate Watch, 2022).

31. ábra A főbb szektorok szerinti globális CO₂-kibocsátás

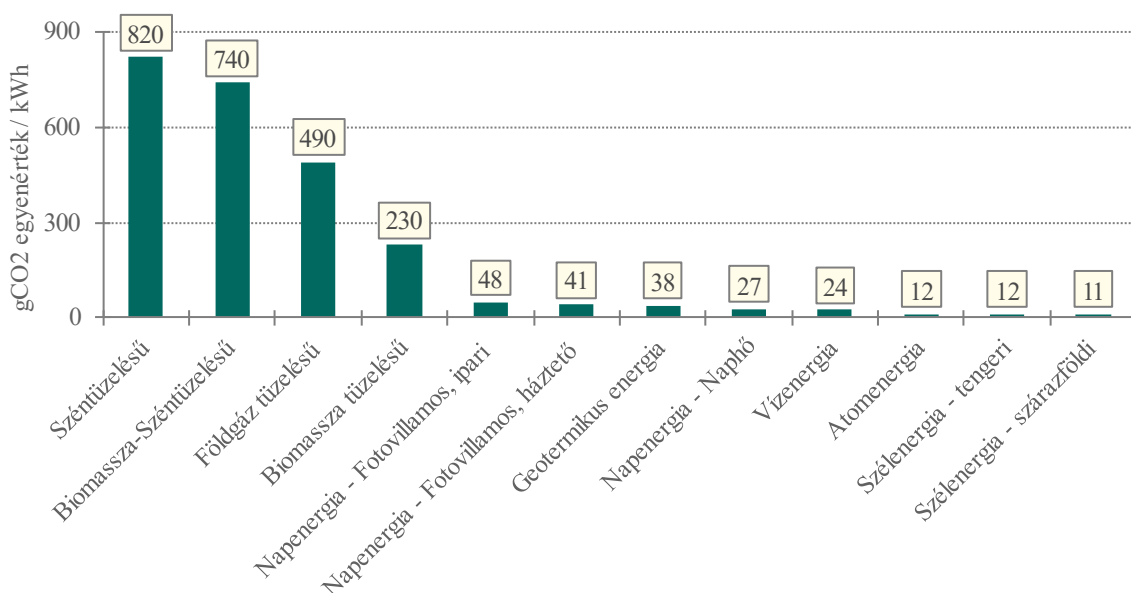


Forrás: Climate Watch (2022) alapján saját készítésű ábra

Az energiaszektort a sorban a közlekedési szektor karbonlábnyoma követi a személy- és teherszállításhoz kapcsolódó járművekben elégetett üzemanyagok (benzin és dízel) elégetésének mértéke miatt, valamint jelentős a gyártó és építőipar tevékenységeinek kibocsátása is. Ezzel összhangban van az, hogy Kína gazdasági növekedésének motorja nagyrészt az ipari tevékenységek, például az acél- és cementgyártás, az energetikai szektor és a közlekedési infrastruktúra fejlődése miatt következett be, melyek mind szignifikánsan hozzájárulnak a világ karbonkibocsátásához.

Mivel globális szinten az energiaszektor a legfőbb okozója a CO₂ és más ÜHG-k kibocsátásának, érdemes kiragadni ebből az összehasonlításból ezt a szektort, és tovább vizsgálni, hogy az egyes villamosenergia-termelő technológiák mekkora karbonlábnyommal rendelkeznek. Ezt teljeskörűen akkor lehet felmérni, ha nem csak a működésük során, hanem a teljes életciklusukat figyelembe véve vizsgáljuk meg a kilowattónkénti CO₂-egyenértékeket (32. ábra).

32. ábra A CO₂-kibocsátás tüzelőanyag vagy iparági típus szerint



Forrás: Intergovernmental Panel on Climate Change (2014) alapján saját készítésű ábra

Belátható, hogy felépítését, működését és leszerelését tekintve teljesen tiszta erőmű nem létezik, tehát a karbonsemlegesség minősítést csak a működésre lehet megítélni. Ugyanakkor, számottevően tisztább működésű erőműnek minősülnek a megújuló energiákon, illetve atomenergián alapuló erőművek, melyből kivételt képeznek a biomassza-tüzelésű megoldások. Emellett vannak ugyan kezdeményezések a CO₂-megkötésére erőműi szinten, ugyanakkor ezek jelenleg még nem hatékonyak, ellenben költségesek. Ez tehát összhangban van a korábban ismertettekkel, és alátámasztja azt az általános megértést és törekvést, hogy a megújuló energiákon alapuló energiarendszerek biztosíthatják a klímaváltozás elleni küzdelem egyik fő értékét.

Azt hozzá kell azért tenni a teljes képhez, hogy a tudósok már a 19. században felismerték, hogy az emberi gazdasági tevékenység potenciálisan növelheti a Föld hőmérsékletét. Ezt első körben Svante Arrhenius nevű svéd kémikus és fizikus írta le 1896-ban, aki megjósolta, hogy a CO₂-koncentráció növekedése jelentősen melegítheti a Földet. Azonban a tudományos konszenzus kialakulásához, valamint ahhoz, hogy a politikai döntéshozók és a társadalom szélesebb rétegei is foglalkozzanak az ügygel, arra még jó pár évet kellett várni (UNDP, 2000).

A 20. század második felétől az Egyesült Nemzetek Szervezete [ENSZ] (*United Nations, UN*) keretében folyik a globális környezetvédelmi és klímaváltozási kezdeményezések koordinálása, univerzális platformot nyújtva a tagoknak az együttműködés terén. Ebből a célból

jött létre az 1972-ben megtartott emberi környezetről szóló stockholmi konferencia következtében az ENSZ Környezetvédelmi Programja (*United Nations Environment Programme, UNEP*) is. Az UNEP és a Meteorológiai Világszervezet (*World Meteorological Organization, WMO*) által támogatva 1979-ben megtartották az első Világ Klíma Konferenciát, majd a két szervezet kezdeményezésével 1988-ban létrehozták az ENSZ Éghajlatváltozási Kormányközi Testületét (*UN Intergovernmental Panel on Climate Change, rövidítve IPCC*) is, amely az ENSZ klímaváltozással foglalkozó szakmai szervezete lett, fő feladata pedig a klímaváltozással kapcsolatos szekunder kutatási eredmények összegyűjtése és feldolgozása. Négy évvel később pedig, az ENSZ Környezetvédelmi és Fejlesztési Konferenciája (*UN Conference on Environment and Development, UNCED*) 1992-ben Rio de Janeiro-ban elfogadásra került az az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezménye (*UN Framework Convention on Climate Change, UNFCCC*), melynek már fő célja a globális éghajlatváltozás lassítása, az üvegházhatású gázok légköri koncentrációjának stabilizálása. Az UNFCCC keretében rendszeresen tartanak éghajlatváltozással kapcsolatos konferenciákat, ahol a részes felek megvitatják és elősegítik az egyezmény célkitűzéseinek elérését. Ezek a konferenciák egyben a szervezet legfőbb döntéshozó testülete is, a *Conference of the Parties (COP)* 1995 óta évente ülésezik és értékeli ki az aktuális helyzetet, valamint az elmúlt évek előre lépéseit (Bartholy et al., 2013).

Ezen COP találkozók során több kiemelkedő esemény is történt, például COP-3 alatt fogadták el a Kiotói Jegyzőkönyvet 1997-ben, amely 2005-ben lépett érvénybe. Ez volt az első nemzetközi egyezmény, amely jogilag kötelező célokat állapított meg az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére a fejlett országok számára. Az első kötelezettségvállalási időszakban (2008-2012) a ratifikáló országoknak az 1990-es bázisévhez képest átlagosan 5,2%-kal kellett csökkenteniük az üvegházhatású gázok kibocsátását. Az EU akkori 15 tagállama 8%-os csökkenést vállalt, a később csatlakozó Magyarország például 6%-ot vállalt. Az első időszak lejártával a 2012-ben Dohában megtartott konferencián (COP-8) elfogadták a Kiotói Jegyzőkönyv kötelezettségvállalásbeli és módszertani módosításait, és meghatároztak egy második kötelezettségvállalási időszakot is (2013-2020). Bár a kötelezettségvállaló tagállamok összetétele átalakult, a vállalás immáron arról szólt, hogy az új időszakban legalább 18%-kal a korábbi bázisév alá csökkentsék az üvegházhatású gázok kibocsátását. A Kiotói Jegyzőkönyv egyik fontos eleme a kibocsátási engedélyek kereskedelmének, valamint egy átfogó felülvizsgálati és ellenőrzési rendszer bevezetése volt. Ugyanakkor, a kötelezettségvállalás csak a fejlett országokra vonatkozott, fejlődő országok mentesültek a kibocsátáscsökkentési kötelezettségek alól (Tietenberg & Lewis, 2012; United Nations Framework Convention on

Climate Change [UNFCCC], é.n.-b). Ahogy a 30. ábrán is látható volt, míg a 90-es évek végén az Egyesült Államok volt a legnagyobb kibocsátó, addig a 2000-es évek végén már Kína és India jelentős arányt képviselt az összkibocsátásban, jelentősen növelve az üvegházhatású gázok globális mértékét, így végső soron tovább nőtt az üvegházhatású gázok kibocsátásának mértéke a bázisévhez képest.

Mindez idő alatt, 2009-ben a Koppenhágában tartott COP-15 alkalmával először fogalmazták meg konkrétan azt, hogy az átlaghőmérséklet emelkedést 2 °C alatt kell tartani mindenféleképpen. Ez a nyilatkozat azonban nem volt jogilag kötelező érvényű és nem is tartalmazott konkrét vállalásokat (EEA, 2010). Erre azonban nem kellett sokat várni, ugyanis a 2015-ös párizsi konferencián (COP-21) már egy jogilag is kötelező érvényű megállapodást írtak alá a felek, amely érvényes a világ valamennyi országára nézve. A Párizsi Megállapodás többek között egy olyan cselekvési tervet takart, amely azon alapult, hogy valamennyi ország együttes hozzájárulásával a globális átlaghőmérséklet-emelkedést jelentősen 2 °C alatt, lehetőség szerint 1,5 °C alatt tartsa. Ehhez az ÜHG-k kibocsátásának legkésőbb 2030-ig 43%-kal kell csökkenniük. A megállapodás továbbá az egyes országoktól saját nemzeti hozzájárulásokat kér az ÜHG-k kibocsátásának csökkentésére, azaz ún. nemzetileg meghatározott hozzájárulásokat (*National Determined Contributions, NDC*) kell előterjeszteniük, amelyeket ráadásul öt évente frissíteni is szükséges egyre ambiciózusabb célkitűzésekkel. Így a Párizsi Megállapodás kulcsának éppen ezeket a rendszeres felülvizsgálati ciklusokat, valamint az átlátható és nyilvános közzétételeket tartották (Brosset & Maljean-Dubois, 2020; UNFCCC, é.n.-a).

Összességében a Párizsi Megállapodás egy mérföldkönek számít a globális klímaváltozás elleni küzdelemben, mivel ez volt az első olyan jogilag kötelező érvényű megállapodás, amely a világ összes nemzetét összefogta konkrét cselekvési terv keretén belül. Bár a fejlődő országok karbonsemlegességi törekvései alapvetően pozitív képet mutatnak, azonban nem képesek ellensúlyozni a népességszámban és gazdasági mutatószámokban rohamosan fejlődő ázsiai országok karbonkibocsátási ütemét. A 30. ábrán jól látható, hogy ez az arány közel 35% volt 2022-ben. Ugyanakkor, az Oxfam brit jótékonyági szervezet legfrissebb jelentése egy másik aspektust is bemutatott: elemzésük szerint 2019-ben a felső 1% (~77 millió fő) gazdasági tevékenysége volt felelős a globális CO₂-kibocsátás 16%-ért, ami megegyezik az emberiség legszegényebb 66%-nak (~5 milliárd ember) adott évi kibocsátásával. Ezért is hívják fel a figyelmet arra, hogy az éghajlatváltozással kapcsolatos intézkedések és a gazdasági folyamatok környezeti szempontú újratervezése mellett ennek az egyenlőtlenségnek a drasztikus csökkentése mentheti meg a bolygónkat, és a jövő generációinak jólétét (Khalfan et al., 2023).

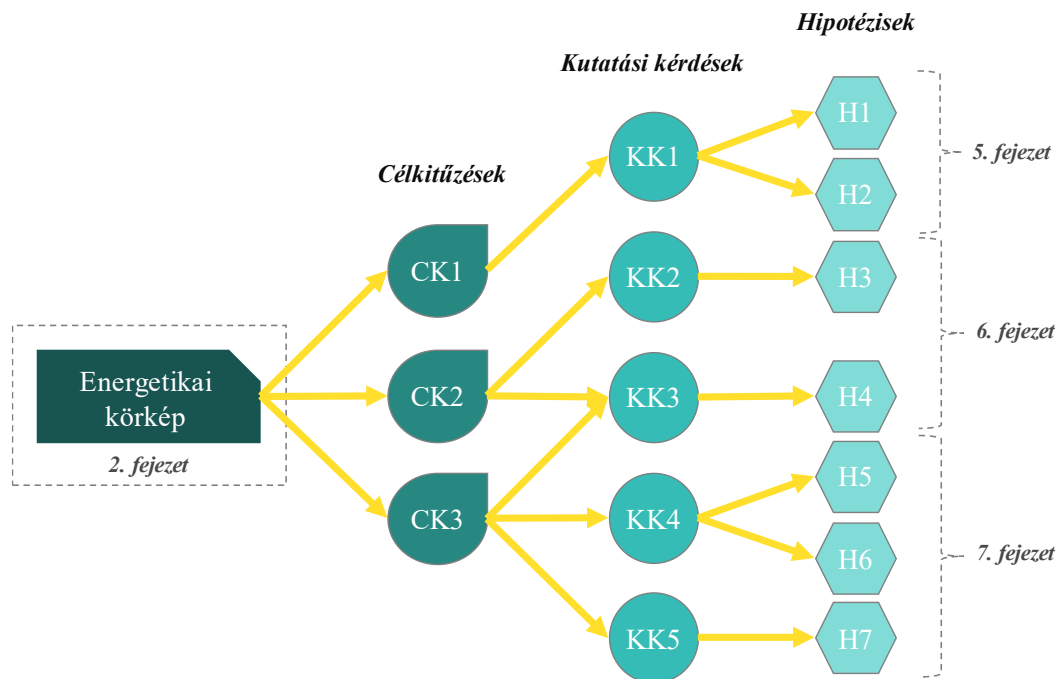
A kibocsátások megfelelő csökkentéséhez az energiaszektort karbonsemlegessé kell tenni, hiszen ez felelős a globális CO₂-kibocsátás közel 90%-áért, így ez a szektor járul hozzá leginkább az éghajlatváltozáshoz (IEA, 2019). Ez a villamosenergia-rendszer tekintetében elméletileg működhetne is, hiszen a megújuló és atomenergia kizárólagos hasznosításával el lehetne érni ezt a célt. Továbbá, maga a villamos energia, mint szekunder, illetve hasznos energia is tiszta energiahordozónak minősül. Tehát a fókusznak az energiatermelés kibocsátás-intenzitásának csökkentésén kell lennie. Végül megjegyezném, hogy amikor természeti és környezeti aspektusban értékeljük az energiarendszerek működését, gyakran korlátozzuk a hatásokat a globális felmelegedés jelenségére. Ám ehhez közvetlenül és közvetetten, illetve ettől függetlenül egyéb környezetvédelmi szempontokat is figyelembe kell venni az energiarendszer ökológiai lábnyomának korrekt megítéléséhez és összességében az ökológiai egyensúly fenntartásához. Tehát a biodiverzitás megőrzése, a légszennyezés és az ózonréteg vékonyodásának csökkentése, a vízfelhasználás és talajhasználat gesztációs periódusának figyelembevétele, az erdőirtások és a körforgásba be nem vont hulladéktermelés limitálása mind fontos szempontok az energiarendszerek, valamint tágabb értelemben véve az emberi tevékenységek okozta externáliák megítélésében.

3. Kutatási célkitűzések, kérdések és hipotézisek

Az energetikai körkép áttekintése során, amely felölelte az energetikához kapcsolódó fő fogalmi alapismereteknek, a természeti erőforrások regionális eloszlásának, az EU energiarendszerének, kiváltképp a villamosenergia-piac működésének, valamint korunk egyik, ha nem a legnagyobb kihívásának, a globális klímaváltozás elleni küzdelem körét, fogalmazódott meg a kérdés, hogyan lehet ezt a komplex és integrált energetikai rendszert jól, hatékonyan, *fenntarthatóan* kezelni, valamint hogy sikerült-e az Uniónak az elmúlt évtizedekben ezt megvalósítani. Ez az áttekintés rávilágított arra, hogy az EU energiaellátása milyen összetett dinamikákon alapul, és hogy az energiaellátás biztonsága, az energiaszolgáltatások megfizethetősége, valamint a környezeti fenntarthatóság milyen kihívásokat jelent a kontinens számára. A tudományos és technológiai ismeretek bővülése, az erőforrások földrajzi eloszlása és a klímaváltozás jelensége felhívja a figyelmet a gazdaságok energiastruktúráinak és -stratégiáinak folyamatos átalakításának szükségességére. Az energiapolitikai döntéshozók rendszerszemléletben kell, hogy gondolkodjanak, amely még viszonylag stabil makrokörnyezetben is kihívásokkal és korlátokkal teli, nem beszélve arról, ha egy sor szélsőséges esemény befolyásolja a folyamatokat. Márpedig a 21. század második évtizede világvárossal és geopolitikai konfliktusokkal, azaz multiváltságok jelensége alatt kezdődött. Egy ilyen időszaknak az energiapiacokra gyakorolt hatása is jelentős. Ilyenkor is szükséges az energiapolitikának az energetikai rendszerszemlélet gazdasági-társadalmi, természeti-környezeti, valamint műszaki-technológiai aspektusaival foglalkozni. Mindez pedig a természeti földrajz, a geopolitika, a geoökonómia és az energetika összekapcsolódásával érthető meg a leginkább.

Ez az átfogó kép és az alapvető problémakör kijelölte a további kutatási irányaimat, mely az energetikai szempontú fenntarthatóság, valamint az EU energiastratégiájának és az energiaátmenetének vizsgálatára összpontosít a közelmúltbeli multiváltságok előtti és alatti időszak viszonylatában. A dolgozatomban bemutatott kutatásom keretét és irányait szemlélteti a 33. ábra.

33. ábra A kutatás célkitűzései, kutatási kérdései és hipotézisei közötti összefüggések



Forrás: Saját készítésű ábra

A kutatás keretei között a következő három fő cél került kitűzésre:

- I. **CK1: Feltérképezem a fenntartható energiagazdálkodás, az energiatrilemma és az energiaátmenet kapcsolatrendszerét, koncepcióinak evolúcióját, valamint ezek mérhetőségi lehetőségeit.**

A téma komplex, mely elsősorban történeti és szakirodalmi áttekintést igényel, hogy feltárjam az alapvető elveket és definíciókat, az összefüggéseket, a különböző megközelítéseket és azok fejlődését térben és időben olyan mértékben és mélységben, amely szükséges a célkitűzés teljesítéséhez. Különböző nemzetközi szervezeti jelentések, dokumentációk, leírások és egyéb irodalomgyűjtések lesznek ebben a segítségemre. A célom nem pusztán összegyűjteni a releváns szakirodalmat, hanem azok rendszerezését, az alapfeltevések vizsgálatát, majd kritikus elemzését és szintézisét követően a fenntartható energiagazdálkodáshoz kapcsolódó fogalmakat, megállapításokat és összefüggéseket egy gondolati térképre felfűzve fogom levonni a következtetéseket.

II. CK2: Áttekintsem és kiértékeljem az előző pont keretén belül az Európai Unió mint egész elmúlt évtizedekbeli energiastratégiáját és -politikáját elsősorban a villamosenergia-piac kontextusában.

Az energetikai szempontú fenntarthatóság megismerése mintegy keretet nyújt majd ahhoz, hogy beazonosítsam és elemezzem az EU elmúlt évtizedekben követett energiapolitikáját, és az arra épülő energiastratégiáját, melynek központjában az energiaátmenet elősegítése állt. Ehhez legfőképpen Uniós jogszabályok, rendeletek és egyéb dokumentumok alkotják az elsődleges forrásaimat az energiapolitikát illetően, míg a kapcsolódó energiapiaci dinamikákat különféle statisztikai adatbázisokból nyert adatokra épülő helyzet- és trendelemzés jelenti. Kiemelendő, hogy a közelmúltbeli multiválságok energiapiacokat érintő hatásait kiváltképp fontos elemezni.

III. CK3: Végezetül célom, hogy mindezen történeti és regulációs ismeretek energiapiaci hatásait empirikus úton, leíró és következtetési statisztikai módszerekkel alátámasszam.

Fontos az elméleti részek gyakorlati szempontú vizsgálata is, amely a kutatási témából következően különféle statisztikai eljárások alkalmazását jelenti. Ezzel érthetőbbé és megfoghatóbbá válik a történeti és jogszabályi áttekintés, ha bemutatásra kerülnek kapcsolódó kvantitatív jellemzők is, analitikus vagy grafikus úton. A kör azonban nem szűkül le e dolgozatban a tradicionális leíró jellegű statisztikai elemzésre; az empirikus kutatásaim kiterjednek többváltozós következtetési statisztikai technikák használatára is, melyek kapcsolati összefüggéseket hivatottak feltárni, avagy idősorelemzést tesznek lehetővé.

A célkitűzéseimhez az alábbi konkrét kutatási kérdések és kapcsolódó hipotézisek fogalmazódtak meg:

- 1. Kutatási kérdés (KK1): Mi a közös pont az energiatrilemma, az energiaátmenet és a fenntartható energiagazdálkodás között?**
 - **Hipotézis (H1):** Az energiatrilemma koncepcióban az ellátásbiztonság, az energia egyenlőség és környezeti fenntarthatóság egyformán hangsúlyos.
 - **Hipotézis (H2):** Az energiaátmenetre támaszkodva megvalósulhat az energiatrilemma egyensúlya.

- 2. Kutatási kérdés (KK2): Párhuzamba hozható-e az energiatrilemma valamely dimenziójának előnybe részesítése a különböző uniós energiapolitikai döntéshozatalokkal?**
- **Hipotézis (H3):** Az EU energiapolitikai irányainak fő fókusza 1951 és 2021 közötti években az energiaellátás biztonságától eltolódott a versenyképesség, majd pedig a környezeti szempontok felé.
- 3. Kutatási kérdés (KK3): Az EU-s klímasegesség hosszú távú célkitűzéseit mennyiben írják felül az ellátásbiztonság rövid- és középtávon megoldandó kihívásai? Vagy megfordítva a kérdést: az energiabiztonság iránti igény megpróbáltatást jelent-e a karbonsemelegességre való törekvésben?**
- **Hipotézis (H4):** A közelmúltbeli geopolitikai feszültségek teljesen átrendezték a prioritási sorrendet, amely miatt az energiaátmenet fontossága a háttérbe került.
- 4. Kutatási kérdés (KK4): Mely energiahordozók piaci árai és egyéb tényezők befolyásolják statisztikailag szignifikánsan a nagykereskedelmi villamosenergia-árak alakulását a multiválságok hatásai figyelembevételének függvényében?**
- **Hipotézis (H5):** A megújuló energiák aránya a villamosenergia-termelésben minden esetben erős és ellentétes irányú szignifikáns kapcsolatot mutat a nagykereskedelmi villamosenergia-árakkal.
 - **Hipotézis (H6):** A nagykereskedelmi villamosenergia-árak várhatóan kevésbé csökkennek a multiválságokkal is terhelt időszakban, ha a megújuló energiákból előállított villamos energia mértéke egy egységgel nő ceteris paribus a multiválságok felfutása előtti időszakhoz képest, míg a földgázárak viselkedése esetében ennek éppen ellenkezője igaz.
- 5. Kutatási kérdés (KK5): Gyengültek-e a különféle hagyományos statisztikai modellek előrejelző képességei az energiaválság következtében?**
- **Hipotézis (H7):** Az energiaválság időszakára vonatkozó statisztikai becslések pontatlanabbak, mint az azt megelőző idősakra végzett előrejelzések, ugyanakkor a többváltozós modellek az energiaválság előtti és alatti vizsgált időszakok esetében is pontosabbnak bizonyulnak az egyváltozós társaiknál.

Ezen felsorolt lényegi kutatási kérdések mellett még számtalan kérdés övezte utamat a fenntarthatóság, illetve az uniós energiapolitika és -stratégia feltárása során, mely tovább segítette a megfelelő nézőpontok és megközelítések beépítését a dolgozatomba.

4. Kutatási módszertan

A kutatási célkitűzések, valamint a konkrétan megfogalmazott kutatási kérdések és hipotézisek alapvetően meghatározzák a kutatásom irányát, mely egyaránt tartalmazott felderítő és specifikus kutatási elemeket, valamint *kvalitatív és kvantitatív jellegű* kutatást az adott vizsgálati terület / kutatási kérdés / hipotézis-bizonyítás függvényében.

A kutatási téma kiterjedtsége és mélysége miatt első körben fontosnak tartom lehatárolni a dolgozatom térbeli, időbeli és tematikai kereteit. A vizsgálatom *térbeli* sajátosságait tekintve, alapvetően két síkon mozog – globális és regionális (EU-s) vonatkozásban. A globális vizsgálódások elsősorban a fenntarthatóság, illetve annak energetikai perspektívájának megismeréséhez járulnak hozzá, hiszen e koncepciók történeti fejlődésének keretei nem korlátozódnak le csak bizonyos földrajzi területekre. Emellett néhány energiapiaci statikus és dinamikus állapotot (pl. természeti erőforrások eloszlása, primer energiaigények, fenntartható fejlődési célok státusza, megújuló energián alapuló energiatermelés stb.) szükségesnek tartottam bemutatni globális kontextusban is, elhelyezve ezzel az Unió helyzetét a világ főbb nagyhatalmai között. A fő fókuszom azonban egyértelműen a regionális európai, pontosabban Uniós földrajzi adottságokra, energiapolitikai döntésekre, gazdasági eseményekre és stratégiai fejleményekre irányul. Amikor az EU-ról általánosságban beszélek, úgy alapvetően a 2020-as évektől értendő (Brexit utáni) EU 27 tagországának aggregált eredményeit veszem figyelembe, kivéve olyan esetekben, ahol valamely tagállamhoz kapcsolódó adat és információ nem, vagy csak limitáltan érhető el (ezek egyértelműen jelölésre kerültek a releváns kontextusban).

A kutatásom *időbeli* aspektusát tekintve úgy is fogalmazhatnánk, hogy ahogy az elemzésem az adott kiinduló ponttól előrefele halad az időtengelyen, közeledve a közelmúltbeli események felé, úgy kapnak egyre nagyobb hangsúlyt az energetikát érintő események, fejlemények és piaci következmények vizsgálatai. Kiváltképp kardinális a 2020-as évek eleje, vagyis a multiváltságok energiapiaci hatásainak elemzése. Ugyanakkor nem mehetek el mellett sem, hogy van olyan kutatási kérdés és kapcsolódó hipotézis állítás (KK2-H3), mely igényli a teljeskörű történeti elemzést és kiértékelést. Következésképpen, az EU energiastratégiájának átfogó értelmezéséhez szükséges az 1900-as évek eseményeit is bemutatni, amellet, hogy az energiapiaci folyamatok számszaki elemzése a 2000-es évektől lesz számomra meghatározó. Tehát míg az energetikai fenntarthatóság koncepció evolúciójának bemutatása nincs szigorúan véve időbeli korlátokhoz kötve, addig az EU-t érintő energiagazdasági vizsgálati szempontok alapvetően az elmúlt két évtizedre fókuszálnak, de limitáltan visszanyúlnak az évezredforduló

előtti események tanulmányozásáig is. A dolgozat legtöbb esetben egészen a 2023-as év harmadik negyedévéig, tehát 2023. szeptember végéig veszi figyelembe a gazdasági és politikai eseményeket.

Végezetül, a térbeli és időbeli kiterjedtség mellett szükségesnek tartom a vizsgálatom *tárgykörének* behatárolását is. Az EU energiarendszere egy rendkívül komplex és integrált rendszert képez, amelyben a szén-, olaj-, gáz-, és villamosenergia-piac külön-külön is energiapiacokat, kritikus infrastruktúrákat és egyedi szabályozási kereteket jelentenek, melyek befolyásolják a primer és szekunder energiahordozók kínálatát, keresletét, árazását és kereskedelmét az unión belül. Ezek végső soron összekapcsolódnak az energiaellátás szempontjából és dinamikus hatással vannak egymás működésére is. A dolgozat keretén belül a fókusz az EU villamosenergia-piacán lesz, ebben a vetületben kerülnek részletesen bemutatásra jogszabályi változások, energiapiaci hatások, statikus és dinamikus mutatók. Ezt a célt szolgálta az is, hogy a villamos energia mint szekunder energiahordozó fizikai-fogalmi háttere, valamint a villamosenergia-piac működése külön áttekintést kapott a szükséges mélységben az energetikai körkép fejezetben. Fontos kiemelni, hogy éppen az energiarendszer összetettsége és egymásba való beágyazottsága miatt a többi energiapiac jellege is érintésre került, és a későbbiekben azok alkotóelemei és mutatói (pl. földgázimport mértékének vagy a fosszilis energiahordozók piaci árának alakulása) az összefüggések feltárásának szerves részét fogják képezni.

Mindezeket egybevéve körvonalazódik az is, hogy mi nem képezi részét a jelen dolgozatnak. Nem célom tehát az EU-n belüli lokális, azaz országspecifikus energetikai vizsgálódás, a 2000-es évek előtti, illetve a 2023. szeptember utáni energiapiaci események részletes bemutatása, a fosszilis tüzelőanyagok és a nukleáris hasadóanyagok piacainak mélyreható elemzése. Továbbá nem szándékozok szubjektív jellegű kijelentéseket tenni az EU valamely energiapolitikai döntéshozatalának következményeiről; célom az objektív megközelítésen alapuló elemzés.

A vizsgált téma jellegéből adódóan alapvetően *szekunder adatgyűjtés*re építhetem, így az ebből származó adatok és információk a dolgozatom teoretikus és empirikus eredményeinek forrásaiként szolgálnak. A kutatásomhoz használt változatos és eredményorientált kutatási módszertanhoz különféle adat- és információigény párosult:

- ❖ Egyrészt *kvalitatív jellegű kutatást* végeztem, amelybe közvetlenül az energetikai fenntarthatóság, illetve az EU energiapolitikája, míg közvetetten gyakorlatilag valamennyi vizsgált részterület kapcsolódik. Munkámhoz elméleti keretet adtak többek között olyan szerzők munkásságai, mint pl. Daniel Yergin, Vaclav Smil,

Kaposi Zoltán, Munkácsy Béla, Szilágyi István, Vajda György, akik nemzetközi viszonylatban is rendkívül járatosak a fenntartható energiagazdálkodás / energiapolitika / geopolitika területén. Így jelentős mennyiségű tudományos és szakmai folyóiratokban megjelent publikációk, könyvek, tankönyvek, monográfiák segítettek megérteni a kutatási témát szélesebb tudományos és szakmai kontextusban. Emellett kormányzati szervek, nemzetközi intézmények, kutatóintézetek, valamint tanácsadó cégek által közzétett szakmai jelentések, munkadokumentumok, tanulmányok, kiadványok, elemzések és ajánlások, konferencia-kiadványok nyújtottak segítséget a célkitűzések elérésében. Ezek közül kiemelném az ENSZ, IEA, IRENA, World Energy Council (WEC), EC, Energy Institute és BP intézmények és vállalatok jelentőségét. Továbbá egyéb online szakmai forrásokból és sajtómegfigyelésekből is tudtam meríteni a kutatásom során;

- ❖ A dolgozatom másik vetületét képező, számszaki adatokra épülő *kvantitatív kutatásom* alapvetően online és részben előfizetéses nemzetközi statisztikai adatbázisokból, illetve platformokból összegyűjtött adatokra épült. Ezek közül kiemelném az Eurostat, IEA, Energy Institute és EMBER Climate adatbázisait, melyek magas színvonalú és megbízható energiapiaci adatforrásként szolgáltak. Sajnos az internetes közegben ma már rengeteg pontatlan, torz vagy egyszerűen csak hamis adat kerül közzétételre, melyek validálhatósága nem lehetséges és szignifikánsan negatív hatással lehetnek egy empirikus kutatás lefolytatására. Ezért elsődleges fontosságúnak tartottam, hogy maximális körültekintéssel járjak el az adatok összegyűjtése, előkészítése és felhasználása során.

Emellett *primer adatforrásokat* is felhasználtam, mint például a nemzetközi és hazai jogszabályok és rendeletek áttekintése.

Az adatgyűjtés a kutatás időbeli síkjának megfelelően, 2023. harmadik negyedév végéig tartott. Az összegyűjtött és előkészített adatokat többféleképpen hasznosítottam. Egyrészt számos helyen *leíró statisztikai módszertant* alkalmaztam, mely segített a vizsgált adatok struktúrájának, mintázatának és tendenciáinak statikus és dinamikus értelmezésében, kiinduló pontot jelentett a komplexebb elemzésekhez, valamint alapvető eszközként szolgált az adatok vizualizálásához. A mennyiségi kutatásom másik részét *következtetési statisztikai eljárások* képezték, ideértve a kapcsolati rendszerek összefüggéseit vizsgáló többváltozós korrelációs és regressziós számításokat, valamint a komplexebb idősorelemzéseket is. Az ilyen jellegű alkalmazott statisztikai technikák körét, valamint a kapcsolódó adatforrások bemutatását a következő alfejezet részletezi.

Az empirikus kutatásom statisztikai jellegű vizsgálatainál Microsoft Excel-t, egy ehhez kapcsolódó piacvezető adatelemző és statisztikai megoldásokat nyújtó, a Lumivero által forgalmazott XLSTAT kiegészítő szoftvert, valamint az IBM SPSS Statistics 27 statisztikai szoftverét alkalmaztam.

4.1. A villamosenergia-árak vizsgálatához használt statisztikai eszköztár

A kutatási célkitűzések lefedésének egy részéhez a diskurzuselemzéshez kapcsolódóan leíró statisztikai elemzést végeztem. Ugyanakkor, az 4. és 5. kutatási kérdések megválaszolása, valamint az 5-7. hipotézisek alátámasztása már más megközelítést igényelt, nevezetesen a következtetési statisztika eszköztárának alkalmazását. Ugyanakkor, a két különböző empirikus kutatás eltérő célokat kíván elérni, ebből fakadóan különböző következtetési statisztikai módszertan alkalmazása szükséges e kvantitatív kutatások lefolytatásához.

Az 4. kutatási kérdés, mely arra keresi a választ, hogy milyen jellegű kapcsolat van a villamosenergia-árak, valamint a különböző energiahordozók tőzsdei árai és egyéb választott energia indikátorok között különböző időhorizontok alkalmazása során, olyan statisztikai módszertant igényel, amely képes feltárni ezen változók közötti asszociációs kapcsolat jellegét, és alkalmas az eredmények összehasonlíthatóságára. Következésképpen, idősoros adatokon alapuló többváltozós korreláció- és regressziószámítást végeztem a céljaimnak megfelelően.

Az 5. kutatási kérdés keretén belül arra keresem a választ, hogy statisztikai módon alátámasztható-e az a feltételezés, hogy az energiaválság befolyásolta az áramárak előrejelzési modelljeinek pontosságát, továbbá igaz-e, hogy a többváltozós modellek a válságokkal terhelt időszakokra vonatkozólag is pontosabb becslést képesek nyújtani, mint az egyváltozós társaik. Ez a vizsgálati cél sztochasztikus idősorelemzési módszerek felhasználását és összehasonlítását kívánja meg.

Az idősoros előrejelzési és modellezési eszköztár jelentősen fejlődött az elmúlt évtizedekben – az összegyűjtött és rendszerezett módszerek megtalálhatóak a Függelék *F6. ábráján*. A hagyományos statisztikai módszerektől az innovatív gépi és mélytanulási modellek fejlődéséig különböző technikák szolgálhatják az idősor-előrejelzés célját. Az idősorelemzés azonban nem csupán egy adott időszak előrejelzéséről szól, hanem annál több – egy adott változó jövőbeli értékeire való becsléskísérlet annak múltbeli adatai alapján. Az előrejelzési technikákon kívül dinamikus modellezés is ebbe a körbe tartozik, mivel az idősorelemzés a komplex rendszerek időbeli viselkedésének megértésével és szimulálásával foglalkozik

gyakran több, egymással kölcsönhatásban álló változót bevonva a modellezési folyamatba. Továbbá a dekompozíciós módszerek az idősorok alapvető összetevőire (trend, szezonális és reziduálisok) való bontását szolgálják, míg a legjobb magyarázó változók kiválasztása az előrejelző modell számára legfontosabb paraméterek azonosításával foglalkozik. Végezetül az optimalizálási technikák az előrejelzési modelleken belül a legjobb illeszkedés vagy paraméterek megtalálására összpontosítanak.

Ebben a felsorolásban szereplő modellezési eljárások közül a 4. kutatási kérdés céljával összhangban hagyományos statisztikai modellekre támaszkodtam, azon belül is többváltozós lineáris regressziós modelleket, egy- és többváltozós autoregresszív modelleket, valamint exponenciális simítást alkalmaztam.

Habár a vizsgálatoknál alkalmazott statisztikai eljárások különbözőek, azonban az elemzések alapjául szolgáló idősoros adatok típusai megegyeznek. Ez lehetővé teszi, hogy a két különálló empirikus kutatást egy gondolati térképre fűzhessem fel. Az első körben felhasznált változók körét az 2.3. alfejezetben bemutatott villamosenergia-piac működéséből, valamint az áramárakat befolyásoló főbb tényezők behatárolásából levont konklúziók alapján határoztam meg, melyek a következő alfejezetben kerülnek konkrétan ismertetésre. Ugyanakkor, az illeszkedésvizsgálat és a modellek finomítása következtében nem mindegyik felsorolt változó járult hozzá a végső modellek bemutatásához, interpretálásához.

Ezen felhasznált adatok köre területi szempontból mindkét vizsgálat során az EU-27-re korlátozódott le, ahol ez a kérdés releváns volt. Továbbá, az időhorizontokat tekintve, mindkét idősor havi átlagár adatokból épült fel, valamint egységesen 2015. januárja volt a vizsgálati időtávba bevont első hónap. Ezzel szemben az időintervallumok utolsó megfigyelései, valamint az összehasonlítást szolgáló időhorizont szeparálások dátumai eltérnek egymástól, ahogy az a következőkben ismertetésre kerül. A következő alfejezetben részletezett statisztikai módszertani áttekintés Domán (2005), Harrell (2015), Heij et al. (2004), Hyndman és Athanasopoulos (2018), Kerékgyártó et al. (2009), Neusser (2016) és Pintér és Rappai (2007) munkáin alapulnak.

4.1.1. Az empirikus kutatásokban felhasznált adatok köre

A gyakorlati vizsgálatokhoz a 9. táblázat tartalmazza a kiválasztott változókat, azok mértékegységeit és az adatok forrását.

9. táblázat Az empirikus vizsgálatokban használt változók köre

Rövidítés	Leírás	Mértékegység	Forrás
EP	Nagykereskedelmi villamosenergia-ár	EUR/MWh	EMBER
NEG	Nettó áramtermelés	TWh	IEA
RES-E	Megújulókból származó bruttó energiatermelés	%	IEA
TTF	ICE TTF határidős gázár	EUR/MWh	Invensting.com
BRENT	ICE Brent határidős olajár	USD/bbl	Refinitiv Eikon
NEWC	ICE Newcastle határidős szénár	USD/t	Invensting.com
EUA	EU ETS szén-dioxid kvóta ár	EUR/t	Invensting.com

Forrás: Saját összeállítás

A nagykereskedelmi áramárakat (EP) mint eredményváltozót az EMBER Climate (é.n.-b) adatbázisából nyertem ki. Ebben az adatbázisban az EP az európai országok nagykereskedelmi, másnapi villamosenergia-árait jelöli, amelyeket az ENTSO-e riportál. Tehát ezen országspecifikus áramárak az energiatermelőknek fizetett napi árak, amelyek egyrészt havi szinten, másrészt pedig tervezetten az EU-27 országára leszűkítve kerültek átlagolásra. Ugyanakkor, az uniós szintű elérhető adatok köre korlátozott volt azon ajánlattételi zónák esetében, amelyek még nem vezettek be villamosenergia-tőzsdét, ilyen volt például Málta és Ciprus esetében a helyzet. Ezért ezekből a szigetországokból nem állt rendelkezésre nagykereskedelmi áramár, amelyet be tudtunk volna építeni az adatállományunkba. Ennek eredményeképpen a havi átlagos nagykereskedelmi áramárakat 25 EU-tagállamra vonatkozóan számoltam ki.

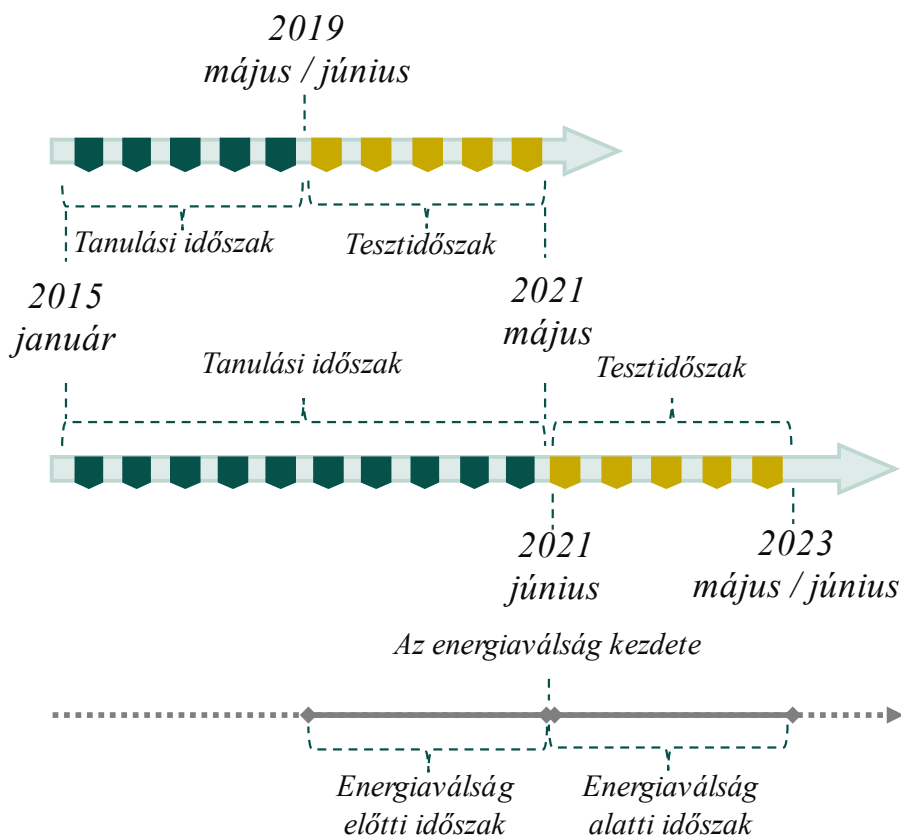
A nettó villamosenergia-termelés (NEG) és a megújuló energiákból származó bruttó energiatermelés (RES-E) az IEA (é.n.-c) adatbázisából származik, közvetlenül havi átlagértékekben és szintén országspecifikusan lekérve. A fenti megállapítás következményévé összhangban a villamosenergia-termelésre vonatkozó átlagolt adatsorok sem tartalmaznak Málta- és Ciprus-specifikus adatokat.

A többi potenciális magyarázóváltozó az Intercontinental Exchange (ICE) nemzetközi pénzügyi- és árupiaci tőzsdén jegyzett energiahordozók (TTF, BRENT, NEWC) határidős árait, valamint az EU ETS szén-dioxid kvótaárait (EUA) jelentik. Ezen napi szinten jegyzett idősoros adatok köréhez az Investing.com (é.n.) platformon, valamint a Refinitiv Eikon (é.n.) adatbázisán keresztül jutottam hozzá, melyeket szintén havi átlagára számoltam át. Azért ezekre az energiahordozó terméktípusokra esett a választásom, mert ezek a legfontosabb fosszilis tüzelőanyag benchmark termékek európai viszonylatban, így reprezentatív erővel bírnak.

Az energiapiaci összefüggéseket vizsgáló elemzés során mindezen havi átlagolt adatokat két időszakra vetítve használtam fel, az eltérés a végdátumok megválasztásából ered. Az első adatkészlet esetében a célom a multiválság extrém energiapiaci hatásai előtti időszak modellezése volt, tehát a 2015. január - 2020. december közötti időszakot ölelte fel (*a multiválságok felfutása előtti időszak*). Ez ugyan már tartalmaz COVID-19 világjárvány által sújtott időszakot, de a jelentős energiapiaci hatások csak a 2021-es évben bontakoztak ki, ahogy az a későbbiekben elemzésre is kerül majd. Ebben a kutatásban tehát energiapiaci szempontból úgyszólván nyugalmi időszaknak nevezhetjük ezt a hat évet (72 megfigyelési egységet). Ehhez képest viszont a második adatkészlet már a 2015. január - 2023. augusztus közötti időintervallumot öleli fel, melynek utolsó éveit már jelentősen befolyásolták a multiválságok (*a multiválságokkal terhelt (teljes) időszak*). Ez a kibővített, nyugalmi időszakokkal és válságokkal egyaránt terhelt időszak alapján készült modell (mely így összesen 104 megfigyelést tartalmaz) kerül összehasonlításra az első adatkészlettel a kapcsolati rendszer összefüggéseinek megértése céljából. Elemzésemben a kibővített időszak azért végződött a 2023. augusztusi megfigyeléssel, mivel ez volt a legutolsó olyan hónap, amelyre vonatkozóan megbízható és átfogó adatok álltak rendelkezésre a kapcsolódó publikációm készítésekor, tehát nincs feltétlenül összefüggésben a multiválság elméleti végével.

Az áramár előrejelzési modellek az időszorelemzés módszertanából adódóan több kisebb időszakra kellett bontani a vizsgált teljes historikus időszakot, amely 2015. januárjától 2023. májusáig terjedt. Ahogy azt a 34. ábra is mutatja, az összehasonlítás céljából kettéválasztott historikus időszak töréspontjának 2021. május lett választva, melynek oka, hogy az energiaválság okozta explicit energiaár növekedés kezdete ekkora tehető – erről bővebben az elemzés során fogok írni. A dátum megválasztásától kezdődően beszélhetünk *energiaválság előtti* (2015. január - 2021. május) és *energiaválság alatti* (2021. június - 2023. május) *időszakról* a vizsgált teljes historikus időszak keretén belül. E két időtartományt további két-két részre szükséges bontani az előrejelzési modellek sajátosságaiból fakadóan, ugyanis ahogy – Hyndman és Athanasopoulos (2018) is rámutat –, gyakori hiba szokott lenni, hogy a becslés pontosságának megítélésénél arra hagyatkozunk, hogy az idősor mennyire jól illeszkedik a historikus adatokhoz. Ezzel szemben a pontossági mérőszámokat olyan historikus adatokon szükséges kiszámítani, amelyek közvetlenül nem vettek részt a modellépítésben. Ennélfogva megkülönböztetünk tanulási és teszt időszakot, ahol tehát a teszt időszak idősorát a modell szempontjából nem ismert megfigyelésként kezeljük, és erre vonatkoztatjuk a pontossági mérőszámok eredményeit. A kettő időszak közötti arány minimum 80-20% kell, hogy legyen, a tanulási időszak javára.

34. ábra Az előrejelzési modellekhez kapcsolódó időhorizont koncepció a pontos időszakok megjelölésével



Forrás: Saját készítésű ábra

A historikus megfigyelések így céltudatosan lettek szétválasztva, illetve kerültek összehasonlításra.

4.1.2. Statisztikai tesztek a stacionaritás vizsgálatára

Az idősoros adatok kiválasztása után meg kell győződnünk arról, hogy azok stacioner idősoroknak minősülnek-e (Azam et al., 2020; Heij et al., 2004; Hyndman & Athanasopoulos, 2018; Kerékgyártó et al., 2009; Neusser, 2016; Pintér & Rappai, 2007). Egy idősor stacioner, ha statisztikai tulajdonságai (mint például az átlaga, a varianciája és az autokorreláció) időben állandóak, tehát hosszú távon stabil viselkedést mutat. Ezzel szemben a nem stacioner idősoroknak időben változó tulajdonságaik vannak – tehát például trendet, szezonalitást vagy heteroszkedaszticitást – mutatnak, amelyek befolyásolhatják az elemzés pontosságát és az előrejelzések megbízhatóságát. Ennek tesztelése alapvető fontosságú az idősoros adatok elemzésénél, mivel a legtöbb módszer feltételezi, hogy az adott idősor stacioner. A stacioner

állapot eléréséhez számos adattranzformáció alkalmazható, például vesszük az adatsorok természetes alapú logaritmusát, vagy differenciálást, késleltetést, Box-Cox tranzformációt alkalmazunk.

Az adatelőkészítést követően az idősorok stacionaritásának vizsgálata a következő lépés. Ezt a vizsgálatot vizuális elemzés és statisztikai tesztek segítségével végezhetjük el. Ha az idősorok vizualizációját követően úgy ítéljük meg, hogy szükség van az adatok tranzformációjára, ezt követően ismételt el kell végezni a stacionaritás tesztjét. A stacionaritás statisztikai vizsgálatára többféle teszt áll rendelkezésre, mint például az Augmented Dickey-Fuller (ADF), a Phillips-Perron (PP), és a Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS) tesztek.

A Dickey-Fuller teszt alapvetően egy olyan statisztikai eljárás, amely autoregresszív modell segítségével elemzi az idősor adatait. Ez a modell arra keresi a választ, hogy milyen mértékben határozza meg egy időpont korábbi értéke a következő időpont értékét. Amennyiben ez a kapcsolat statisztikailag nem jelentős, azaz alacsonyabb egy bizonyos kritikus értéknél, úgy következtethetünk az "egységgyök" jelenlétére az idősorban. Ez azt jelenti, hogy az idősor nem rendelkezik állandó, időben konzisztensen megfigyelhető mintázattal, tehát nem tekinthető stacionáriusnak. Az ADF teszt egy fejlettebb változata a Dickey-Fuller tesztnek, amely több késleltetést is figyelembe vesz, lehetővé téve az autokorreláció hatásainak korrekcióját. Ezáltal az ADF teszt sokkal rugalmasabb és általánosabban alkalmazható, különösen olyan idősorok esetében, amelyek erőteljes autokorrelációt mutatnak. A PP teszt egy alternatív nemparaméteres megközelítés, amely a Dickey-Fuller statisztikákat adaptálja az autokorreláció és a heteroszkedaszticitás figyelembevételére, vagyis arra, hogy a reziduumok nem függetlenek egymástól időben, illetve a szórásaik is változnak az idő függvényében. Mindkét teszt alapfeltételezése, hogy az idősor nem stacionárius (azaz vannak egységgyökök). Ezzel szemben a KPSS teszt alapfeltételezése, hogy az idősor stacionárius egy determinisztikus trend körül. Belátható, hogy ellentétes nullhipotéziseik miatt az (A)DF/PP és a KPSS tesztek egymást kiegészítve használhatók, és az alábbi következtetések vonhatóak le az eredményüket illetően:

- ❖ Ha mind az ADF (vagy PP), mind a KPSS tesztek eredményei stacionaritásra utalnak, akkor a sorozat valószínűleg stacionárius;
- ❖ Ha az ADF (vagy a PP) teszt stacionaritást jelez, míg ezt a KPSS teszt eredménye ezt nem támasztja alá, úgy az idősor valószínűleg differencia-stacionáriusnak minősül;
- ❖ Fordított esetben, ha az ADF (vagy a PP) teszt jelez nem stacioner idősort, míg a KPSS teszt eredményéből stacioner idősorra lehet következtetni, úgy az adatsor valószínűleg trend-stacionárius;

- ❖ Végezetül, ha mindegyik stacionaritási és egységgyök teszt nem stacionaritást eredményez, akkor az idősor valószínűleg tényleg nem stacioner.

Tehát ezek a tesztek hipotézisvizsgálatra építkeznek. Általánosságba véve, egy hipotézisvizsgálat során a nullhipotézis elutasításáról vagy el nem utasításáról szóló döntés a szignifikancia érték (p-érték) vagy a kritikus érték alapján születik. A p-érték azt fejezi ki, hogy a nullhipotézist igaznak feltételezve mekkora a valószínűsége annak, hogy a megfigyelt vagy annál szélsőségesebb statisztikai eredményt kapunk. Az ez alapján történő döntéshozatalnál a p-értéket egy előre meghatározott szignifikancia-szinttel (alfa, amelyet gyakran 5%-ban határozzunk meg, ami 95%-os megbízhatósági szintet jelent) kell összevetni:

- ❖ Amennyiben a p-érték kisebb vagy egyenlő a választott szignifikancia-szintnél ($p \leq \alpha$), a nullhipotézist el kell vetni az alternatív hipotézis javára, ami arra utal, hogy az eredmény statisztikailag szignifikáns;
- ❖ Abban az esetben, ha a p-érték meghaladja az alfa-értéket ($p > \alpha$), a nullhipotézis nem utasítható el, ami azt jelenti, hogy az eredmény statisztikailag nem szignifikáns.

A kritikus érték megközelítésben a nullhipotézis elvetésének az alapja a tesztstatisztika összehasonlítása a kritikus értékkel, melynek meghatározása a választott szignifikancia-szint és a tesztstatisztika eloszlásának figyelembevételével történik:

- ❖ A nullhipotézist akkor utasítjuk el, ha a tesztstatisztika a kritikus tartományban van, tehát meghaladja a kritikus értéket;
- ❖ A nullhipotézist nem utasítjuk el, ha a tesztstatisztika a kritikus területen kívülre esik.

Tehát mindkét döntési eljárás használatos a hipotézisvizsgálat során, függetlenül attól, hogy stacionaritás vizsgálatot vagy regressziós paraméterbecslést végzünk, ugyanakkor mindkét empirikus kutatásom során a p-érték alapú döntéshozatalra támaszkodtam.

4.1.3. A többváltozós korreláció- és regressziószámítás alapjai

A **korrelációelemzés** egy olyan statisztikai módszer, amelyet két változó közötti lineáris kapcsolat erősségének és irányának felmérésére használhatunk (Heij et al., 2004; Kerékgyártó et al., 2009; Pintér & Rappai, 2007). Ez egy viszonylag gyors és egyszerű megoldást nyújthat a változópárok közötti lineáris kapcsolat értékelésére, amely hozzájárul annak megértéséhez, hogy mely változók lehetnek statisztikailag szignifikánsan jó regresszorok egy lineáris regressziós modellben. Tehát a korrelációanalízis előkészítheti a terepet a regressziós modell paramétereinek kiválasztásához.

A változók közötti kapcsolat vizsgálható kétváltozós, parciális vagy többváltozós korreláció elvégzésével is. A kétváltozós korrelációelemzés, úgymint a Pearson-féle korrelációs számítás a legegyszerűbb módszerek közé tartozik, amely két folytonos változó közötti statisztikai kapcsolatot vizsgál meg irányuk és erősségük szempontjából. A kapott érték -1 és +1 között mozog, ahol mindkét szélsőérték függvényeszerű negatív, illetve pozitív lineáris kapcsolatot jelent, míg ha nulla a kapott eredmény, akkor a változók között nincs lineáris kapcsolat. A nullához közelebbi értékek gyengébb, míg ellenkező esetben erősebb lineáris kapcsolatot jeleznek. A Pearson-féle korrelációs együttható képlete a következő:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

ahol x és y a változók, x_i és y_i a változók adott megfigyelései, \bar{x} és \bar{y} a minták átlagai, míg n a minta mérete.

A hipotézisvizsgálat (t-próba) elvégzésével és a p-érték kiértékelésével meghatározható, hogy a korreláció statisztikailag szignifikáns-e. A nullhipotézis annak az állítása, hogy a két vizsgált változó között nincs lineáris kapcsolat.

A korrelációs koefficiens négyzete nem más, mint a determinációs együttható, amelynek értéke azt mutatja meg, hogy az adott modell mennyire jól magyarázza és reprodukálja a megfigyelt eredményeket (minél magasabb ez az érték, annál jobb a modell magyarázóereje).

A kétváltozós korrelációelemzés eredményéből fontos következtetést tudunk jutni a független és egy adott függő változó közötti lineáris kapcsolat erősségét illetően, de anélkül, hogy a többi függő változónak (ha van ilyen) az adott kapcsolatra gyakorolt hatását kiszűrnénk. Ha ez a cél, akkor a parciális korrelációelemzést kell használni, mivel ez a két változó közötti kapcsolat mértékét úgy vizsgálja, hogy közben a többi változó hatását kontrollálja. Ebből a célból az előző egyenletben szereplő x és y közötti korreláció kiigazításra kerül az ezek és az egyéb változók (z) közötti lineáris kapcsolattal, ha releváns:

$$r_{xy|z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)(1 - r_{yz}^2)}} \quad (2)$$

ahol x , y és z a változók, $r_{xy|z}$ az x és y közötti részleges korreláció miközben z kontrollálva van, valamint r_{xy} az x és y közötti korrelációs együttható, a többi pár (r_{xz} , r_{yz}) esetében analóg módon.

Több változó kontrollálása esetén azonban a számítás bonyolultabbá válik, melyhez jellemzően mátrixalgebrát alkalmazhatunk, ami azt jelenti, hogy a változók kovariancia-

mátrixának inverzére van szükség. A gyakorlatban ezeket a számításokat általában statisztikai szoftverek segítségével végezhetjük el.

A kétváltozós korrelációanalízishez hasonlóan parciális korrelációelemzésnél is t-próbát használunk annak megállapítására, hogy a feltárt kapcsolat szignifikánsnak minősül el. Ebben az esetben a nullhipotézis azt állítja, hogy a két vizsgált változó között nincs lineáris kapcsolat a kontrollált változók hatásainak figyelembevétele közben.

A parciális korrelációs együttható (és a parciális determinációs együttható) értelmezése hasonló a Pearson-féle korrelációs együtthatóhoz. Ez különösen hasznos többszörös regressziós összefüggésekben, ahol az egyes változópárok közötti egyedi kapcsolatot a modellben szereplő többi változótól függetlenül kell értékelni. Ugyanakkor a parciális korreláció nem nyújt információt arról, hogy az adott változó mennyit változik egy másik változásának függvényében, és nem is feltételez ok-okozati összefüggést; csak szimplán az összefüggés erősségét méri.

A korrelációs elemzéseknek van egy harmadik változata is, amelyet többszörös korrelációanalízisnek hívunk, ahol a korrelációs számítás egyszerre több mint két változó közötti lineáris kapcsolat elemzését jelenti többváltozós lineáris regresszió kontextusban. Következésképpen, ennek bemutatása már átível a regressziós modellek ismertetéséhez.

Összességében tehát a korrelációelemzés a regressziós modellezést megelőző diagnosztikai eszközként szolgál. A függő változóval erősen korreláló változók beazonosításával megalapozottabb döntést lehet hozni arról, hogy mely változókat kell valószínűleg bevonni a regressziós modellbe.

A **regressziószámítás** során az eredményváltozó (függő változó) és egy vagy több magyarázóváltozó (független változó) közötti kapcsolat kerül elemzésre (Filipiak & Wyszowska, 2022; Harrell, 2015; Heij et al., 2004; Hyndman & Athanasopoulos, 2018; Neusser, 2016; Pintér & Rappai, 2007). Ezek a független változók exogének, mérhetőek és nem véletlenszerűek, valamint a függő változó változékonyságának magyarázatára szolgálnak. Ha egynél több független változó van a modellben, akkor többszörös regresszióanalízisről beszélünk.

A regressziós modelleknek több fajtája létezik, amelyek mindegyike más-más típusú adatok elemzésére alkalmas. Ebben a dolgozatban lineáris regressziót fogok használni. A modell tehát lineáris kapcsolatot feltételez, de van egy hibátényezője a véletlenszerűsége, mivel a megfigyelések nem egy egyenes vonalra esnek, hanem akörül szóródnak (ellenkező esetben tökéletes lineáris kapcsolat lenne). Ennek megfelelően minden egyes megfigyelés a modell magyarázott részéből és a véletlen hibából (ez a reziduum, ami tehát a megfigyelt és a

modell által becsült értékek közötti eltérés) áll. Az alábbi többváltozós lineáris regressziós (MLR) egyenlet ezt a koncepciót prezentálja általános formában:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (3)$$

ahol \hat{y} a becsült függő változó értéke, x_n a független változókat, β_0 az y tengelymetszet helyét (konstans), β_n a modell regressziós paramétereit, ε pedig a véletlen hibát jelenti.

A standard lineáris regresszióknak számos feltételezése van, amelyeket a modellértékelés során ellenőrizni kell. Először is, a kiválasztott mintának reprezentatívnak kell lennie a populációra nézve. Mivel azonban idősoros adatokkal fogok dolgozni, így sok megfigyelésem lesz ugyanazon változóról az idő előrehaladásával ahelyett, hogy véletlenszerű mintát vennék a sokaságból. A Harrell (2015) szerint általános szabályként legalább 10-20 megfigyelést kell független változóként felhasználni az elemzéshez, míg Hair et al. (2009) szerint a modellbe beépített minden egyes független változóra legalább öt megfigyelést kell gyűjteni. Emellett az alábbi modellfeltételeknek kell teljesülniük, hogy azt mondhassuk, a kapott eredmények megbízhatóak és validak:

- ❖ *Linearitás* – az egyes magyarázóváltozók és az eredményváltozó között;
- ❖ *Multikollinearitás hiánya* – a magyarázóváltozók együttes mozgása statisztikailag nem szignifikáns (nincs tökéletes lineáris kapcsolat a magyarázó változók között);
- ❖ *Függetlenség* – a reziduumok (és így a megfigyelések) függetlenek (vagyis nem mutatnak autokorrelációt);
- ❖ *Homoszkedaszticitás* – a reziduumok a regresszorok minden egyes megfigyelésénél állandó szórással rendelkeznek (így a véletlen hibák nem szenvednek a heteroszkedaszticitás jelenségétől);
- ❖ *Normalitás* – a modell reziduumai normális eloszlásúak nulla érték körül.

Ezeket grafikus (pl. szórásdiagramok, hisztogram) és analitikus (pl. Durbin-Watson-teszt, varianciainflációs faktorok kiszámítása) módon is lehet validálni. Mivel a 3. egyenletben szereplő regressziós modell azt feltételezi, hogy az előrejelzés a véletlen hibák miatt nem lehet tökéletesen pontos, a cél az adatokra "legjobban" illeszkedő egyenes megtalálása kell, hogy legyen, ahol a véletlen hibák értékei a legkisebbek. Az említett feltételezések alapján a "legjobban illeszkedő egyenes" megtalálására és a paraméterek becslésére a legnépszerűbb a legkisebb négyzetek (*Ordinary Least Squares, OLS*) módszer, amely a megfigyelt és az előrejelzett értékek közötti véletlen hibák négyzetének összegét minimalizálja.

A többszörös lineáris regresszió elvégzése idősoros adatokon további kihívást is rejthet az adatsorok egyedi jellemzői miatt. Mivel leendő modelljeimben szereplő valamennyi változó

idősoros adatnak minősül, ezért az alábbi módosítást szükséges kivitelezni a megfigyelések folytonos jellege miatt:

$$\hat{y}_t = \beta_0 + \beta_1 x_{1t} + \beta_2 x_{2t} + \dots + \beta_n x_{nt} + \varepsilon_t \quad (4)$$

ahol \hat{y}_t a becsült eredményváltozó, x_{nt} a független változókat jelenti t időpontban, β_0 az y tengelymetszet helyét, β_n a modell regressziós paramétereit, ε_t pedig a véletlen hibát jelöli t időpontban.

Alapvetően idősoros regresszió esetén a függetlenségi feltétel nem teljesülhet, mivel a modellben szereplő véletlen hibák gyakran pozitívan korrelálnak az idő múlásával, ami azt jelenti, hogy az egyes hibák sokkal inkább hasonlítanak az előző időpontban mért reziduumba, minthogy egymástól függetlenek lennének. Ez az autokorreláció jelensége. Ha autokorreláció lép fel, akkor többek között az autoregressziós modell és a Cochrane-Orcutt-eljárás (a továbbiakban: CO-eljárás) képes kezelni ezt a problémát. Az előbbi modellek eleve tartalmazzák az autokorrelációt a szerkezetükben, míg a CO-eljárás egy lineáris regressziós modellekre alkalmazott korrekciós technika. Fontos, hogy az autoregresszív hibatenyezőkkel rendelkező regressziószámítások során a modellezett hibastruktúrát be kell építeni az egyenletbe. Ekkor regressziós modell állandóját az alábbiak szerint kell kiszámolni (a többi paramétert (meredekségeket) nem kell újra kalkulálni, mivel azokat közvetlenül a módosított regresszió szolgáltatja):

$$\beta_0 = \hat{\beta}_0 / (1 - \hat{\rho}) \quad (5)$$

ahol $\hat{\beta}_0$ a módosított regresszióból kapott y -metszéspont, míg $\hat{\rho}$ az első késleltetésű (lag 1) autokorreláció becsült értéke a regresszióból származó reziduumban.

A regresszióelemzés tehát alapvetően a változók közötti kapcsolat modellezését szolgálja, amely előrejelzési eszközként is használható. Ehhez egyszerűen behelyettesítjük a jövőbeli időpontokban várható független változók értékeit a modell egyenletébe, hogy előrejelzéseket kapjunk a függő változó becsült jövőbeli értékeire. Az előrejelzés pontossága függ a modell minőségétől, az adatoktól és attól, hogy a jövőbeli körülmények mennyire hasonlítanak azokhoz, amelyek között a modellt illesztettük. Mivel a lineáris regressziós modell elsősorban a változók közötti kapcsolat modellezésére és számszerűsítésére irányul, az előrejelzést illetően korlátokba ütközik. A modell természeténél fogva nem képes figyelembe venni az eredeti idősoron kívül eső adatsoron érvényesülő új trendeket vagy mintázatokat, illetve a regresszió alapvetően csak kapcsolatokat ír le, és nem biztosít bizonyítékot az ok-okozati viszonyokra, így ha a feltárt kapcsolatok nem okozati jellegűek, az előrejelzések megtévesztőek lehetnek.

Továbbá, a lineáris modellek nem képesek megfelelően kezelni a nemlineáris kapcsolatokat sem a változók között, illetve a túlillesztés jelensége sem kedvez az előrejelzés megbízhatóságának. Ugyanakkor, mivel egy ARCH, ANN vagy LNN modellhez képest egyszerűbb statisztikai modellnek minősül, így használatos ma is előrejelzések céljára.

Mindent figyelembe véve, egy általános regresszióelemzés magába foglalja a modell felállítását, illesztését és becslését, kiértékelését és használatát. Az értékelést azonban folyamatosan, a regresszióelemzés előtt, alatt és után is kell kivitelezni a feltételezések és a modell eredményeinek ellenőrzése érdekében.

4.1.4. Alkalmazott idősor előrejelzési módszertan

Ahogy korábban már ismertetésre került, az utolsó empirikus kutatásban kétféle előrejelzési módszertant fogok alkalmazni: egy- és többváltozós idősor-modellezést (Heij et al., 2004; Hyndman & Athanasopoulos, 2018; Neusser, 2016; Pintér & Rappai, 2007).

Az exponenciális simítás (*Exponential Smoothing, ES*) az idősoros adatok előrejelzésére használt viszonylag egyszerűbb statisztikai technika. Az egyváltozós ES mögött húzódó koncepció az, hogy előrejelzés szempontjából az újabb megfigyelések relevánsabbak, így nagyobb súlyt kapnak, mint a régebbi megfigyelések. Az egyszerű ES (*Simple ES, SES*) alapvetően olyan idősorok előrejelzésénél hasznos, ahol nincsenek trendek vagy szezonális minták, mivel csak egy simítási tényezőt (alfa) használ, amely meghatározza az újabb megfigyelések súlyát az alábbi egyenlet szerint:

$$\hat{y}_{t+1} = \alpha \times y_t + (1 - \alpha)\hat{y}_t \quad (6)$$

ahol \hat{y}_{t+1} a következő időszakra szóló előrejelzés, y_t az aktuális értéket jelöli t időpontban, míg \hat{y}_t az előrejelzett értéket jelenti t időpontban.

Az ES modelleknek SES-en felüli, összetettebb típusai is léteznek, amelyek mindegyike másfajta idősoradatokra alkalmas (pl. a Holt-féle lineáris trendmódszer során az ES figyelembe tudja venni a trendet szezonális nélkül, míg a Holt-Winters-féle szezonális módszer már képes figyelembe venni utóbbit is). Az ES tehát egy gyakran használt módszer az idősorok előrejelzésére, főleg, ha a célunk rövid távú becslés készítése. Azonban, ha az idősorok komplexebb mintákkal rendelkeznek, illetve hosszabb távú előrejelzésekre van szükség, akkor inkább az autoregresszív (*autoregressive, AR*) modellek kerülnek előtérbe.

Az AR alapú modellek az egyváltozós idősorok olyan típusai, amelyek az adott változót a múltbeli értékeivel magyarázzák meg, így a múltbeli értékek és egy véletlen hibtag lineáris

kombinációjaként fejezik ki. Erre az AR koncepcióra épül az autoregresszív és mozgóátlag folyamat (*autoregressive moving average, ARMA*), amely a mozgóátlag (MA) komponens hozzáadásával képes figyelembe venni az idősor saját múltbeli értékeinek és a hibák autokorrelációjának hatását. Az ARMA megközelítés azonban feltételezi, hogy az idősor stacionárius. Ha nem, akkor ahogy a korábbiakban részleteztem, adattranszformációra van szükség, ezért az ARMA modellt ki kell terjeszteni differenciálással. Ezzel eljutunk az autoregresszív integrált mozgóátlag-folyamatokhoz (*autoregressive integrated moving average, ARIMA*), ahol az „I” jelöli azt, hogy a folyamat integrálja a differenciálást a modellbe, lehetővé téve a nem stacionárius idősorok elemzését és előrejelzését.

Egy ARIMA-modell (vagy másnéven Box-Jenkins-modell) felírható $ARIMA(p, d, q)$ alakban. Ekkor a p jelöli az AR komponens rendjét, amely azt mutatja meg, hogy hány előző időponti értéket kell figyelembe venni a jelenlegi érték előrejelzéséhez. A d a differenciálás szintjét jelöli, azaz azon ismétlések számát adja meg, ahányszor az eredeti idősorból különbséget kell képezni ahhoz, hogy az stacionáriussá váljon. A q pedig az MA-tag rendjét jelenti, ami az előrejelzési hibák korábbi értékeinek számát határozza meg, amelyeket a jelenlegi érték előrejelzéséhez kell felhasználni. Az $ARIMA(p, d, q)$ modell általános formában az alábbiak szerint írható fel:

$$\phi_p(B)(1 - B)^d y_t = \theta_q(B)\varepsilon_t \quad (7)$$

ahol y_t az aktuális értéket jelöli t időpontban, B a visszatolás operátor, ϕ_p az autoregresszív komponens együtthatója, θ_p a mozgóátlag komponens együtthatója, p és q az AR és MA tagok rendjét jelöli, d a differencia bevonásának szintjére utal, míg ε_t a véletlen hibát jelöli t időpontban nulla átlagú és konstans szórású normál eloszlás feltételezésével.

Az ARIMA-modell paramétereinek azonosítását több előzetes exploratív adatelemző eszköz is támogathatja. Az autokorrelációs függvény (*auto-correlation function, ACF*) az idősor különböző késleltetések szerinti megfigyelések közötti korrelációt méri, amivel fel lehet tárni az idősorok mintáit. A részleges autokorrelációs függvény (*partial auto-correlation function, PACF*) lehetővé teszi az (AR) és mozgóátlag (MA) jellemzők megkülönböztetését, továbbá hasznos információt nyújt az AR-komponensek rendjének meghatározásához, valamint a szezonális minták beazonosítására az idősorokban. Ennélfogva az ACF és PACF is segít a megfelelő idősor-modellek kiválasztásában és finomításában. Ezenkívül a korábban részletezett egységgyök (ADF, PP) és stacionaritási (KPSS) tesztek jelzik, hogy ha differenciálni szükséges az adatokat.

Az ARIMA(p, 0, q) modell megegyezik az ARMA(p, q) modellel, ha az idősor nulladrendben integrált (azaz stacioner). Továbbá, trenddel és szezonalitással nem rendelkező idősorok esetében az ARIMA(0,1,1) modellt, amennyiben konstans nélkül van alkalmazva, a SES egy speciális esetének is tekinthetjük. Emellett, ahogyan a SES kiterjeszhető a Holt-Winters módszerrel a trend és szezonalitás kezelésére, úgy az ARIMA-modell is bővíthető a szezonális ARIMA (*Seasonal ARIMA, SARIMA*) modellel, ami a szezonális differenciálás és szezonális AR- és MA-komponensek bevezetésével teszi lehetővé a szezonális pontos modellezését az idősorokban. Ezt szokás SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_s formátumban is jelölni.

Összességében, mind a SES, mind az ARIMA egyváltozós modellnek minősül. Azonban, ha egy modellben külső (exogén) változókat is szeretnénk figyelembe venni, akkor bonyolultabb előrejelzési technikákra van szükség, amelyek képesek több múltbeli idősoros adatot is beépíteni. Erre a célra az autoregressziós modelleket bővíthetjük exogén változókkal (*AR with exogenous, ARX*), amelyek befolyásolhatják a függő változót. Ebben az esetben az exogén változók a modell egyenletébe (7. egyenlet) mint kiegészítő magyarázóváltozók kerülnek figyelembevételre az alábbiak szerint:

$$\phi_p(B)(1-B)^d y_t = \theta_q(B)\varepsilon_t + \sum_{i=1}^k \psi_i x_{it} \quad (8)$$

ahol a korábbi képlet kiegészült az x_{it} külső változókkal, k ezen változók számát jelöli, míg ψ_{it} jelöli az exogén változók együtthatóit.

Az előrejelző modellek pontosságának mérésére standard mérőszámok vannak használatban, amelyek közül az átlagos abszolút hiba (*Mean Absolute Error, MAE*), az átlagos abszolút százalékos hiba (*Mean Absolute Percentage Error, MAPE*), valamint az átlagos négyzetes hiba gyöke (*Root Mean Square Error, RMSE*) különféle módon képes a becült és a tényleges értékek közötti hiba számszerűsítésére. E három pontossági mérőszám formulái a következők:

$$\begin{aligned} MAE &= \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |e_t - \hat{e}_t| \\ MAPE &= \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |(e_t - \hat{e}_t)/e_t| \times 100\% \\ RMSE &= \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (e_t - \hat{e}_t)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

ahol e_t és \hat{e}_t a tényleges és a becült értéket jelöli, míg T pedig a megfigyelések száma.

Általánosságban véve, minél alacsonyabb ezeknek a mérőszámoknak az eredménye, annál nagyobb a pontosság mértéke. Ugyanakkor, az idősoros adatok függvényében adott metrika előnyösebb lehet a többinél. A MAE és az RMSE mértékei skálafüggőek, így ezeket a hibaértékeket leginkább azonos adatkészleteken belüli modellek összehasonlítására ajánlott használni. Az RMSE nagyobb súlyt ad a nagyobb hibáknak, mivel az előrejelzések eltéréseit négyzetre emeli, mielőtt azok átlagát kiszámítaná, mely azt eredményezi, hogy az RMSE értéke jelentősen megnőhet, ha az előrejelzés a nagyobb értékeknél pontatlan. Ezzel szemben a MAPE, mint százalékos érték, lehetőséget nyújt különböző méretű adathalmazok összehasonlítására, és kevésbé érzékeny az adatok nagyságrendjére.

Fontosnak tartom megjegyezni azt is, hogy az előrejelző modellek értékelésekor további metrikákat is alkalmazni kell annak meghatározására, hogy milyen az egyensúly a modell illeszkedése (jósága) és komplexitása között. Erre alkalmas többek között a (módosított) R^2 mutató, mely a modell magyarázóerejét szemléltető többszörös determinációs együttható, illetve a (normalizált) Bayes-féle információs kritérium (*Bayesian Information Criterion, BIC*), amely segítségével felmérhető, hogy egy adott modell mennyire hatékonyan magyarázza az adatokat, miközben figyelembe veszi a kiválasztott modell bonyolultságát és az illeszkedés pontosságát is. Ezért előbbinél az az előnyös, ha minél magasabb a kapott érték, míg utóbbinál éppen fordított a helyzet.

„For more than a century, energy – its availability, access, and flows – has been intertwined with security and geopolitics.”

- Daniel Yergin (2020), author of The New Map: Energy, Climate, and the Clash of Nations

5. A fenntartható energiagazdálkodás, az energiatrilemma és az energiaátmenet kapcsolati rendszere

A 2. fejezetben bemutatott energetikai körkép gyakorlatilag egy redukcionista, vagy más néven elemi megközelítést eredményezett, ahol az energetika komplex rendszerét részelemekre bontva vizsgáltam meg, és tényadatokra, működési mechanizmusok egyedi megértésére támaszkodtam. Ez felölelte az erőforrások természetes előfordulásainak, a gazdasági-társadalmi energiaszükségleteknek, az energiapiacok működésének, valamint a globális éghajlatváltozás beláthatatlan következményeinek körét. Azonban, ahogy a kutatási céloknál is utaltam rá, az energiapolitikának integráltan, mindezen részelemekre tekintettel kell döntéseket hoznia, amelynek végső célja tehát a komplex energiarendszerek fenntartható működtetése, azaz a fenntartható energiagazdálkodás biztosítása.

5.1. A fenntartható fejlődés és a fenntarthatóság koncepciójának egzakt megközelítése

A **fenntarthatóság** fogalmát szándékosan kerültem eddig, viszont most itt az ideje ezt is pontosan definiálni, körbejárni. Sajnos a fenntarthatóság koncepciójának gyakori és mindenre kiterjedő használata mára oda vezetett, hogy a kifejezés már-már elcsépeletté vált. Ez különösen igaz a fenntartható mint minőségi jelző marketingcélokra való rendszeres használatakor, mely az ún. "zöldmosás" (*greenwashing*) jelensége, ahol vállalatok vagy termékek önkényesen és megalapozatlanul kapják ezt a pozitív jelzót a versenyelőny szerzés céljából anélkül, hogy valódi és jelentős környezeti vagy társadalmi előnyöket biztosítanának (de Freitas Netto et al., 2020). Éppen ezért a fogalom mélységének és komplexitásának megőrzése érdekében fontos, hogy a társadalom folyamatosan tájékoztatva legyen a fenntarthatóság valódi jelentését és tartalmát illetően.

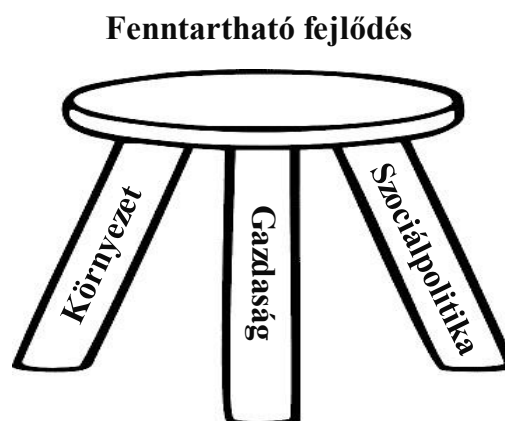
A történelem folyamán az ENSZ volt az egyik legaktívabb és legbefolyásosabb szervezet, amely – a korábban ismertetett klímakonferenciák során és mellett – globális szinten foglalkozott a fenntartható fejlődés és a fenntarthatóság témakörével, számos konferenciát és programot indított ezen a területen (Baker, 2016). Nem véletlen tehát, hogy először környezetvédelmi témájú nagy nemzetközi konferenciát az ENSZ szervezésében tartottak. Az

1972-es stockholmi konferencia mellett, hogy kifejezetten ilyen jellegű kérdésekkel foglalkozott, rámutatott a környezetvédelem és a gazdasági növekedés közötti összefüggésekre és a kapcsolódó nemzetközi együttműködés szükségességére. Ez alapvetően előkészítette a terepet a fenntarthatóság koncepciójának megalakulásához (Gyulai, 2012).

A kifejezés előzményének a szakirodalom széles körben az ENSZ egyik alszervezetének, a Környezet és Fejlődés Világbizottság (*World Commission on Environment and Development, WCED*) 1987-es jelentésében, melynek címe a „Közös jövőnk” („*Our Common Future*”) vagy ahogy a bizottság elnöke, Gro Harlem Brundtland után szokták nevezni, a „Brundtland-féle jelentés”-ben használt fenntartható fejlődés (*sustainable development, SD*) fogalmat tekinti, amely úgy hangzott, hogy „*A fenntartható fejlődés³ olyan fejlődés, amely kielégíti a jelen szükségleteit anélkül, hogy veszélyeztetné a jövő nemzedékek esélyét arra, hogy ők is kielégíthessék szükségleteiket.*” (EUR-Lex, é.n.; World Commission on Environment and Development, 1987, 37. o.). Ez tehát egy társadalmi szükséglet-központú komplex megközelítés, amely nem egy végállapotra, hanem egy fenntartható folyamatra összpontosít (Bukovics et al., 2014).

A Brundtland-jelentés a fenntartható fejlődésnek három pillérjét határozta meg, melyek elvileg összefüggenek és kiegyensúlyozottan járulnak hozzá a folyamathoz (35. ábra). Ez a megközelítés – amely számos pozitív érdemmel bír – azonban több kritikát is kapott.

35. ábra A fenntartható fejlődés Brundtland-jelentés szerinti megközelítése



Forrás: Gyulai (2012) alapján saját készítésű ábra

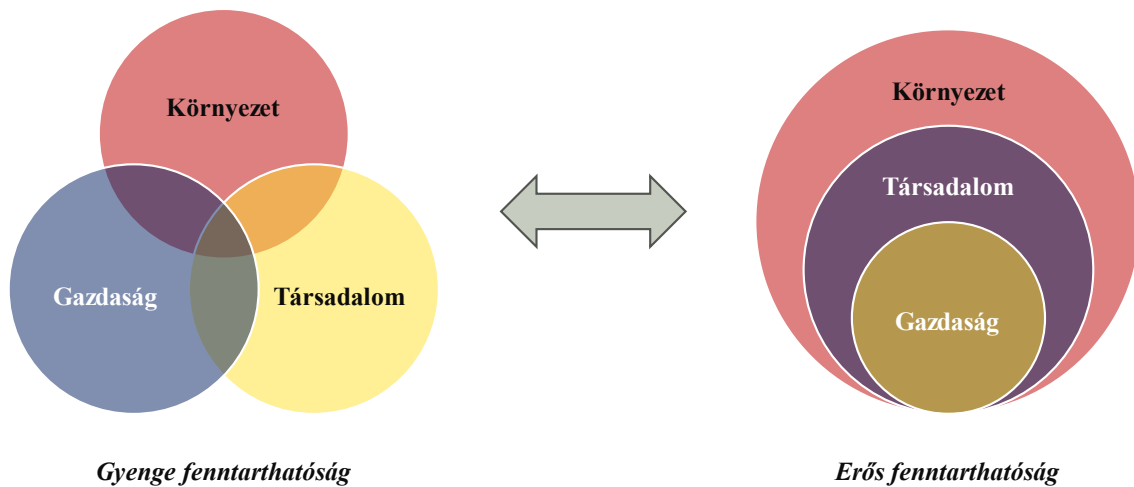
Daly (1996) szerint az egyik fő kritika az, hogy a jelentés túlzottan hangsúlyozza a fenntarthatóságot, de nem definiálja kellően a fejlődést, illetve gyakran a gazdasági növekedés

³ Bukovics és szerzőtársai megjegyzik, hogy a kezdeti magyar fordításban a fenntartható fejlődés még „harmonikus fejlődés”-ként szerepelt, és csak később alakult át a ma használatos kifejezéssé.

szinonimájaként tekint rá. A szerző szerint fontos megkülönböztetni a gazdasági növekedés és gazdasági fejlődés koncepcióját, hiszen míg „*a fejlődés minőségbeli javulást, addig a növekedés mennyiségbeli bővülést jelent*” (Daly, 1996, 8. o.). A mennyiségbeli bővülésnek pedig van természetbeni korlátja, tehát korlátlan növekedés nem létezhet, valamint a gazdasági növekedés nem mindig jár együtt a társadalmi jólét javulásával vagy a környezeti fenntarthatósággal. Ezért Daly úgy fogalmaz, hogy „*A fenntartható fejlődés a folytonos szociális jólét elérése anélkül, hogy az ökológiai eltartó-képességet meghaladó módon növekednénk*” (Daly, 1996, 8. o.).

Mindemellett, e három pillér közötti összefüggés sem volt tisztázott a kezdetekben. Kétféle koncepciót különböztethetünk meg, melyek a természeti erőforrások és az ember által létrehozott tőke közötti viszony kérdését feszegették a fenntarthatóság elérésének szempontjából. Az első megközelítés leginkább Robert Solow és John Hartwick azon neoklasszikus közgazdaságtan elméletéből fakad, mely szerint a tőkejavak egymással korlátlanul helyettesíthetők (Kerekes, 2007). Ez a fenntarthatóság szempontjából azt jelenti, hogy a természeti erőforrások és az ember által létrehozott tőke (pl. épületek, gépek, infrastruktúra) helyettesíthetők egymással, tehát amennyiben az egyik tőkeelem a fejlődés során csökken, úgy a másik ellensúlyozhatja azt, illetve végső soron a piacok és a technológiai innováció megoldást fog nyújtani a környezeti problémákra. Ezt nevezik gyenge fenntarthatóságnak, mely szerint tehát a környezeti, gazdasági és társadalmi vetületnek egyenlő fontossága van, és az össztőke mennyisége számít a fenntartható fejlődés szempontjából (Fleischer, 2007; Hediger, 2006). Ezzel szemben az ún. erős fenntarthatóság elve – mely szintén Daly nevéhez fűződik – már nem, vagy csak igen korlátozottan teszi lehetővé a helyettesíthetőséget, mivel vannak olyan kardinális értékek, melyek irreverzibilisek. Tehát a három pillér esetében a korábbi mellérendelt helyett egy hierarchikus viszonyt feltételez, ahogy azt a 36. ábra is bemutatja, ahol a környezeti rendszer feltételeit és korlátait önmagában is szükséges betartani (Daly, 1996). Knoll és Lakatos (2014) ezért úgy fogalmazott, hogy a fenntarthatóság pilléreinek felsorolása helyett a rendszerösszefüggések megértésén kell lennie a hangsúlynak.

36. ábra A fenntarthatóság pilléreinek gyenge és erős fenntarthatóság szerinti ábrázolása



Forrás: Fleischer (2007) és Szlávik (2013) alapján saját készítésű ábra

A két definíció alapján megállapítható, hogy míg a gyenge fenntarthatóság egy technocentrikus, addig az erős egy ököcentrikus világgépet testesít meg. Ez a két megközelítés egy elég széles spektrumon mozog (nagyon gyenge/erős fenntarthatóság) (Gibbs et al., 1998), ugyanakkor a gyakorlatban egyfajta középutas megoldás is kialakult, amely mindkét filozófiából merít. Ez az ún. fenntartható-centrista megközelítés, mely szerint bizonyos mértékű helyettesíthetőség lehetséges a természeti és gazdasági tőkék között (ahogy a gyenge fenntarthatóság állítja), ugyanakkor vannak bizonyos kritikus természeti erőforrások, amelyek pótolhatatlanok és elengedhetetlenek a társadalmi jólét és a bolygó élhetősége szempontjából (amit az erős fenntarthatóság hangsúlyoz). E tekintetben a fenntartható fejlődés egy dinamikus folyamat, melyben a technológiai innováció és a gazdasági növekedés elősegítheti a környezeti fenntarthatóságot az irreverzibilis folyamatok elkerülése, a környezeti korlátok betartása, valamint a társadalmi igények figyelembevétele mellett (Gladwin et al., 1995).

A Brundtland-jelentés megalapozta a fenntartható fejlődés globális szintű elfogadását és a későbbi stratégiai irányzatok katalizátoraként szolgált. Erre nem is kellett sokat várni, hiszen az UNCED által 1992-ben Rio de Janeiro-ban megrendezett Föld Csúcstalálkozó (*Earth Summit*) volt az első nagyszabású nemzetközi konferencia, ahol a résztvevő országok már konkrét lépéseket is megfogalmaztak a fenntartható fejlődés előmozdításának támogatására. Ennek keretében jött létre az Agenda 21 nevű akcióterv is, amely már szélesebb körben veszi figyelembe a jelen és a jövő generációk problémáit és kihívásait, ideértve a környezeti, társadalmi, gazdasági aspektuson túl az intézményi, technológiai, politikai és kulturális

tényezőket is. A dokumentum kifejezetten foglalkozik a környezeti, gazdasági és társadalmi dimenziók rendszerszintű kezelésével, hangsúlyozva, hogy ezek a területek szorosan összefüggenek és kölcsönösen befolyásolják egymást (United Nations [UN], 1992). Ehhez kapcsolódóan megalakult az ENSZ Fenntartható Fejlődés Bizottsága (*UN Commission on Sustainable Development, CSD*), amely 2013-ig működött, és amely a fenntartható fejlődés előmozdítását és nyomon követését szolgálta. Utóbbit tekintve, a CSD 1995-től nekiállt kidolgozni egy indikátor készletlistát (*Indicators of Sustainable Development, ISD*) is.

Tíz évvel a riói konferenciát követően, 2002-ben került megrendezésre Johannesburg-ban a Fenntartható Fejlődési Világcsúcstalálkozó (*World Summit on Sustainable Development, WSSD*), amelyet szokás Rió+10-nek is emlegetni, hivatkozva az UNCED 10. évfordulójára. E konferencia nevéből is adódóan a fenntartható fejlődéssel foglalkozott, konkrétan az Agenda 21 felülvizsgálatával és új intézkedések javaslatával. A Johannesburgi Nyilatkozat a szegénység felszámolásán, a mindenki számára elérhető egészséges ivóvízhez jutás elvén, a biodiverzitás csökkenésének megállításán felül olyan javaslatokat és célkitűzéseket is tartalmazott, amelyeknek közvetlen energetikai vonatkozásuk is volt. Ezek közé tartozott a megújuló energiaforrások használatának előmozdítása, az energiahatékonyság javítása, a tiszta energiához való hozzáférés biztosítása, valamint az energiapolitikák és szabályok fenntarthatóság szempontú reformja (Faragó, 2002; Gyulai, 2012).

Ha újabb 10 évet ugrunk az időben, akkor elérkezünk a 2012-es ENSZ Fenntartható Fejlődési Konferenciához (*UN Conference on Sustainable Development, UNCSD*) – vagy más néven Rió+20 konferenciához –, amelynek ismét Rio de Janeiro adott otthont és amely során újfent felülvizsgálatra kerültek a fenntartható fejlődés érdekében tett eddigi erőfeszítések, valamint a viták a zöld gazdaság és a zöld fejlődési út intézményesített keretek között történő kivitelezését is célozták. A konferencia eredményeképpen létrejött egy nem kötelező érvényű nyilatkozat „*The Future We Want*” címmel, amely átfogóbb cselekvési tervet és politikai irányvonalat rögzített, lefektetve ezzel a Fenntartható Fejlődési Célok meghatározásának körét (Baker, 2016).

A Fenntartható Fejlődési Célok (*Sustainable Development Goals, SDG*) gyakorlatilag a 2000-ben lefektetett Millenniumi Fejlesztési Célok (*Millennium Development Goals, MDG*) továbbfejlesztett utódaiként szolgálnak, miután azok teljesítési határidői lejártak. A korábbi nyolc MDG-t a 2015-ös new york-i ENSZ Fenntartható Fejlődési Csúcstalálkozón (*UN Summit on Sustainable Development*) 193 ország által elfogadott „*Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*” c. záródokumentum 17 célkitűzéssé alakította át és bővítette ki (37. ábra), amelyhez további 169 eszközcélt is meghatároztak. A célkitűzések

egyetemleges érvényűek, tehát a Föld valamennyi országára vonatkozik, és szintén tartalmaznak elemeket a környezetvédelemmel, a társadalmi fejlődéssel, valamint a gazdasági növekedéssel kapcsolatban (UN, 2015).

37. ábra Az ENSZ által kitűzött 17 Fenntartható Fejlődési Cél



Forrás: Alapvető Jogok Biztosának Hivatala (é.n.)

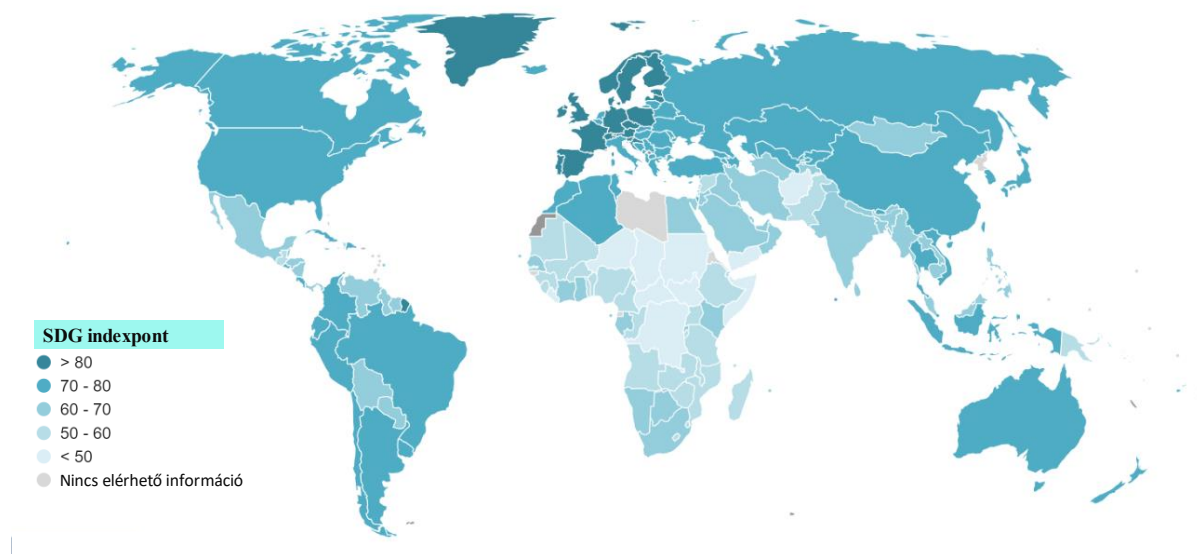
A felállított keretrendszer több szempontból is mérföldkőnek számított a fenntartható fejlődési törekvések között. Egyrészt átfogóan a 2030-as évet jelölte ki, mint a célkitűzések elérésének (de legalábbis komoly előrelépések megtételének) határidejét. Másrészt, a célkitűzésekhez különféle indikátorok is társulnak, melyek viszonyítási alapot nyújthatnak az aktuális státuszról, tehát a nyomon követési rendszer is hangsúlyosabbá vált. Az ENSZ Statisztikai Bizottsága (*UN Statistical Commission, UNSC*) összesen 231 egyedi SDG indikátort tart számon, ugyanakkor lehetősége van az adott országnak kibővítenie saját indikátorkészlettel a mérési listát (UN, 2018).

A CSD 2013-as megszűnését követően az SDG célok nyomon követését szolgálja az ENSZ Magas Szintű Politikai Fóruma (*UN High-Level Political Forum on Sustainable Development, HLPF*) is, mely felelős az egész szervezet fenntartható fejlődéssel kapcsolatos politikájáért, platformot biztosít a tagok számára a releváns diskurzusokhoz és az előre haladások bemutatásához. A HLPF 2019-ben New York-ban a négyévente üléselő ENSZ Közgyűlés égisze alatti Fórum során került megtartásra, amelyet SDG Summit-nak is szoktak

hívni. Ennek keretén belül a résztvevők felülvizsgálták az Agenda 21 és az SDG megvalósításának előrehaladását, és megállapították, hogy számos esetben lassú ez a mérték, többet kell tenniük az országoknak az ügy érdekében. Ennek érdekében újabb nyilatkozatot írtak alá, amely kijelölte a Cselekvés Évtizedének (*Decade of Action*) kezdetét, egy tízéves globális erőfeszítés az SDG-k felgyorsított megvalósítására a 2020-2030 közötti időszakban. Ehhez kapcsolódóan létrehozták az SDG Action Forum eseménysorozatot is, amelynek célja, hogy mozgósítsák a társadalmat és növeljék az emberek tudatosságát az SDG-k fontosságát illetően, valamint, hogy ösztönözzék a konkrét cselekvéseket és elkötelezettségeket e tekintetben (UN, 2019). Négy évvel később, 2023 második felében megrendezésre került a második SDG Summit, ahol még konkrétabban kijelentették, hogy nagyon nagy a lemaradásuk a célok elérését illetően, megvalósításuk terén még nem járunk félúton sem. Ugyanakkor az is megjegyzendő, hogy a COVID-19 pandémia és az orosz-ukrán háború kitörése miatt az SDG erőfeszítések részben háttérbe is szorultak (UN, 2023a). Az SDG-vel kapcsolatban gyakori kritika, hogy az előrehaladások lassúságának fő oka a túlságosan ambiciózus célkitűzések, valamint a megfelelő fókusz, prioritás és a teljesítéshez szükséges pénzáramlások hiánya (Arora-Jonsson, 2023; Swain, 2018).

Az előbbiekkal összhangban, a 2023-as SDG jelentés – mely gyakorlatilag a 2030-ig tartó menetrend félidejéről nyilatkozik – úgy fogalmaz, hogy a világ országai ugyan sok területen érték el jelentős előrehaladást és eredményeket, összességében viszont elmaradnak, sőt esetenként vissza is fejlődnek egyes területeken, így a célkitűzések maradéktalan teljesítése 2030-ig kétséges (UN, 2023b). A legfrissebb jelentés szerinti összesített indexpont alapján globálisan kevés ország bír 80 feletti értékkel, de annál több 60 alattival (38. ábra).

38. ábra A világ országainak 2023. júniusi összesített SDG indexpontjai



Forrás: UN (2023b) alapján saját szerkesztés

A fenntartható fejlődés fogalma evolúciójának elemzése során akarva-akaratlanul is, többször előkerült magának a fenntarthatóságnak is a fogalma. Ezt illetően is ideje pontot tenni az i-re.

Habár nem az ENSZ berkeiben, de hasonlóan globális hálózatként működik az 1993-ban alapított Világ Tudományos Akadémiája (*InterAcademy Partnership, IAP*), mely a világ valamennyi akadémiait tömöríti azon küldetésük céljából, hogy tudományos vonatkozásban segítsék a politikai döntéshozókat a társadalmakat érintő globális problémák megoldásait illetően. Az IAP keretén belül, 2000-ben tartott tokiói konferencián fogadták el a Világ Tudományos Akadémiáinak Nyilatkozata – Átmenet a fenntarthatóság felé (*IAP Statement on Transition to Sustainability*) dokumentumot, mely a tudományos közösség figyelemfelhívása volt a környezeti rendszerünk fenntarthatóságával kapcsolatban. Már a bevezetőben megfogalmazták, hogy „A **fenntarthatóság** az emberiség jelen szükségleteinek kielégítése, a környezet és természeti erőforrások jövő generációk számára történő megőrzésével egyidejűleg” (Gyulai, 2012; IAP, 2000, 1. o.). Ha ezt a definíciót összevetjük a Brundtland-jelentésben fellelhető fenntartható fejlődés fogalmával, beláthatjuk, hogy a két kifejtés nem áll olyan távol egymástól. Nem véletlen, hogy a két fogalmat gyakran szinonimaként használják a kontextustól függően.

Magának a "fenntarthatóság" szónak a pontos definícióját a szakirodalom nem kapcsolja egy kimondott dokumentumhoz vagy dátumhoz sem, hanem inkább egy folyamatosan fejlődő koncepcióhoz hasonlítja, amelyet számos tudományos, politikai és társadalmi diskurzus formált

és alakított (és alakít) az évtizedek során (Caradonna, 2022; Purvis et al., 2019). Az IAP nyilatkozatban fellelhető megfogalmazást két ok miatt választottam bemutatni, ugyanis rámutat a fenntartható fejlődés és a fenntarthatóság közös metszetére, miközben indirekten érzékelteti a kettő közötti különbséget is.

A közös tényező egyértelműen a rendszerszemlélet – mindkettő fogalom a gazdasági, társadalmi és környezeti dimenziók kontextusának fontosságát hangsúlyozza, miközben a középpontban az emberi szükségletek kielégítése áll. Ahogy Jeronen (2013) és Parris és Kates (2003) is rámutatnak, a fenntartható fejlődést, illetve az SDG-ket, ha elemeire szedjük, alapvetően azt láthatjuk, hogy két kérdésre keresik a választ: „mit szükséges fenntartani” és „mit szükséges fejleszteni” (10. táblázat).

10. táblázat A fenntartható fejlődés taxonómiája

Mit szükséges fenntartani	Mit szükséges fejleszteni
<u>Természet</u>	<u>Emberek</u>
Bolygó	Gyermekehalandóság
Biodiverzitás	Várható élettartam
Ökoszisztéma	Oktatás
<u>Életkörülmények</u>	Igazságosság
Erőforrások	Egyenlő lehetőségek
Környezet	<u>Gazdaság</u>
<u>Közösség</u>	Jólét
Kultúra	Termelő ipar
Csoportok	Fogyasztás
Helyek	<u>Társadalom</u>
	Intézmények
	Társadalmi tőke
	Államok
	Régiók

Forrás: Jeronen (2013) és Parris és Kates (2003) alapján saját összeállítás

A táblázat összefoglalja azt, hogy mit kell megőriznünk a jelen és a jövő generációi számára, és milyen területeken kell fejlődést elérnünk. Elfogadja, hogy a természetünk, tehát az ökoszisztémák, erőforrásaink, összességében maga a bolygó minden elemének védelme megkérdőjelezhetetlen fontosságú, miközben a közösségeink és értékeink fennmaradása és virágzása közvetlenül függ a természet adta lehetőségektől és korlátoktól. Így ez a megközelítés ebben a kontextusban azt kívánja meg, hogy a természeti és a közösségi rendszerek közötti kapcsolatokat szem előtt tartva alakítsuk ki a fejlődési stratégiákat. Ha ez betartott, akkor

történhet meg hosszú távon is a gazdaság és társadalom fejlődése, melynek központi eleme az ember lét minőségének növelése.

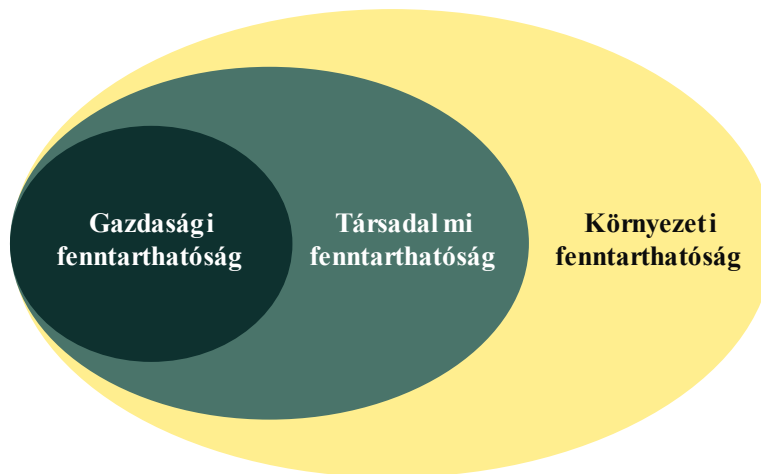
Ez a gondolkodásmód tükröződik a fenntarthatóság mai fogalmában is, amely összekapcsolódik a korábban bemutatott erős fenntarthatóság fogalmával. A környezet határozza meg azt a határt, amelyben az emberiség társadalmilag és gazdaságilag is fejlődhet. Ugyanakkor, a fenntarthatóság ennél egy árnyalatnyival tágabb fogalom. Ugyanis amíg a fenntartható fejlődés elsősorban az emberi tevékenységek és azok fejlődési irányának kereteit vizsgálja, addig a fenntarthatóság a környezeti, társadalmi és gazdasági rendszerek hosszú távú egyensúlyának megőrzésére, fenntarthatóságára összpontosít, amelynek optimális esetben része a fenntartható fejlődési célok elérése (Caradonna, 2022; Jeronen, 2013; Washington, 2015).

Ennélfogva, a 36. ábrán látható erős fenntarthatóság ábrázolása pontosításra került (39. ábra), egyes vetületeit fenntarthatósági kontextusban az alábbiak szerint lehetne összefoglalni (Caradonna, 2022; Knoll & Lakatos, 2014; Szlávik, 2013; Washington, 2015):

- ❖ *Környezeti fenntarthatóság:* Ahogy korábban is elhangzott már, alapvetően egy olyan elv vagy gyakorlat, amelynek célja a természeti erőforrások és ökoszisztémák megőrzése és védelme annak érdekében, hogy a jelen és a jövő nemzedékei számára biztosítani lehessen azok használatát. Ezen gyakorlatok közé tartozik az erőforrások hatékony használata, a környezetszennyezés minimalizálása, a biodiverzitás védelme, a megújuló erőforrások használata (figyelve a regenerációs időszakokra), a racionális termelés és fogyasztás mértéke, avagy a klímaváltozás elleni küzdelem is;
- ❖ *Társadalmi fenntarthatóság:* A társadalmi fenntarthatóság azokra a gyakorlatokra összpontosít, amelyek biztosítják az emberek jólétét, az egészséges közösségek kialakítását és fenntartását, valamint az egyenlőséget és a társadalmi igazságosságot a természet adta alapvető értékek és korlátok figyelembevételével. Az egészség, az oktatás, a munka és megélhetés, a döntéshozatal és kormányzás minősége mind ide tartozó szempontok;
- ❖ *Gazdasági fenntarthatóság:* A gazdasági fenntarthatóság egy olyan megközelítést jelent, amely összehangolja a gazdaság rendszerét a környezetvédelemmel és a társadalmi jóléttel. Tehát ez megint csak magában foglalja a gazdasági növekedés és a fejlődés olyan módon való előmozdítását, amely nem veszélyezteti a jövő generációk szükségleteit és lehetőségeit. Az innováció és technológiai fejlődés, a termelési hatékonyságnövelés, a zöld és körkörös gazdaság koncepciója, vagy a rugalmas

ellátásilánc-menedzsment mind hozzájárulnak a fenntartható gazdasági rendszer működéséhez.

39. ábra A fenntarthatóság dimenzióinak beágyazottsága



Forrás: Szlávik (2013) alapján saját készítésű ábra

Ebből a levezetésből is látszik, hogy míg a környezeti fenntarthatóság elérése jelentős lépés a fenntartható fejlődés felé, ez önmagában nem garantálja automatikusan a gazdasági és társadalmi fenntarthatóságot is. Hiszen például a környezeti fenntarthatósághoz kapcsolódó szabályok és normák bevezetése befolyásolhatja a nemzetközi versenyképességet és a kereskedelmi dinamikákat, ami pedig gátolhatja a gazdasági fejlődést és növekedést rövid távon, amíg a rendszer nem alkalmazkodik. A zöld átállás egyes régiókban munkahelyek megszűnéséhez vezethet (amellett, hogy újakat is teremt), tehát társadalmi kihívásokat vethet fel.

Ebből pedig az következik, amely az IAP nyilatkozat címében is szerepel, vagyis az, hogy a fenntarthatóság elérése egy végcél („átmenet a fenntarthatóság felé”). Az ENSZ Nevelésügyi, Tudományos és Kulturális Szervezete (*UN Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO*) magyar fordításban úgy fogalmaz, hogy „A fenntarthatóságra gyakran úgy gondolunk, mint egy hosszú távú célra (például egy fenntarthatóbb világ), míg a fenntartható fejlődés kifejezés az odáig vezető út apró folyamataira és követendő ösvényeire utal (például fenntartható mezőgazdaság és erdőgazdálkodás, fenntartható termelés és fogyasztás, jó kormányzás, kutatás és technológiai fejlesztés, nevelés és képzés stb.)” (Országos Fenntartható Fejlődés Hivatal, 2014; United Nations Educational Scientific and Cultural Organization [UNESCO], 2012, 5. o.).

Ugyanakkor, ez a végcél egy dinamikus állapotot tükröz, hiszen egy olyan komplex és integrált rendszert jellemez, amelynek elemei időben és térben folyamatosan változnak, bővülnek és új megoldandó kihívásokat állítanak fel az emberiség számára (Caradonna, 2022; Washington, 2015).

Összegezve, a fenntartható fejlődés magába foglalja a fenntarthatóság elérésére irányuló konkrét stratégiákat és intézkedéseket, melynek célja egy olyan egyensúly elérése, amelyben a gazdasági és társadalmi fejlődés olyan módon zajlik, amely nem meríti ki azokat a természeti erőforrásokat és ökoszisztémákat, amelyekről a jövőbeli létezés és fejlődés függ. Ebben a keretben a fenntarthatóság jelöli ki azokat a határokat, amelyen belül a fejlődés fenntartható módon megvalósulhat, míg a végcél a fenntarthatóság, melynek a megnyilvánulása számunkra gyakorlatilag nem más, mint a fenntartható élet. Sajnos azonban a gyakorlatban egyrészt ezek a dimenziók nem mindig kapnak megfelelő figyelmet vagy hangsúlyt a döntéshozatali folyamatokban és politikai prioritásokban. Másrészt pedig könnyen belátható, hogy az alfejezet legelején említett „zöldre festés” jelensége éppen abból ered, hogy a fenntarthatóság, mint idilli állapot gazdasági, társadalmi és környezeti rendszerben értelmezhető, tehát voltaképp bármilyen, ezt elméletben segítő termékhez, szolgáltatáshoz vagy gyakorlathoz valamilyen úton-módon hozzá lehet kapcsolni a fenntartható minőségi jelzöt.

5.2. Fenntarthatóság energetikai kontextusban

Az 1970-es évektől kezdődően a környezetvédelmi és fenntarthatósági vitákban rendre előkerült az energia témakörének szerepe, már az 1973-as olajválság is felhívta a figyelmet az energiaellátás biztonságának fontosságára, valamint az energiaforrások diverzifikálásának szükségességére. Mindazonáltal kifejezett, önálló célkitűzést az energia egészen a 2015-ös riói konferenciáig nem kapott, azaz amíg az ENSZ az SDG-k 7. pontjában (megfizethető és tiszta energia) belül explicit módon meg nem fogalmazta volna. Közvetetten már az MDG-k során is szerepet kapott (az MDG-7 a környezeti fenntarthatóság biztosításáról szólt), illetve az SDG-k keretén belül szintén indirekten megjelenik többek között az SDG-9 (ipar, innováció és infrastruktúra), az SDG-11 (fenntartható városok és közösségek), az SDG-12 (felelős fogyasztás és termelés), az SDG-13 (fellépés az éghajlatváltozás ellen), valamint az SDG-15 (szárazföldi ökoszisztémák védelme) célkitűzéseknél. Az SDG-7 bővebben a „mindenkinek hozzáférést biztosítunk a megfizethető, megbízható, fenntartható és modern energiához” célkitűzést képviseli (UN, 2018; Zlinszky & Balogh, 2016). Ebben a kontextusban a

fenntartható energia, mint minősítés háttérének és értékelési metrikáinak áttekintése következik.

Az UNDP 2000-ben kiadta a World Energy Outlook (WAE) jelentését, melyben az energiatermelés és -felhasználás, valamint a fenntartható fejlődés kapcsolatának viszonyáról két lényeges megállapítást tesz. Egyrészt az energia egyben a társadalmi jólét és a gazdasági fejlődés forrása, tehát az emberiség szükségleteit képes kielégíteni. Másrészt pedig felhívja a figyelmet arra, hogy az energiatermelés és -fogyasztás nem veszélyeztetheti a jelen és jövő generációinak életminőségét, valamint nem lépheti át az erőforrások kapacitásának korlátját (UNDP, 2000). Tehát a WAE kiadvány megfogalmazza a **fenntartható energiafejlődés**⁴ (*Sustainable Energy Development, SED*) lényegét, kiemelve az energiához kapcsolódó társadalmi, gazdasági és környezeti elemeket, és áttekintést nyújt, hogy az energia hogyan lehet a fenntartható fejlődés eszköze.

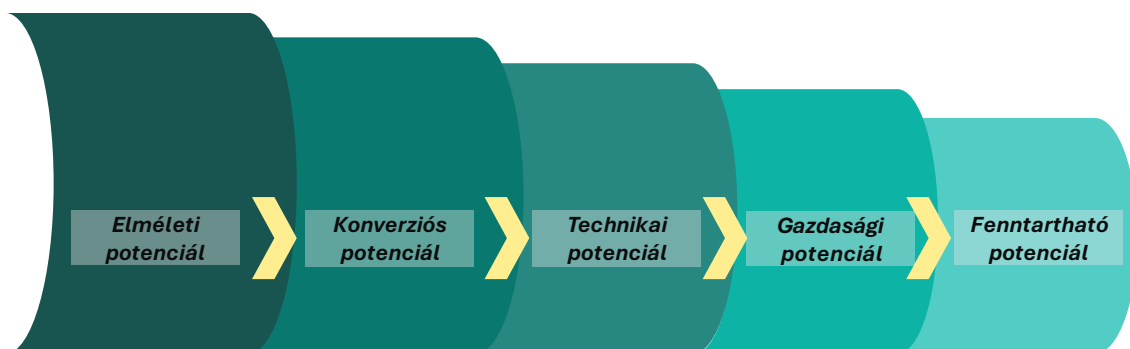
Az energiagazdálkodás első megközelítésből a gazdaság és az energia kapcsolatát fejezi ki. Ugyanakkor, mint minden ilyen jellegű tevékenységnek, ennek is a végső célja valamilyen emberi igény vagy szükséglet kielégítése. Tehát voltaképp nem csak gazdasági, hanem gazdasági és társadalmi dimenziókat is érint, ugyanakkor gyakran nem fenntartható módon. Ha e tevékenységvégzés során környezeti szempontok is érvényesülnek, akkor beszélhetünk általánosságban fenntartható energiagazdálkodásról (Munkácsy, 2018). Fontos azonban kihangsúlyozni, hogy a fenntarthatóság koncepciója rendszerszemléletű, tehát nem csak a környezeti, hanem a társadalmi és gazdasági fenntarthatósági kritériumoknak való megfelelés is vizsgálendő. Ezt megerősíti Dinya (2010) is, aki szerint a fenntartható energiagazdálkodás nem más, mint „a klasszikus értelemben vett energiagazdálkodás fenntartható fejlődésbe illeszkedő átalakítása”. Tehát a Brundtland-féle és az IAP jelentés fenntarthatósági fejlődés megfogalmazásából kiindulva azt is mondhatjuk, hogy a fenntartható energiagazdálkodás olyan energiastratégiák és -rendszerek kialakítását és alkalmazását jelenti, amely az emberiség jelenlegi energiaszükségleteinek kielégítését szolgálja az energetikai szempontú természeti erőforrások jövő generációk számára történő megőrzésével egyidejűleg.

Egy energiarendszernek a központi eleme értelemszerűen maga az energia, amely – ahogy a legelső fejezetben bemutatásra is kerül –, többféle forrásból származhat. Az elsődleges energiaforrásokat és -hordozókat kategorizáltuk aszerint, hogy mozgási vagy tárolt energiából származnak, megújulóak-e vagy sem, vagy hogy kibocsátásügyileg tisztának minősülnek-e.

⁴ Magyar kontextusban szinonimaként a fenntartható energiafejlődést, valamint a fenntartható energiagazdálkodást (*Sustainable Energy Management, SEM*) szokás használni a SED-re.

Ezek a csoportosítások azonban mind a környezeti-természeti aspektust jellemzik, de azt sem teljeskörűen. Emellett a természetben előforduló energiaforrások és -hordozók kategorizálhatóak szerint is, hogy tényleges felhasználásukat illetően mekkora potenciál van bennük. Az egyes erőforrásokhoz kapcsolódó energiaintenzitás és természeti eloszlás, valamint az energiapiacok működésének bemutatása során a 40. ábra keretén belül már indirekt módon bemutatásra kerültek ezek a típusok. Ahogy Brown et al. (2016) és Dinya (2010) is megfogalmazták, az elméleti potenciál a fizikailag rendelkező energiamennyiséget takarja, tehát a természeti előfordulásra reflektál. Ebből az elméleti potenciálból az adott konverziós és technikai adottságok mellett, lehetőség szerint minél kisebb energiaveszteséggel elsődleges energiáink hasznos energiákká alakulhatnak. Ez azonban csak akkor következik be, ha nem csak technikailag, hanem gazdaságilag is jövedelmező a folyamat. Ugyanakkor a sorban az utolsó lépcsőfokot még nem elemeztem ki. Ez pedig a fenntartható potenciál, azaz a gazdaságin felül a társadalmi és környezeti tényezőket is figyelembe véve kiaknázható energia potenciál.

40. ábra Az energia potenciálok típusai



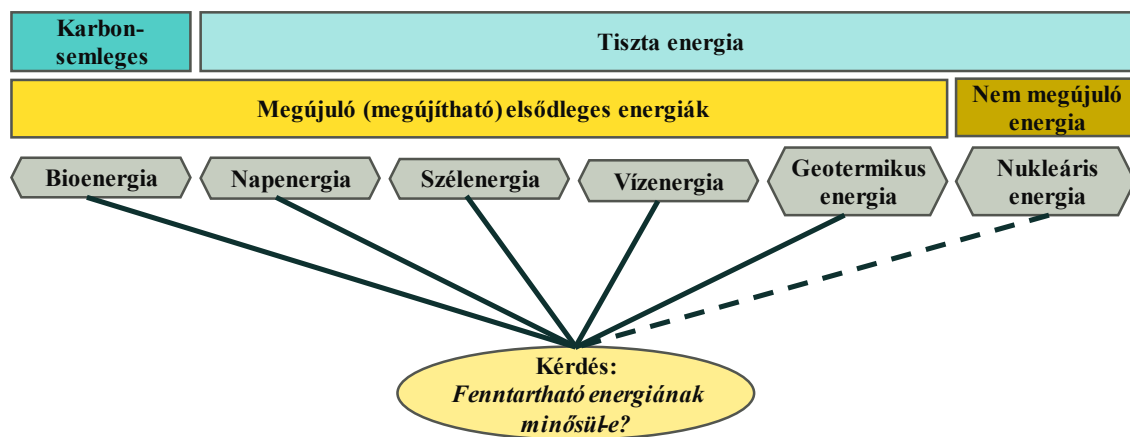
Forrás: Dinya (2010) alapján saját készítésű ábra

Tehát ahogy az energetika és a fenntartható (energetikai) fejlődés, úgy maga az energia is megkövetel egy holisztikus, rendszerszemléletű megközelítést. Ebben a szemléletben a **fenntartható energia** egy tágabb fogalom, mint az eddig ismertetett megújuló vagy tiszta minőségi jelzők, hiszen az adott energiaforrás és -hordozó környezeti, gazdasági és társadalmi hatásait is értékeli. A fenntartható energiaforrásoknak környezetbarátnak, gazdaságilag jövedelmezőnek és társadalmilag méltányosnak kell lenniük, tehát ne okozzanak hosszú távon károkat a jövő generációi számára, azaz a fenntartható fejlődés fenntartható energián kell, hogy nyugodjon (Molnár, 2021; Prandecki, 2014).

A természeti megközelítésből adódóan alapvetően minden fenntartható energiaforrás megújuló, ugyanakkor nem minden megújuló energiaforrás minősül fenntarthatónak, mely

nagyrészt az adott erőforrás előállításának, elosztásának és felhasználásának a függvénye. Itt előkerül újra a teljes életciklus-elemzés fontossága, illetve a negatív externáliák felmérése. A kivételekre jó példa a nagyméretű vízerőművek kiépítésének potenciális negatív ökológiai (folyami ökoszisztémák befolyásolása, bioszféra megzavarása, árterek kialakítása) és társadalmi (kitelepítések, termőföld elöntések) hatásai. De ide tartozhatnak a nap- és szélenergia telepítésével járó potenciális hátrányok is (előbbi esetében a termőtalajok elvesztése és a gyártáshoz nélkülözhetetlen veszélyes anyagok felhasználása, míg a szélenergia megzavarhatja a madárvonulásokat, illetve a szélenergia jelentős zajhatással bír), amennyiben azok ténylegesen testet öltenek. Továbbá, a biomassza termelése is csak akkor minősülhet fenntarthatónak, ha nem veszélyezteti az élelmiszerellátást, a biodiverzitást, és nem vezet erdőirtáshoz vagy más negatív környezeti hatásokhoz (Goswami & Kreith, 2017; UNDP, 2000). Természetesen fontosnak tartom kiemelni, hogy a felsorolt lehetséges negatív hatások gondos tervezéssel és fenntartható működtetéssel mérsékelhetőek. A 41. ábrán az elsődleges megújuló, tiszta és fenntartható energiák közötti összefüggés látható.

41. ábra Az elsődleges megújuló, fenntartható és tiszta energiák közötti átfedések energiatermelés szempontjából



Forrás: Saját készítésű ábra

A fenntartható jelzõt nem csak a primer energiákra használhatjuk, hanem a másodlagos energiahordozókra is. Ebben az esetben alapvetően akkor teljesülhet a fenntarthatóság kritériuma, ha az előállítás során már teljesülnek a gazdasági, társadalmi és környezeti fenntarthatósági szempontok. Tehát például a villamos energia vagy a hidrogén, mint másodlagos energiahordozók lehetnek fenntarthatóak is megfelelő körülmények között.

A cél mindenképpen az lenne, hogy az energetikai projekteket úgy tervezzék és kivitelezék, hogy annak környezeti, gazdasági és társadalmi fenntarthatósági szempontjai is figyelembe legyenek véve. Ezek összefoglalva tehát a következők (Bukovics et al., 2014; Gunnarsdottir et al., 2021; IAEA, 2005; Munasinghe, 2004; Tester, 2012; UNDP, 2000):

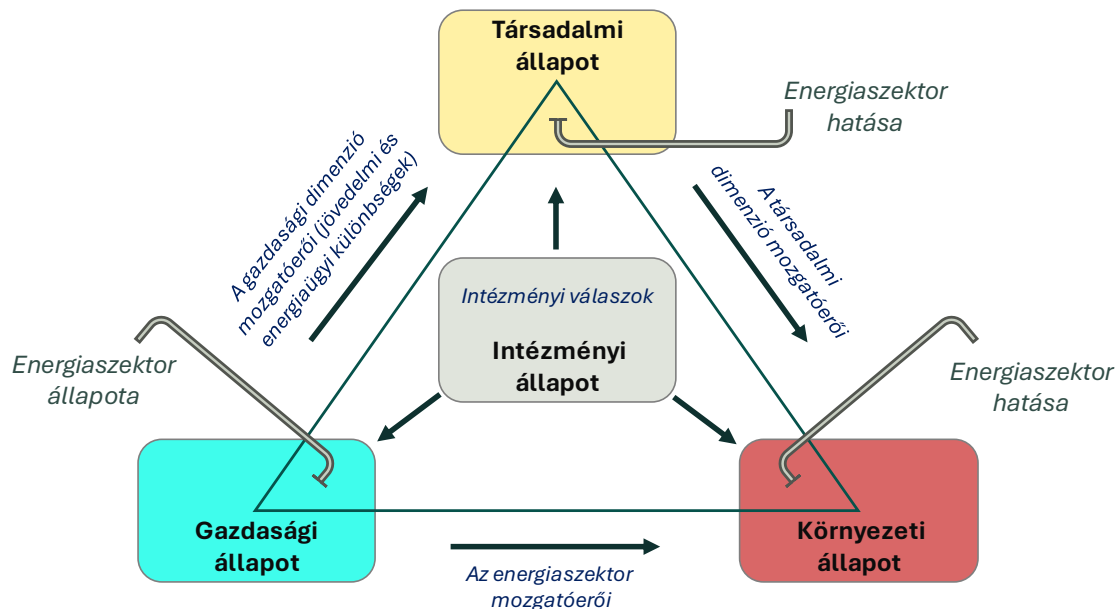
- ❖ *Környezeti Fenntarthatóság:* Ebben a dimenzióban az energiatermelés és -felhasználásnak környezeti tényezőit vizsgáljuk, a cél az, hogy minél kisebb legyen a negatív hatás. Olyan szempontok kerülnek előtérbe, mint az ÜHG-k és az egyéb szennyező anyagok kibocsátásának csökkentése, a megújuló energiaforrások előnyben részesítése a fosszilis tüzelőanyagokkal szemben, és a biodiverzitás védelme az energia infrastruktúrák kiépítése során, vízhasználat optimalizálása;
- ❖ *Gazdasági Fenntarthatóság:* A gazdasági fenntarthatóság energetikai kontextusban azt jelenti, hogy az energiarendszer hosszú távon stabil és jövedelmező a termelőknek, míg megfizethető marad a fogyasztók számára. Ez magába foglalja azon gyakorlatok körét, amelyek az energiaárak stabilitásának biztosítását, a beruházási és üzemeltetési költségek racionalizálását és csökkentését, az energiapiacok megfelelő szabályozását vagy például az energiahatékonyság növelését célozzák;
- ❖ *Társadalmi Fenntarthatóság:* A társadalmi fenntarthatóság a fenntartható energiagazdálkodásnak azt a vetületét jelenti, amely az energiarendszerek társadalmi igazságosságát és egyetemleges hozzáférhetőségét helyezi előtérbe, hozzájárulva ezzel az emberek jólétéhez. Ebbe a körbe tartozik az energiaszegénység csökkentését, az energiaellátás biztosítását, a helyi közösségek bevonását az energiatermelési és -felhasználási döntésekbe, valamint az energiaprojektek társadalmi elfogadottságának biztosítását célzó intézkedések.

A kérdés megától értetődően adódik: hogyan lehet ezeket mérni, a fejlődést kiértékelni? Milyen mérhető mennyiségi indikátorokat lehet párosítani az egyes tényezők minőségi jellemvonásaihoz?

A fenntartható energia és -gazdálkodás mérési kritériumainak meghatározására az SDG-k előtt is voltak már kezdeményezések. A WEA jelentéssel nagyjából egyidőben, a Nemzetközi Atomenergia-ügynökség 1999-es évről szóló jelentésében megjegyzi, hogy annak ellenére, hogy az energia alapvető tényező minden jellegű szocio-ökonómiai fejlődéshez, még nem készült külön erre fókuszáló indikátorlista, amely kiegészítené az ISD általános pontjait (IAEA, 2000). Ezért a Nemzetközi Energia Ügynökséggel, valamint az ENSZ Gazdasági és Szociális Ügyek Főosztályával (*UN Department of Economic and Social Affairs, UNDESA*) karöltve nekiálltak kidolgozni egy csak az energetikára fókuszáló indikátor eszközlístát (*Indicators for*

Sustainable Energy Development, ISED). Első körben 41 db indikátort határoztak meg négy dimenziót érintve: gazdasági, társadalmi, környezeti és intézményi vetületeit a fenntartható fejlődésnek (42. ábra) (IAEA, 2002).

42. ábra Az IAEA illusztrációja az energiarendszer fenntarthatósági dimenziói közötti összefüggésekről



Forrás: IAEA (2002) alapján saját készítésű ábra

Kezdetben az intézményi keretek rendelkezésre állását, valamint azoknak a megfelelő és hatékony támogatását külön dimenzióban vizsgálták. E dimenzión keresztül a politikai döntéshozók jogalkotási és végrehajtási tevékenységeik energetikai vonatkozású fenntartható fejlődésének értékelése volt a cél (IAEA, 2007).

Néhány évvel később, 2005-ben kiadták a felülvizsgált indikátorlistát, amely immáron 30 db-ra szűkült le, illetve az ISED-et is EISD-re cserélték (*Energy Indicators for Sustainable Development*). A hármas vetületben az alábbi vizsgálati szempontokat határozták meg, melyekhez egy vagy több indikátort is hozzárendeltek (a kapcsolódó lista elérhető a Függelék F7. táblázatában) (IAEA, 2005):

- ❖ *Társadalmi dimenzió:* Méltányosság (hozzáférhetőség, megfizethetőség, egyenlőtlenség) és egészség (biztonság);
- ❖ *Gazdasági dimenzió:* Termelési és fogyasztási minták (összfogyasztás, össztermelékenység, ellátás hatékonysága, előállítás, végfelhasználás, diverzifikáció, energiaárak) és biztonság (importfüggőség, stratégiai energiakészletek);

- ❖ *Környezeti dimenzió:* Léghő (éghajlatváltozás, levegőtisztaság), vízminőség és föld (talajminőség, erdő, hulladéktermelés és menedzsment).

Összességében az EISD-k olyan keretrendszert biztosítanak, amely segít az országoknak a fenntartható energiapolitikák és -stratégiák kidolgozásában és az implementáció ellenőrzésén. Ezek az indikátorok ma is használatban vannak, sőt az SDG-7 mérhetőségéhez nagyban hozzájárulnak. Mindazonáltal, a 11. táblázatban az látható, hogy nem mind a 30 indikátort rendelték hozzá az SDG-7 méréséhez.

11. táblázat A 7. fenntartható fejlődési célkitűzés (SDG-7) tartalma és indikátorai

#	Elhatározás	Központi elem	Indikátorok
7.1	2030-ra biztosítjuk a teljes körű hozzáférést a megfizethető, megbízható és modern energiaszolgáltatásokhoz	Egyetemleges hozzáférhetőség; Megfizethetőség; Megbízhatóság	7.1.1 Az villamos energiához való hozzáférhetőség népességen belüli aránya 7.1.2 A tiszta tüzelőanyagokra és technológiákra elsődlegesen támaszkodók népességen belüli aránya
7.2	2030-ra jelentősen megnöveljük a megújuló energiák részarányát a világ energiaellátásában	Megújuló energia	7.2.1 A megújuló energiaforrások részaránya a teljes végső energiafogyasztásban
7.3	2030-ra világviszonylatban megduplázzuk az energiahatékonyság fejlesztésének ütemét	Energiahatékonyság	7.3.1 Energiaintenzitás az elsődleges energiaforrások és a GDP arányában mérve
7.a	2030-ra megerősítjük a nemzetközi együttműködést, hogy megkönnyítsük a hozzáférést a tiszta energia kutatásához és technológiához, beleértve a megújuló energiát, az energia hatékonyságot, a fejlettebb és tisztább fosszilis tüzelőanyag-technológiát, továbbá támogatjuk a befektetéseket az energetikai infrastruktúrába és a tiszta energia technológiákba	Nemzetközi együttműködés; K+F támogatás; Technológia hozzáférhetőség	7.a.1 A fejlődő országokba irányuló nemzetközi pénzügyi mozgás a tiszta energiával kapcsolatos K+F, valamint a megújuló energiatermelés támogatására, beleértve a hibrid rendszereket is
7.b	2030-ra bővítjük az infrastruktúrát és fejlesztjük a technológiákat, hogy a fejlődő országokban mindenki számára biztosítsuk a modern és fenntartható energiaszolgáltatást, különösen a legkevésbé fejlett országokban, a kis, fejlődő szigetállamokban és a tengerrel nem rendelkező fejlődő országokban, azok támogatási programjaival összhangban	Infrastruktúra fejlesztés; Technológia korszerűsítés; Fejlődő országok támogatása	7.b.1 Telepített megújuló energiatermelő kapacitás a fejlődő országokban (egy főre jutó wattban kifejezve)

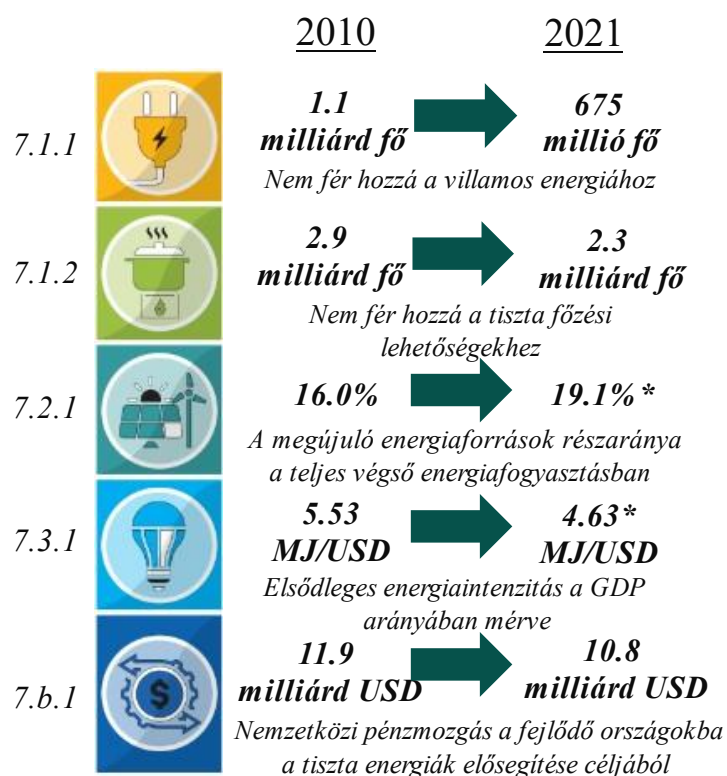
Forrás: UN (2018) és Zlinszky és Balogh (2016) alapján saját összeállítás

Az SDG-7 céljainak elősegítését igyekszik támogatni a Fenntartható Energia Mindenkinnek (*Sustainable Energy for All, SE4ALL*) című kezdeményezés is, mely szintén platformot nyújt a kormányok, a magánszektor, a civil társadalom, az akadémiai világ és más érdekelt felek számára, hogy tudást, legjobb gyakorlatokat és erőforrást megosztva segítse a fenntarthatóbb energiához való hozzáférést világszerte (*Sustainable Energy for All [SE4ALL]*, é.n.).

Ugyanakkor, hasonlóan az SDG-k összesített globális index értékelésénél, a legfrissebb adatok azt mutatják, hogy a világ nem jó úton halad az SDG-7 célkitűzéseinek teljesítése terén sem. Ahogy az a 43. ábrán is látható, bár jelentősen lecsökkent azon emberek száma, akik nem férnek hozzá áramhoz, még mindig kb. 675 millióan vannak, akiknek ezt nélkülözniük kell. Szintén jelentősen csökkent bő 10 év alatt a tiszta főzési lehetőséggel nem rendelkezők száma,

de volumenét tekintve még mindig 2,3 milliárd fő van hátrányos helyzetben ebből a szempontból. Említendő, hogy a népesség ezen része javarészt Afrikában, és kisebb részben Ázsiában él. Pozitív, hogy a megújuló energia részaránya a végső energiafelhasználásban mintegy 3 százalékponttal nőtt 10 év alatt, így átlagosan majdnem a teljes fogyasztás ötöde megújulókból származott 2021-ben világviszonylatban. Az energiahatékonysági intézkedések terén 2010 és 2020 között átlagosan évente mintegy 1,8%-os javulás volt tapasztalható szemben a várt 2,6%-os aránytól, így a következő 10 évben évente átlagosan az energiaintenzitásnak legalább 3,4 százalékkal kell javulnia, hogy behozza a lemaradást. Végezetül, a fejlődő országokba irányuló, a tiszta energia támogatására irányuló nemzetközi pénzáramok 2021-ben 10,8 milliárd USD-ra csökkentek, míg 2010-ben ez az összeg megközelítőleg 12 milliárd dollár volt. A visszaesés nem tűnik ugyan soknak, de ha hozzátesszük, hogy például 2017-ben több mint 26,4 milliárd dollár pénzáramlás történt a fejlődő országok irányába, ahhoz képest már egy közel 40%-os csökkenésről van szó (IEA et al., 2023).

43. ábra Az SDG-7 teljesítése felé tett globális szintű előrehaladás helyzete



*Csak 2020-as adat állt rendelkezésre.

Forrás: IEA et al. (2023) alapján saját készítésű ábra

A fenntartható energiagazdálkodás dimenzióihoz, valamint az SDG-7 célkitűzéseéhez, illetve indikátorkészletéhez szorosan kapcsolódik az **energiatriléma** koncepciója. Első

körben azt szükséges tisztázni, hogy miben tér el ezektől. Az okok térben, időben és megközelítésben keresendők. Először a térbeli és időbeli perspektívát tekintjük át.

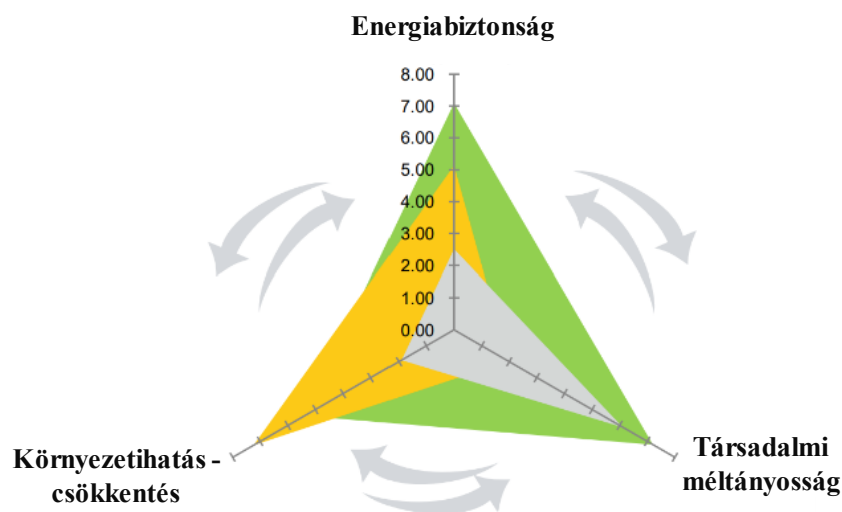
Az 1900-as években az ENSZ kulcsfontosságú szereplő volt a természeti erőforrások védelmének és a fenntartható fejlődés, illetve a később megfogalmazódott fenntartható energiafejlesztés útjának kitaposásában. Az ENSZ munkásságával párhuzamosan világszerte voltak kisebb-nagyobb kezdeményezések, melyek közül kiemelkedik az 1923-ban megalakult Világ Energia Tanácsa (*World Energy Council, WEC*), illetve az akkoriban még *World Power Conference* néven létrejövő kezdemény. Az energetika széles körével foglalkozó londoni szervezet fő fókuszába a Brundtland-féle jelentést követően kezdett egyre nagyobb teret nyerni a környezetvédelmi politika és a környezeti fenntarthatóság kérdésköre (*World Energy Council [WEC], é.n.-b*). Majd a 2000-es évek elején kiadásra került az *Energy for tomorrow's world: acting now!* című jelentés, amely többek között három fontos energiafejlesztési célkitűzést fogalmazott meg: az energia hozzáférhetősége (*accessibility*), rendelkezésre állása (*availability*) és társadalmi elfogadhatósága (*acceptability*), amelyet a WEC három „A”-jának is szoktak rövidíteni. Emellett megfogalmazódott az igény egy fenntartható energia keretrendszer felépítésére, amely segítene irányt mutatni és visszacsatolást adni a fenntarthatóbb energiarendszerek felé történő előrehaladást illetően. Az igény projektté fejlődött, és a WEC 2008-ban kiadta az *Energy Policy and Practices Index (EPPI)* háttéréül szolgáló módszertant és útmutatót. Ennek az volt a célja, hogy az egyes energiarendszerek teljesítményét fenntarthatósági és országspecifikus viszonylatban értékelje, így első körben klaszterezve, majd rangsorolva ezáltal az országok fenntarthatósági szempontú energiagazdálkodását. A megközelít hasonló volt, mint ahogy az ISED-nél is látható volt (42. ábra): intézményi, gazdasági, társadalmi és környezeti szempontból vizsgálták az országok teljesítményét összesen 50 indikátor segítségével, ahol mind a négy vetület egyenlő (25%) súlyt kapott az indexszámítás során (WEC, 2008). A keretrendszer 2009-ben finomhangolásra került, és átkeresztelték a módosított módszertanon alapuló pontrendszert *Assesment Index*-re (WEC, 2009).

A folyamatos újragondolást mi sem bizonyítja jobban, minthogy 2010-ben megint felülvizsgálásra került a metodika, ezúttal jelentősen átalakítva a kalkuláció módszertanát. Az index – melyet immáron *Energy Sustainability (Country) Index*-nek (ES(C)I) neveztek át – struktúráját tekintve a korábbi négy általános szempont konkretizálódott két vetületre: energetikai és ún. kontextuális teljesítménnyé. Előbbi az energiabiztonság (*energy security*), társadalmi méltányosság/igazságosság (*social equity*), valamint környezetihatás-csökkentés (*environmental impact mitigation*) dimenziókat jelentette rendre 25-25-25%-os súllyal, míg a

lokális tényezőknél a politikai, társadalmi és gazdasági erőt vették figyelembe egyenlő (8,3%) arányban. Így az új index az energiateljesítmény javára van súlyozva 3:1 arányban, illetve összesen 22 indikátort határoztak meg az összteljesítmény mérésére (WEC, 2010).

Ez az új módszertan alapján történő értékelés pedig elvezetett ahhoz a 2011-es jelentésben szereplő megállapításhoz, hogy ez az indexelés feltárta az „energia fenntarthatósági trilemmáját”, ugyanis e három energiateljesítményt leíró dimenzióban (44. ábra) egyszerre semelyik ország nem volt képes vezetni a listát (WEC, 2011).

44. ábra A WEC 2011-es jelentése szerinti energia fenntarthatósági trilemma



Forrás: WEC (2011) alapján saját szerkesztés

A WEC 2011-es jelentésnek három fontos gondolata volt ezzel kapcsolatban. Egyrészt megállapítja, hogy az akkori állás szerint rengeteg tennivalója van még a világ minden országának az energia fenntarthatóságának hármass problémáját illetően. Másrészt az indexelés eredménye alapján azt figyelték meg, hogy mivel valamennyi ország egyensúlytalanságban van a dimenziókat illetően, így valamiféle kompromisszum – idegen szóval élve *trade-off* – van az egyes dimenziók között. E gondolatmenet szerint a politikai döntéshozóknak olyan döntéseket kell hozniuk adott országspecifikus kontextusban, amelyek egy vagy két dimenziót erősítenek a harmadikkal szemben. Ennélfogva úgy fogalmaztak, hogy az energia fenntarthatósága magába foglalja a dimenziók közötti folyamatos kompromisszum keresést, amelyet minden országnak a saját rendszerét és egyedi faktorait figyelembe véve kell folytatnia. A jelentés a végén felteszi a nagy kérdést: lehetséges-e egyszerre mind a három területen elérni a céljainkat, azaz megvalósulhat-e az energia fenntarthatósági trilemmájának kompromisszummentes kiegyensúlyozása? A kérdés után rögtön a választ is megadják, mégpedig azt, hogy a jelenlegi

ismeretek tükrében tökéletes egyensúly egyszerre mindhárom dimenzió között nem lehetséges. A hangsúly azonban a „jelenlegi” jelzőn van, hiszen magát a keretrendszert is azért hozták létre, hogy segítsék az országokat és a döntéshozókat abban, hogy jobban megértsék az energiaellátás biztonsága, az energiához való hozzáférés és a környezetvédelem közötti összetett kapcsolatokat, és hogy ezeket az összetett kihívásokat a lehető legjobban kezeljék (WEC, 2011).

A 2011-es WEC jelentés tehát mérföldkőnek számított az energiatrilemma koncepciójának kialakulásában. Az ezt követő években még voltak finomhangolások, például a 2013-as jelentésben már nem a „*social equity*” és „*environmental impact mitigation*” dimenzió megnevezéseket használták, hanem rendre az „*energy equity*” (energia egyenlőség) és „*environmental sustainability*” (környezeti fenntarthatóság) elnevezéseket, illetve az indikátorlistát is bővítették 23-ra (WEC, 2013). 2014-ben az index megnevezése az ESCI-ről *Energy Trilemma Index*-re (ETI) módosult (WEC, 2014), amely 2016-ban már a ma is használatban lévő *World Energy Trilemma Index*-re (WETI) keresztelődött át. Az utolsó névváltoztatással együtt kibővült az indikátorok száma 35-re, miközben a súlyozás az energiatrilemma dimenziók és az országkontextus között átrendeződött 90-10% arányban, melyen belül a három dimenzió azonos súllyal szerepel (WEC, 2016).

Dolgozatom összeállítása során a legutolsó WETI jelentés a 2022-es évről szólt. A szervezet 2022-ben már 127 országot vizsgált meg 30 indikátor alapján, melyek kilétét teljeskörűen ebben az évben ugyan nem fedték fel, de szignifikánsan nem térhet el a korábbi időszakok elemzéséhez használt mutatóktól, illetve az alábbi három-három fő mutatót ismertették csak dimenzióként (12. táblázat).

12. táblázat A 2022-es WETI szerinti fő indikátorkészlet

Index-komponensek	Fő mutatók
<i>Energia biztonság (30%)</i>	Az energiafogyasztásának nettó importfüggősége és a beszállítók diverzifikációjának mértéke
	A villamosenergia-termelés forrás diverzifikációjának mértéke
	Az adott ország képessége az olaj- és gázkereslet kielégítésére, figyelembe véve az infrastruktúra kiépítettségét (beleértve a tárolási és finomítási kapacitásokat)
<i>Energia egyenlőség (30%)</i>	A villamos energiához való hozzáféréssel rendelkező lakosság százalékos aránya
	A hazai villamosenergia-árak, mint a háztartási és kereskedelmi célú megfizethető energiaszolgáltatások mérőszáma
	A hazai olaj- és gázárak
<i>Környezeti fenntarthatóság (30%)</i>	A végső energiafogyasztás GDP-hez viszonyított aránya
	A karbonmentes forrásokból származó villamosenergia-termelés százalékos aránya
	A fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből származó CO ₂ -kibocsátás egy főre vetített értéke
<i>Országspecifikus kontextus (10%)</i>	Az infláció szintje és a költségvetési politika fenntarthatósága
	A közszolgáltatások és a politikai rendszer minőségének megítélése
	Az ország innovációs képessége, beleértve a publikus K+F mennyiségét és minőségét

Forrás: WEC (é.n.-a) alapján saját összeállítás

Az energetikai teljesítmény értékelés során az ellátásbiztonság terén az importfüggőség, az áramtermelés energiamixe és az infrastrukturális kapacitások a mérvadóak, gazdaságosság terén a villamos energiához való hozzáférhetőség és az energiaárak nagysága, míg környezeti szempontból a végső energiaintenzitás, az áramtermelés karbonsemleges aránya, valamint az egy főre jutó CO₂-kibocsátás a fő szempontok. Ez tehát a három vetület fő szempontrendszer.

Az indexálás – melyet visszamenőlegesen egészen 2000-ig számoltak ki – rangsorolja és minősíti az országokat a három vetület és az országspecifikus kontextus szempontjából. Az értékelés során A-tól D-ig terjedő minősítéssel (kvartilisekkel) látják el az adott ország teljesítményét rendre az energiabiztonság, gazdaságosság, környezeti fenntarthatóság és országspecifikum terén. Így az „AAAA” jelenti azt, hogy az adott ország minden téren jól teljesített, míg a „DDDD” ennek éppen az ellenkezőjét takarja (WEC, 2022). A rangsorolás alapján a 2022-es év TOP10 ország helyezését a 13. táblázat tartalmazza.

13. táblázat A 2022-es WETI szerinti TOP10 ország

Ország	Minősítés	Indexpont	Helyezések			
			Összesített	Energia-biztonság	Energia egyenlőség	Környezeti fenntarthatóság
Svédország	AAAa	84,3	1.	4.	19.	1.
Svájc	AAAa	83,4	2.	27.	7.	2.
Dánia	AAAa	83,3	3.	14.	11.	4.
Finnország	AAAa	82,7	4.	3.	23.	13.
Egyesült Királyság	AAAa	82,4	5.	10.	12.	7.
Kanada	AAAa	82,3	6.	1.	12.	26.
Ausztria	AAAa	82,2	7.	9.	13.	11.
Franciaország	AAAa	81,1	8.	13.	22.	6.
Norvégia	BAAA	81,0	9.	42.	10.	3.
Németország	AAAa	80,6	10.	6.	20.	16.

Forrás: WEC (2022) alapján saját összeállítás

A jelentés szerint a legjobban teljesítő 10 ország köre nagyjából megegyezik az előző évek rangsorával. A TOP10 listából egy kivétellel mind európai, illetve három kivétel mind EU-s ország. E listát Svédország vezeti már másodszorra, amely nem csak összesítettben, hanem környezeti fenntarthatóság aspektusában is első helyezést ért el. Svédország világviszonylatban vezeti a karbonsemleges áramtermelés rangsorát, hiszen 2022-ben csupán 0,4%-ban hasznosított széntüzelésű erőművet áramfejlesztés céljából, egyébként csak megújuló és atomenergiára támaszkodott. Továbbá energiabiztonság szempontból a természeti erőforrásokban gazdag Kanada nyerte el az első helyet, míg energia egyenlőség terén Luxemburg ért el maximális pontszámot, melynek közép-európai elhelyezkedése előnyös az integrált energiapiacok tekintetében, valamint itt található Európa legalacsonyabb energiaadója és a legmagasabb egy főre jutó GDP-je. Egyébként összesített helyezésben az Egyesült Államok 14. (AACa), Oroszország 44. (ABCc), Kína 59. (ABCb), valamint India 96. (BDDc) helyezést ért el (WEC, 2022).

A WETI tehát egy hasznos eszköz arra, hogy képet kaphassunk adott országok gazdasági, társadalmi és környezeti helyzetükről energiateljesítményük oldaláról. A rangsorolást, illetve a mögöttes számítási rendszert azonban érdemes fenntartásokkal kezelni. Az indexek száma az elmúlt években dinamikusan változott. Nehéz meghúzni azt a vonalat, amelyre azt lehet mondani, hogy adott mennyiségi és minőségi változó elegendő információkat nyújt valamennyi országról. Mindig lesznek kivételek vagy specifikus esetek, amikor például egy olyan mutató kerül ki az eszköztárból, mely az esetek 90%-ban nem nyújtott szignifikánsan új értéket, csupán a maradék 10% számára – ezen országok így nem megfelelő (testreszabott) szempontrendszer

szerint lesznek kiértékelve. Továbbá, a rendszerszemlélet fontossága itt az országok gazdasági összekapcsoltságán keresztül jelenik meg, tehát egy adott ország által az elért helyezés relatív annak függvényében, hogy egy másik ország milyen helyezést ért el, főleg, ha e két ország között szoros gazdasági együttműködés valósul meg. Az indexelés nem teszi lehetővé az újabb energiapolitikai irányok és döntések hatásainak azonnali mérését, sem az egyes szakpolitikák hatékonyságainak országok közötti összehasonlítását, és nem is tesz javaslatot arra vonatkozólag, hogy min kellene javítani az energiapolitikai irányvonalban. Végezetül, a mutatórendszer az adatok elérhetősége miatt nem képes valós időben értékelni az országokat. Ha pedig határidő előtt hiányzik egy adatsor, úgy azt valamilyen becsléssel (pl. csoportátlagolással) helyettesítik, mely értelemszerűen torzíthatja az eredményeket. Természetesen nem létezik tökéletes, minden szempontot maradéktalanul és egyetemlegesen figyelembe vevő szempontrendszer, amivel teljesen egységesen, igazságosan és minden részletre kiterjedően lehetne értékelni az országok energia szempontú teljesítményét konzisztensen az idő előrehaladtával. Mindazonáltal, a WETI egy jó kezdeményezés erre.

Az energiatrilemma koncepció és módszertan kialakulásának térbeli és időbeli elhelyezése után érdemes még szót ejteni a fenntartható energiagazdálkodás és az energiatrilemma megközelítésbeli hasonlóságáról és különbségéről. Mindkettő rendszerszemléletben gondolkodik, ezáltal több szempontot, kapcsolatot és kölcsönhatást vesz figyelembe az adott rendszeren belül. Ebben az integrált megközelítésen belül azonban a hangsúlyok eltérnek. A fenntartható energiagazdálkodás – az erős fenntarthatóság *38. ábrán* látható elvét követve – elsősorban a hosszú távú környezeti fenntarthatóságra összpontosít, amely szerint a természeti erőforrásokat és az ökoszisztémákat nem szabad maradéktalanul kizsákmányolni vagy helyettesíteni. Ez azt jelenti, hogy a környezeti célokat, mint például a globális éghajlatváltozás elleni küzdelmet és a megújuló energiaforrások használatának növelését prioritásként kezeli még akkor is, ha ez rövid távon gazdasági vagy társadalmi kompromisszumokat igényelhet. Ez a beágyazottság oda vezet, hogy a társadalmi, majd a gazdasági fenntarthatóság akkor jöhet létre, ha a környezeti megvalósul. Ezzel szemben az energiatrilemma egyrészt szűkebb, azaz megfoghatóbb megközelítést alkalmaz, hiszen az átfogó gazdasági-társadalmi-környezeti nézőpontok helyett konkrétan az energiaellátás biztonságára, megfizethetőségére és egyenlőségére, valamint a környezeti fenntarthatóságra összpontosít. Másrészt pedig egy dinamikusán változó, ugyanakkor egy kiegyensúlyozott megközelítést keres e három szempont között, melyek kritikusak az energiarendszerek hosszú távú fenntarthatósága szempontjából. A kompromisszumkészség tehát itt is megjelenik, de

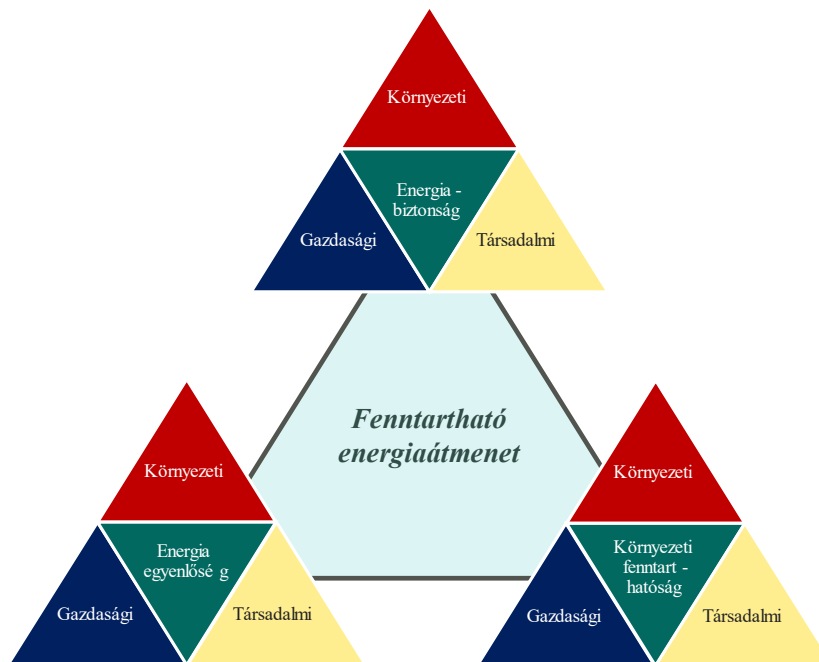
alapvetően nem helyezi az egyik szempontot a többi fölé, szemben a fenntartható energiafejlődés koncepciójával.

Kísérletet tehetek arra vonatkozólag is, hogy az energiatrilemma egyes vetületeit megfeleltethessem a fenntartható energiagazdálkodás minden egyes dimenziójának, hiszen szoros a kapcsolat, nagy az átfedés. E kapcsolat multidimenzionális és egymásba fonódó jellege miatt nem lehetséges az egy-az-egyben megfeleltetés, hanem épp ellenkezőleg, külön vetületenként lehet vizsgálni a gazdasági-társadalmi-környezeti hatásokat, hiszen ezek közvetlenül és közvetetten megjelennek mindegyik kiemelt nézőpontban (45. ábra):

- ❖ **Energiabiztonság:** *Társadalmi aspektusban* az energiaellátás biztonsága, tehát a hozzáférhetőség és folyamatos elérhetőség alapvető fontosságú a társadalmi stabilitás és az általános jólét szempontjából, hiszen hozzáférést biztosít a világunk alapvető szolgáltatásaihoz, mint például a fűtés, világítás, kommunikáció, közlekedés, amelyek elengedhetetlenek a modern társadalom működéséhez. *Gazdasági értelemben* közvetlen hatással van a gazdasági stabilitásra és növekedésre, a jelen és jövő társadalmak szükségleteinek kielégítésére, az infrastruktúrák megítélésére és az importfüggőség mértékére, és vice versa. A kínálati zavarok gazdasági károkat okozhatnak, negatívan befolyásolva valamennyi szektor tevékenységét. Ugyanakkor megjelenik az energiaellátás biztonságának *környezeti vetülete* is, hiszen nagyban támaszkodunk fosszilis tüzelőanyagokra, amelyek jelentős negatív hatással vannak a környezetünkre, az egyes erőművek építésének körülményei szorosan kapcsolódnak az ökoszisztéma rendszerekhez;
- ❖ **Energia egyenlőség:** Az energia megfizethetősége alapvető a *társadalmi egyenlőség* és a szegénység csökkentésének szempontjából. A magas energiaárak akadályozzák az alacsony jövedelmű háztartásokat az alapvető szolgáltatásokhoz való hozzáférésben. A megfizethetőség, amely tehát szorosan kapcsolódik a társadalmi jóléthez, tágabb értelemben véve a lakosságon felül a *gazdasági* élet szereplői számára is kritikus fontosságú tényező. Emellett a termelői oldalról nézve az erőművek kapacitási faktorai, az előállítási és működési folyamatok hatékonysága, valamint fogyasztói szempontból az energia hatékonyabb, a tényleges szükségleteknek megfelelő felhasználása meghatározó mind a termelői és fogyasztói költségek, a gazdasági versenyképesség és az importfüggőség szempontjából, mind pedig a *környezeti* hatások tekintetében. Hiszen az energiahatékonyság növelésén keresztül a teljes végső energiafelhasználás csökkenése közvetlenül hozzájárul a környezeti terhelés redukálásához, kevesebb károsanyag-kibocsátást eredményezve;

- ❖ **Környezeti fenntarthatóság:** Talán itt lehet a legkönnyebben megfeleltetni egymással a két megközelítést, hiszen a környezeti dimenzió az energiatrilemmában közvetlenül is megjelenik a három vetületben. A környezeti szempontok ebben a vetületben elsősorban a tiszta és egészséges környezet megőrzését jelentik, amelyet a környezetvédelmi intézkedések, valamint a tiszta és megújuló energiaforrásokhoz való hozzáférhetőség tesz lehetővé, amely lényeges a *társadalom* jólétének perspektívájából. A zöld gazdaság ösztönzése új *gazdasági* lehetőségeket és piacokat (körkörös gazdaság, zöld kötvények és ESG szempontú befektetések, azaz zöld pénzügyek, zöld adózás és karbonsemlegesség kompenzációja stb.), valamint technológiai-infrastrukturabeli változásokat (pl. megújuló folyamatos integrációja, decentralizált rendszerek kialakulása, GreenTech és különféle okos megoldások elterjedése) generálhat. Mindezek *környezeti* szempontból együttesen hozzájárulnak a természetes ökoszisztémák védelméhez, a szennyezés csökkentéséhez, a biodiverzitás megőrzéséhez és a természeti erőforrások fenntartható használatához.

45. ábra A fenntartható energiagazdálkodás három dimenziójának kapcsolódási pontjai az energiatrilemma vetületeivel



Forrás: Saját készítésű ábra

Ebből az összekapcsoltsági vizsgálatból is jól látszik, hogy nem lehet *ceteris paribus* vizsgálni egy-egy vetületet, mivel a mögöttes gazdasági-társadalmi-környezeti megfontolások mély átfedésben vannak egymással.

Az ábrámon megjelenik még egy fontos pont az energiatrilemma középpontjában (egyensúlyában?), amelyről mind idáig érdemben nem került elemzésre: a **fenntartható energiaátmenet**. A következőkben erről lesz szó.

5.2.1. Fenntartható energiaátmenet az energiatrilemma egyensúlyában

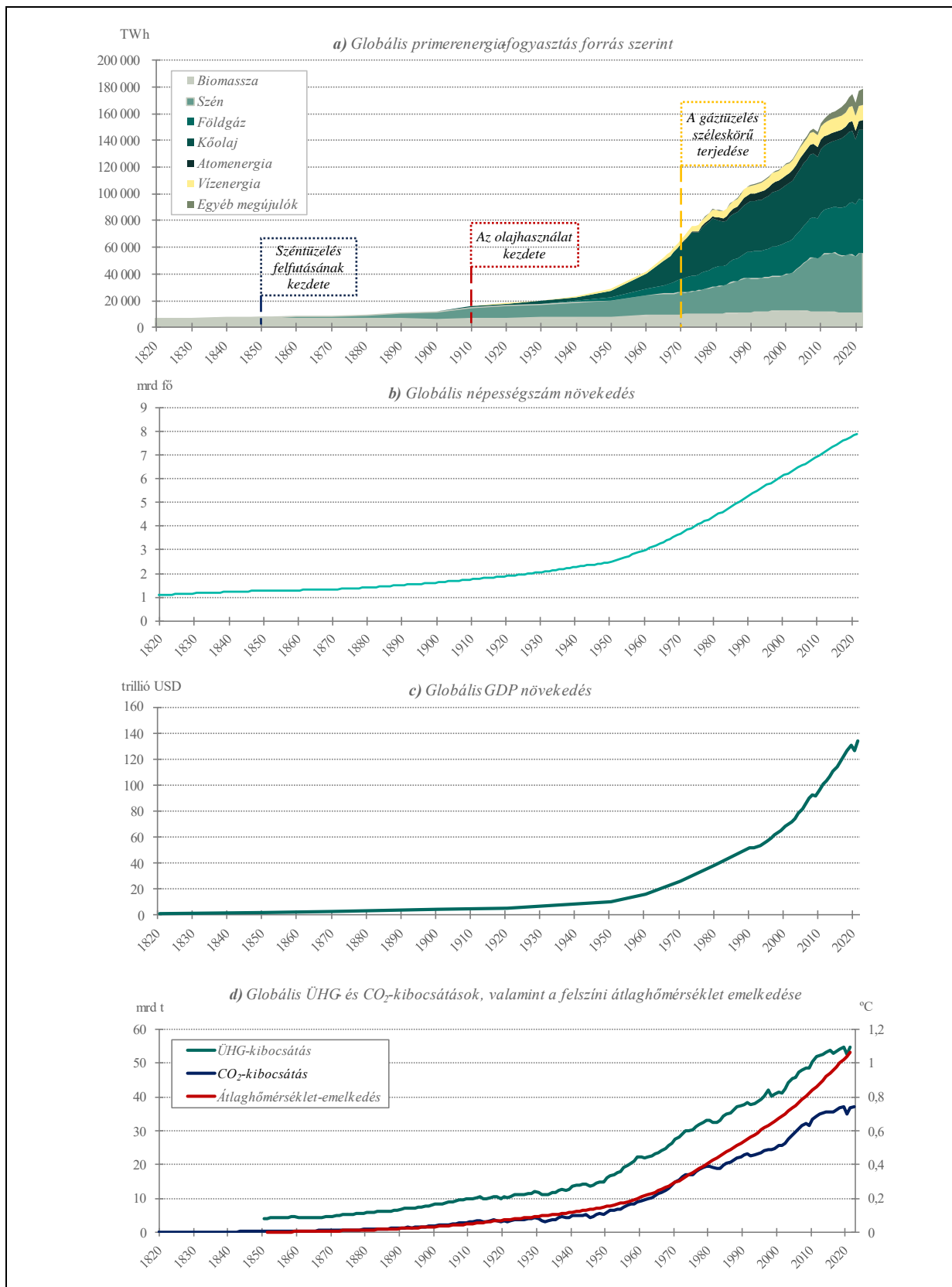
Az energiaátmenet fogalmának nincs a tudományos szakirodalomban egységesen elfogadott, standard definíciója, azonban minden egyes változat mögött ugyanaz a nézőpont húzódik meg (Sovacool, 2016). Smil (2017b) úgy definiálta, mint az elsődleges energiaellátás összetételének (szerkezetének) megváltozása, azaz az energiaellátás adott mintázatából történő fokozatos áttérés egy új energiarendszerbe. Egy másik megfogalmazás szerint az energiaátmenet az energiatermeléshez használt tüzelőanyagforrás és a kapcsolódó technológiák időbeli változása (Miller et al., 2015). Hasonlóképpen fogalmazott Fouquet és Pearson (2012) is, akik szerint az energiaátmenet folyamata voltaképp egy vagy több energiaforrástól és technológiától függő gazdasági rendszerről történő átállás egy másikra. Látható, hogy ezek a megközelítések elég általánosnak minősülnek és nem korlátozódnak le az energiaforrások egy bizonyos körére. Ugyanakkor sokszor e koncepció arra helyezi a hangsúlyt, hogy a fosszilis tüzelőanyagok helyett tiszta energiafelhasználás felé történjen az elmozdulás. Ez igaz napjainkra, a jelenleg is zajló energiaátmeneti törekvésekre, ugyanakkor a történelem során nem ez az első energiaátmenet, amely lezajlott.

Az emberi történelem során több jelentős energiaátmenet is történt, amelyek alapvetően átformálták a társadalmakat és gazdaságokat, és hatással voltak az emberi környezetre. Smil átfogó műveiben az emberiség eddigi időszakát négy részre kategorizálta az energiaátmenetek tekintetében. A legelső a tűz kontrollált használatának elsajátításához köti, amely lehetővé tette az alapvető főzést, fűtést és a ragadozók elleni védelmet. Ez tehát a hagyományos biomassza-tüzelést jelentette, azaz közvetetten a napenergia hasznosítást. Majd a földművelés megjelenésével a napenergiát gyakorlatilag közvetlenül élelmiszer-termelésre fordítottuk, amelyhez állati és emberi izomerő (élőmunka) mellett pl. szél- és vízenergiát is hasznosítottunk (malmok), azaz új technológiákat vezettünk be. Ezt az első kettőt az iparosodás előtti energiaátmeneteknek tekinti, hiszen a harmadik energiaátmenet motorját az ipari forradalom jelentette. A két ipari forradalom nem egy éles, mindenhol egyszerre bekövetkező esemény

volt, hanem különböző régiókban különböző módon zajlott le. Ez volt az egyik legjelentősebb energiaátmenet, amikor a világ a fa(biomassza)tüzelésről a fosszilis tüzelőanyagokra – elsősorban szén, később pedig kőolaj és földgáz – tért át. Ez hatalmas gazdasági növekedést és társadalmi változásokat hozott, forradalmasítva ezzel a lakossági és ipari szektort egyaránt. Másik oldalról viszont ez az energiaátmenet járult hozzá a globális felmelegedés jelenségéhez is. Végezetül, a 21. században korunk energiaátmenetét a megújuló és tiszta energiaforrásokra való átállás jelenti, amely szorosan kapcsolódik az éghajlatváltozásra és a környezeti fenntarthatóságra vonatkozó aggodalmakra (Smil, 2017b, 2018).

Ezek az energetikai átállások tehát sokkal többről szóltak, mint csak az egyik energiaforrásról a másikra való áttérés, hiszen alapvetően befolyásolták az energiaátmenetek a gazdasági-társadalmi-környezeti aspektusokat, messze legjelentősebben a harmadik energiaátmenet során. Ez rendkívül jól vizualizálható az alábbi négy részből álló ábrán keresztül, ahol az első ábrán (*46.a ábra*) a globális energiaátmenet szakaszai láthatóak a primer energiafogyasztás energiamixén keresztül, melyet lekövet a globális népességszám (*46.b ábra*), a GDP (*46.c ábra*), valamint az ÜHG, CO₂-kibocsátás és a földfelszín átlaghőmérsékletének növekedése (*46.d ábra*).

46. ábra A harmadik energiaátmenet gazdasági-társadalmi-környezeti hatása



Forrás: Bolt és Luiten van Zanden (2020), Energy Institute (2023), Friedlingstein et al. (2022), Gapminder (2022), Jones et al. (2023), Smil (2017b), United Nations (2022) és World Bank (2023) alapján saját készítésű ábra

A korábbi energiaátmenetek lassú folyamatok voltak. A gőzgépet ugyan már 18. században kifejlesztették, de a szén csak az 1900-as évek elején váltotta fel a korábbi domináns energiaforrást, a hagyományos biomasszát. Továbbá a szénfelhasználás a globális elsődleges energiafogyasztásban a csúcsot az első világháborút követően érte el (1920: 54,4%), köszönhetően a szénpiac méretgazdaságosságának, amely helyezés egészen az 1960-as évek elejéig tartott, amikortól is a kőolaj megelőzte. A kőolaj aránya az energiamixben 1978-ban tetőzött (42,6%) és dominál a mai napig, habár a földgázhasználat széleskörű elterjedése átrendezte az arányokat a fosszilis tüzelőanyagokon belül (2022: szén – 25,1%, kőolaj – 29,6%, földgáz – 22%).

Ahogy arra Smil (2018) és az *46.a. ábra* is rámutat, a történelem arra is rávilágít, hogy nem is hagyjuk abba egy meglévő energiaforrás kiaknázását. A tradicionális biomassza-tüzelés, azaz az emberiség első energiaforrásának felhasználása például csak a második évezredforduló körül érte el a csúcspontját. Ez éppen az ellenkezője annak, mint amire most szükségünk van. Továbbá, a korábbi energiaátmenetek mindig az olcsóbb, elérhetőbb és nagyobb energiasűrűségű energiaforrásokra való átállást jelentettek, amely egyben a korábbiakhoz képest magasabb EROI-értékeket eredményezett. Korunk energiaátmenete ebben is eltér: azonnali, a nemzetközi szervezetek és a nemzeti kormányok energiapolitikái által irányított folyamatra van szükség, amelynek ráadásul olyan erkölcsi vonatkozása van, amely inkább hasonlít egy egzisztenciális küzdelemre, mint a korábbi energiaátmenetek gazdasági mozgatórugóira, hiszen a jelenlegi technológiai szint mellett a megújuló megoldások gyengébb EROI-val rendelkeznek. Elvégre a sorban negyedik energiaátmenet fő célja egy olyan energiarendszer változás, amellyel megvalósulhat globálisan a nettó nulla kibocsátás elérése, a tiszta, megbízható, elérhető és megfizethető energiaforrások alkalmazása.

Ez más megközelítésben azt is jelenti, hogy a jelenlegi energiaátmenetnek elsődlegesen környezeti fenntarthatósági célkitűzései vannak, de ugyanúgy megjelenik benne a fenntarthatósági keretrendszer másik két aspektusa is. Ez tehát egy hármas célkitűzés, hiszen kizárólag a megújuló energiaforrásokra történő átállás (1.) még nem feltétlenül garantálná a karbonsemlegességet (gondoljunk itt a biomassza-tüzelés karbonlábnyomára), de a tiszta energia használata már igen (2.), míg a gazdasági-társadalmi szempontok (3.) együttes figyelembevételével már elméleti szinten tiszta helyett fenntartható energiáról beszélünk. Ez a gondolatmenetet pedig elvezet arra a következtetésre, hogy a fenntartható energia, mint cél eléréséhez önmagában nem elégséges a fosszilis tüzelőanyagok megújuló energiákra történő cserélését sürgető energiaátmenetre törekedni; annak egyben fenntarthatónak is kell lennie

elsősorban környezeti, de összességében gazdasági-társadalmi-környezeti vetületben is. Tehát **fenntartható energiaátmenetnek** kell teljesülnie a cél elérésének az érdekében.

Ennek a fenntartható energiaátmenetnek gyakorlatilag megegyeznek a mérési kritériumai az energiatrilemmánál részletezett indikátorkészlettel, a különbség a hangsúly elhelyezésén van, amit jól mutatnak az IEA (2019) energiaátmenet fókuszú vizsgálódásai. Ez ugyan kiemeli, hogy egyetlen mutató sem képes teljes mértékben megragadni a tiszta energiára való átállás összetettségét, de a legátfogóbb mutató erre a célra a vizsgált ország vagy régió energiarendszeréhez kapcsolatos karbonkibocsátása, hiszen ahogy korábban a globális éghajlatváltozás témakörénél is kiemeltem, a világ CO₂-kibocsátásának közel 90%-ért az energiaszektor a felelős.

A fenntarthatóság témakörének összefoglalásához Caradonna (2022) gondolataival összhangban arra a következtetésre tudok jutni, hogy maga a kifejezés a gyakorlatban mindenekelőtt az éghajlatváltozáshoz kapcsolódik, afféle korrekciós tónusban. Ahogy a szerző is megjegyzi, a fenntarthatóság nem csupán egy szinonima a környezetvédelemre. A fenntarthatóság elemzése komplex rendszerek vizsgálatát jelenti, ahol a cél összefüggések keresése a társadalom, a gazdaság és a természeti világ között. A fenntarthatóság és a környezetvédelem története bizonyos mértékig összefonódott, közös bölcsőből ered, de a fenntarthatóság koncepciójának kiteljesedése jóval túlmutat a környezetvédelmi megmozdulásokat alakító gondolkodók kánonján. A fenntarthatóság története éppúgy minősül társadalom-, politika- és gazdaságtörténetnek, mint környezettörténetnek.

Következésképpen a fenntarthatóság energetikai kontextusa, a fenntartható energiagazdálkodás és a fenntartható energia koncepciók röviden azon az alapelven nyugodnak, hogy a természeti erőforrásokat energetikai célokra úgy kell felhasználni, hogy az ne ártson a környezetnek, fenntartható legyen a gazdaság számára, és támogassa a társadalmi jólétet. Előbbi a keretet és módszertant biztosítja, míg utóbbi azon energiaforrások és -hordozók körét jelenti, amelyek megfelelnek ennek a keretrendszernek, tehát végső soron a cél ezek kizárólag használata. A fenntartható fejlődés különféle energia szempontú indikátorai pedig lehetővé teszik az előrehaladás mérését is az energiastratégiát megalkotó szerveknek.

Ezeknek az indikátoroknak intézményesített rendszerezése mentén alakult ki az energiatrilemma koncepciója, amely nagyon hasonlít a fenntartható energiagazdálkodás három dimenziójának megközelítéséhez. Habár előbbinek vetületei bizonyos mértékig azonosíthatók a fenntartható energiagazdálkodásával, a kapcsolatok összetettebbek, mint egy egyszerű egy-az-egyhez megfeleltetés. A fenntartható energiagazdálkodás három dimenziója többnyire a szigorú fenntarthatóság alapelveire és céljaira összpontosít az energiarendszerek átfogó hatásait

vizsgálva, ahol a környezeti fenntarthatóság fontossága előtérbe kerül. Ehhez képest az energiatrilemma egy specifikus keret, amely az energetikai kihívások és következmények, valamint az energiapolitikai döntéshozatal összefüggéseit helyezi előtérbe azáltal, hogy három kulcsfontosságú és megfogható nézőpont közötti egyensúly jelentőségét hirdeti.

Tehát az energiatrilemma konkrét szempontrendszerként használható a fenntarthatóság energetikai célkitűzéseiben, ahol akárcsak általánosságban a fenntartható élet és jóllét, úgy energetikai szemszögből a fenntartható energia elméletileg az elérendő idilli állapot, a végső cél. Ebből explicite az következik, hogy még nem értük el. Ezzel azonban vagy egy probléma. Ahogy Tester (2012) is rámutat, a legszigorúbb értelemben véve a fenntartható energia az, amelyet anélkül lehet kiaknázni, hogy végső soron kedvezőtlen hatást gyakorolnánk a Föld bioszférájára. Azonban a tudomány és a technológia jelenlegi ismeretei szerint nem létezik egyelőre ilyen formája az energiaszolgáltatásnak. Valamennyi primer energiaforrás és -hordozó felhasználása feltételez valamekkora földhasználatot vagy kitermelést, ami negatív hatással lehet az ökoszisztémákra, illetve végül mindezen kitermelt anyagok és felhasznált technológiák visszakerülnek a bioszférába, mint szervesetlen hulladékok és emissziók, ahol a mérgező és károsanyag kezelési gyakorlatok legalább olyan fontosak, mint az előállítási folyamat minősége, így összességében kell vizsgálni az ökológiai hatásokat. Az energiarendszer komplexitása és interakciója a gazdasági, társadalmi és környezeti szférával nehezen felfogható és felmérhető. Másrészt viszont Tester konzervatívan úgy vélekedik, hogy általánosságban az lehet fenntartható (vagy legalábbis fenntarthatóbb) energia, amelyek nettó hatása nem befolyásolja szignifikánsan a bioszféra működését. Egyetértve ezzel a gondolatmenettel, a dolgozatomban ezt a perspektívát fogom követni.

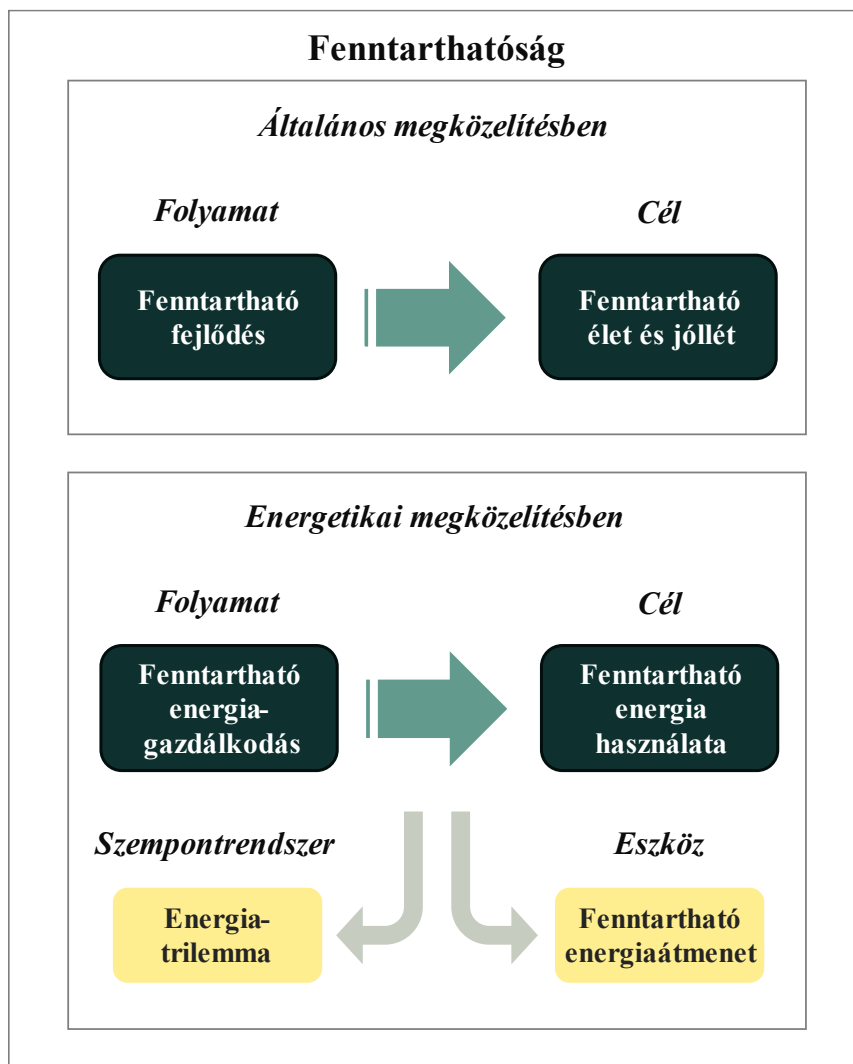
A nettó zéró kibocsátási cél a jelenlegi energiaátmenettel – amely általánosságban az energiaforrásaink és kapcsolódó rendszereink használatának gyökeres megváltoztatását jelenti – szemben olyan elvárását támaszt, ahol a fenntarthatósági, kiváltképp a környezeti fenntarthatóság kerül fókuszba a tiszta energiaforrásokra való átállás sürgetésével. Ez – akárcsak a fenntartható energia – a jelenlegi tendenciák és technológiák mellett ma még elérhetetlennek tűnik, de a trendek hamar változhatnak a technológiai innovációk és a gazdasági-társadalmi együttműködések tekintetében, különösen, ha közben a bolygónk élhetősége a tét.

Következésképpen a fenntartható energiaátmenet is csak egy „fenntarthatóbb” energiarendszer felé vezethet, amelynek fenntarthatósági jellege időben dinamikusan változik, és melynek egyszerre kell ezekre választ adnia energiabiztonság (pl. jelenlegi és jövőbeli energiaigények, fizikai rendszerek megbízhatósága, megújuló időjárásfüggő jellege,

importfüggőség kérdése, geopolitikai feszültségek hatásai), egyenlőség (tehát megfizethetőség, energiaszegénység, hozzáférhetőség, erőművek beruházási és üzemeltetési költségei, támogatások) és környezeti fenntarthatóság (éghajlatváltozás, ÜHG- és CO₂-kibocsátás növekedése, levegőminőség és földhasználat állapota, természeti ökoszisztémák védelme). Ugyanakkor, ha ez sikerül, akkor teljesül a három dimenzió fenntarthatósága, így megvalósulhat az energiatrilemma elméleti egyensúlya is.

Az egész 5. fejezet gondolatmenetét a 47. ábra foglalja röviden és szemléletesen magába.

47. ábra A fenntarthatóság általános és energetikai megközelítése



Forrás: Saját készítésű ábra

Ahhoz, hogy a végcélhoz eljuthassunk, abban nagy szerepet játszanak a politikai döntéshozók és az általuk kialakított energiastratégiák és jogszabályok. Hiszen minden döntés következménnyel jár, melynek előzetes felmérése az energetikai rendszerek komplexitása miatt

rendszer szemléletet és holisztikus megközelítést igényel, hogy azoknak a gazdasági, társadalmi, környezeti és természeti rendszerekkel való kölcsönhatásait megfelelően értékelhessük és átfogó képet kaphassunk arról, hogy döntéseinkkel végső soron min javítottunk, és min rontottunk. Mivel szigorúan véve teljesen fenntartható energiagazdálkodás csak elméletben létezik, döntéseinknek mindig lesz negatív következménye, a kérdés már csak az, hogy adott esetben melyik oldal (dimenzió) szempontjait helyezzük előtérbe. Összetett kérdés összetett megoldásért kiált. Ez a dilemma – pontosabban trilemma – pedig a fenntartható energiagazdálkodás legnagyobb kihívása. Az energiapolitika így ebben a szempontrendszerben keresi az egyensúlyt a felállított megfogható és mérhető részcélokon keresztül a három lehetőség közötti gyakori választás kényszerűsége miatt.

A fenntarthatóság általános és energetikai kontextusának részletes elméleti áttekintése után az EU energiapolitikájának és villamosenergia-rendszerének perspektívájából fogom megvizsgálni az energiatrilemma és -átmenet megjelenését.

6. Az EU energiasztratégijának alakulása villamosenergia-piaci vetületben

A következőkben először az EU jogszabályi környezetét fogom megvizsgálni az alapítási előzményekig visszamenőleg, majd a multiválságok bemutatása és az azokra adott energiapolitikai válaszlépések bemutatását követően az EU energiapiaci trendjeit fogom elemezni. Mindezt az energiatrilemma szemszögéből végezve.

Az EU energiapolitikai története szorosan kapcsolódik magának az EU intézményének és kapcsolódó egyezményeinek alakulásához, így ez fogja nyújtani a kiindulási pontot. Ugyanakkor nem célozom teljeskörűen minden határozatra és intézményre, bizottsági közleményre kitérni, csupán azokra, amelyek elsősorban illeszkednek a gondolatmenethez és a végkifejlethez. És bár az energiatrilemma és -átmenet szempontú vizsgálódások nem korlátozódnak le a villamosenergia-rendszerre, de a villamos energia átalakítása és előállításának az egyik legkritikusabb és leginkább szem előtt lévő aspektusa a társadalomnak.

Továbbá fontosnak tartom leszögezni itt is, hogy nem lehet *ceteris paribus* vizsgálódást végezni, azaz helytelen lenne részéről az olyan kijelentés, hogy egy adott politikai döntés, szervezet létrehozás stb. csak és kizárólag egy célterületet szolgált az energia hááromszögében. Közvetetten valamennyi esetben több nézőpont is mindig megjelenik. Ugyanakkor a célozom az áttekintéssel, hogy azt a perspektívát ragadjam meg, amelyik talán a legközelebb áll a döntés mögötti mozgatórugóhoz vagy a következményekhez.

6.1. Energiapolitikai irányzatok és döntések a 2020-as évekig

A második világháború véres konfliktusainak lezárulása után Európa romokban hevert az évek óta tartó fegyveres összecsapások nyomán. A pusztítás mértéke rávilágított a kontinens sürgős újjáépítésének és a nemzetek közötti tartós békének szükségességére. 1949-ben megalakult az Észak-atlanti Szerződés Szervezete (*North Atlantic Treaty Organisation, NATO*), mint védelmi szervezet, valamint létrejött az Európa Tanács (*Council of Europe*), amely a demokrácia előmozdítását, valamint az emberi jogok és a jogállamiság védelmét hivatott megvalósítani kormányközi alapon. Egy évvel később Robert Schuman, Franciaország külügyminisztere előterjeszti egy új európai politikai együttműködés tervét a tartós béke és az újjáépítés céljából. E kettő cél ötvöződését Schuman a nyugat-európai szén- és acélipar integrációjában látta, mivel az újjáépítéshez nagy mennyiségű acélra lesz szükség, amelynek

előállításában, illetve a villamosenergia-termelésben kulcsfontosságú a széntermékek előállítása és felhasználása. Ehhez azt is hozzá kell tenni, hogy a szén és az acél nemcsak az újjáépítéshez, hanem a hadviseléshez is nélkülözhetetlenek voltak, így e készletek fölötti közös és átfogó kontroll megakadályozhatja az újabb háborúk kitörését a kontinensen. Így 1951-ben aláírták a Párizsi Szerződést, majd 1952-ben megalakult az Európai Szén- és Acélközösség (ESZAK), vagy más néven Montánunió (*European Coal and Steel Community, ECSC*), amelyet hat európai ország alapított (Franciaország, Olaszország, Belgium, Luxemburg, Hollandia és az akkori NSZK) és 50 évig volt hatályban (Kaposi, 2007).

Habár az ESZAK nem energiapolitikai döntéshozatal következménye volt, de a szén- és acélipar feletti közös ellenőrzésen keresztül hozzájárult az európai integráció előmozdításához, amely a későbbi években az EU energiastratégiájának és -politikájának alapját is jelentette. Hiszen a szén, mint akkoriban domináns energiahordozó közös ellenőrzése hozzájárult az energiaellátás biztonságának növeléséhez azáltal, hogy csökkentette az egyes országok közötti konfliktusok kockázatát és elősegítette a források stabil és megbízható hozzáférését. Továbbá, az ESZAK által létrehozott mechanizmusok, mint például a közös piac kialakítása a szén és acél számára, elősegítették az európai országok közötti gazdasági együttműködést és integrációt is. Tehát nem túlzás azt kijelenteni, hogy az európai energiapiacok története az ESZAK megalakulásával kezdődött.

Az európai integráció szélesítésére voltak további kezdeményezések még az 1950-es években (pl. az Európai Védelmi Közösség vagy az Európai Politikai Közösség létrehozása), de csak az 1957-es római szerződések (melyek 1958-ban kerültek hatályba) vezettek eredményre, ugyanis ennek keretén belül többek között az ESZAK alapítói létrehozták az Európai Gazdasági Közösséget (EGK) (*European Economic Community, EEC*). Ez – a béke és szociális céljai mellett – voltaképp az ESZAK kiterjesztését tűzte ki célul valamennyi gazdasági területre vonatkoztatva, megteremtve ezzel az tagállamok gazdasági integrációját először vámunió, majd később a közös piac létrehozásával. A belső vámok és egyéb kereskedelmi akadályok fokozatosan történő megszüntetése tehát az első lépés volt, amit a közös vámunió létrehozása követett a tagállamok és harmadik országok közötti kereskedelemét illetően (Kengyel, 2016). Szektorális fókuszban ekkor a mezőgazdaság, közlekedés és kereskedelem került, közvetlenül az energiaszektor még nem, ugyanakkor közvetetten a szabadabb kereskedelem és a piaci integráció hozzájárult az energiahordozók hatékonyabb elosztásához és kereskedelméhez a tagállamok között.

A római szerződések másik fontos hozománya az Európai Atomenergia-közösség (*European Atomic Energy Community, Euratom*) megalakulása volt. Az Euratom

létrehozásának elsődleges célja az volt, hogy keretet nyújtson az atomenergia békés célú és hatékony felhasználásának kutatására, illetve közös műszaki biztonsági szabványok létrehozására és a beruházások finanszírozására (Horváth, 2001). Ennek két előzményét emelném ki. Egyrészt az 1950-es években a kőolaj-használat a primer energiafogyasztásban rohamosan növekedni kezdett, amely csökkentette a szén iránti keresletet, kedvezőtlen helyzetbe hozva a szénipart, így az ESZAK által ellenőrzött hagyományos iparágakat. A kőolaj már korábban is részletezett előnyei, mint például a nagyobb energiasűrűség hozzájárult ahhoz, hogy sok iparág kőolaj-tüzelésre, benzin és dízel használatára váltsón, ez pedig az akkori energiamix diverzifikációjához vezetett. Ennélfogva a kőolajellátás biztonságának kérdése fokozódott, amely rámutatott Európa sebezhetőségére az olajimport tekintetében, különösen az olyan geopolitikailag instabil régiókból, mint a Közel-Kelet – gondolok itt például az 1956-os szuezi válságra, hiszen a nemzetközi olajszállítás jelentős része a Szuezi-csatornán keresztül zajlott (Nagy, 2005). Másrészt, a kőolajellátás biztonságpolitikai kérdése mellett a nukleáris energiában rejlő fejlesztési lehetőségek további kiaknázása (egyaránt energiatermelési és fegyverkezési aspektusban) is felfutóban volt az 50-es években. De nem csak a beruházás finanszírozási kérdések megoldása igényelt kooperációt az érdekelt felek között, hanem a fission atomenergia alapjául szolgáló nukleáris fűtőanyagok megfelelő elérhetősége és hozzáférhetősége is lényeges szempont volt. Összességében az akkoriban készült tanulmányok arra a következtetésre juttatták a politikai döntéshozókat, hogy további nukleáris fejlesztésekre van szükség a kőolajimport-függőség csökkentése, valamint az egyébként hosszú távon kimerülő szénlelőhelyek pótlása miatt. Emiatt a nukleáris energiahordozók közvetlen, míg a kőolaj ellátásának közvetett okai is meghúzódtak az Euratom alapítása mögött (Horváth, 2001). Egyébként az Euratom szervezete – két másik, szintén ekkortájt megalapított nemzetközi szervezet, az ENSZ által létrehozott IAEA, valamint az OECD által megalapított NEA mellett – még ma is működik, rendelkezik saját szabályozási kerettel és felügyeli a nukleáris biztonságot és a nukleáris anyagok felhasználását és kereskedelmét az EU-n belül.

Könnyen belátható, hogy annak ellenére, hogy se az ESZAK, se az EGK és Euratom létrehozása elsődlegesen nem energiapolitikai döntések következménye volt, mégis háromból kettő már a nevében is tükrözi az energetikai dimenziókat. Egyébként e három szervezet végrehajtó szervei a 60-as évek második feléig párhuzamosan működtek egymás mellett. 1966-ban az Egyesítő szerződés (*Merger Treaty*) ratifikálásakor, amely 1967-ben lépett érvénybe, összevonták a párhuzamosan működő intézményeket és egységesen Európai Közösségek (*European Communities*) nevezték jelzővel illették meg őket (Kaposi, 2007).

Az 1960-as évek közepén a kőolaj átvette a vezető szerepet a széntől világ primer energiafogyasztásában, így az ellátásbiztonság még kritikusabbá vált az ásványkincs regionális eloszlása miatt. Nem véletlen, hogy 1968-ban az Európai Bizottság (EB) kidolgozta az „Első irányvonalak a Közösségi energiapolitikához” (*First guidelines for a Community energy policy*) irányelvet, amely az első direkt mérföldkő volt az EGK energiapolitikájának alakulásában. Ez több javaslatot tartalmazott az energiaellátás biztonságának és stabilitásának céljából. Ilyen volt például az, hogy a tagállamok törekedjenek minimum 90 napnyi átlagkészlet fenntartására kőolajtermékekből, jobban diverzifikálják az energiaforrásaikat (pl. atomenergiával), termelési és fogyasztási oldalról is törekedjenek az energiahatékonyság növelésére. Továbbá, a jelentés felhívta a tagállamok figyelmét az energiaszektor közös piacba történő integrációjának hiányára, azaz egy közösségi energiapolitika kialakításának fontosságára (COM(68) 1040 final). A javaslatcsomag fogadtatása vegyes volt, tükrözve az európai integráció korai kihívásait, különösen az egyes tagállamok energiaügyekkel kapcsolatos szuverén döntési jogaik tekintetében (Kengyel, 2020). Így az 1990-es évekig valódi cselekvés nem történt ez ügyben.

Mindazonáltal, az ellátásbiztonsági problémákhoz vezető regionális konfliktusok nem csillapodtak. A Szezi-válság után a térségben fennmaradt geopolitikai feszültségek hozzájárultak későbbi konfliktusok kitöréséhez, úgymint az 1967-es Hatnapos háború és az 1973-as jom kippuri háború. A csatorna és környéke az 1967-es háborúban harcok színterévé vált, ami további károkat okozott. A háború után a csatorna egészen 1974-ig zárva maradt, részben a vízben hagyott roncsok és az elaknásított területek miatt, mely komoly gazdasági nehézségeket okozott az olajszállításban és kereskedelemben. Az 1973-as háború kirobbanása tovább tetőzte ezt a folyamatot, hiszen az OPEC-tagállamok által meghirdetett olajembargó és az olajtermelés csökkentése hirtelen és jelentős emelkedést okozott az olajárakban világszerte, további súlyos gazdasági következményekkel sújtva a nyugati országokat, így az EGK-t is. Az olajárak emelkedése miatt az európai országok gazdaságai, amelyek jelentős mértékben függtek az olajimporttól, gazdasági visszaeséssel szembesültek. Emellett az olajáremelkedés növelte a termelési költségeket, ami az infláció növekedéséhez és a fogyasztói árak emelkedéséhez vezetett. Az 1970-es évek energia-megpróbáltatásai azonban itt még nem értek véget. Az 1979-es olajválság kiváltó oka az iráni forradalom volt, amely az iráni olajtermelés jelentős csökkenéséhez vezetett, amely – tapasztalva az első olajválságot – pánikhangulatot generált és megint csak globális szinten olajellátási problémákhoz, illetve áremelkedéshez vezetett (Cini & Pérez-Solórzano Borragán, 2019; Ray, 1976).

Az 1970-es évek olajválságai még jobban rávilágítottak Európa energiaellátásának sebezhetőségére és az olajimport függőségére, és jelentős hatással voltak az európai országok energiapolitikájának alakulására. Ennek hatására az EB elkezdett foglalkozni kezdeményezési és javaslati szinten a közösségi energiapolitikával és -stratégiával. Az EB 1974-es felülvizsgálatát követően két közleményt is kiadott („*Európai Közösségek Energiaprogramja*”, „*Közösségi energiastratégia kimunkálása*”), amelyeknek fontos elemei voltak az energiaárak, a piaci zavarok kiküszöbölésének lehetőségei, valamint az energia-külkapcsolatok (Kengyel, 2016). Emiatt az Európa Tanács az első olajválságot követően határozott a következő 10 év közösségi energiapolitikai célok elfogadásáról, melyek központi eleme az energiainportfüggőség és a primer energiafelhasználás csökkentése volt meghatározott bázisadatok mellett. Ez tehát már konkrét energiapolitikai intézkedés megfogalmazását jelentette, amely tovább mélyítette a közös energiapolitikát (Haffner, 2019). Az olajválságok arra ösztönözték az országokat, hogy fokozzák az energiatakarékosságot, támogassák a diverzifikálják az energiamixüket és fejlesszék az energiaellátás biztonságát. E célból hozták létre az első olajválságot követően az OECD keretén belül az IEA-t is, hogy a tagállamok közötti koordinációval és együttműködéssel javítsák az ellátásbiztonságot. Ez az autonóm intézmény azóta is kulcsszerepet játszik a nemzetközi energiapolitikában, de ma már a fenntartható energiaátmenet elősegítése van a fókuszpontjában, melyhez megbízható és átfogó adatokkal, elemzésekkel és szakpolitikai ajánlásokkal járul hozzá (IEA, é.n.-a).

Ezeknek az olajválságoknak a közvetlen hatásai az európai villamosenergia-piacokra kevésbé voltak olyan súlyosak, mint az olajpiacokra. Ennek oka, hogy bár az olaj fontos szerepet játszott néhány ország energiamixében, a villamosenergia-termelés ebben az időszakban Európában elsősorban szénre, nukleáris energiára és vízenergiára támaszkodtak az országok, amelyek kevésbé voltak közvetlenül érintettek az olajárak emelkedésében. Ugyanakkor közvetetten a gazdasági visszaesés időszakosan csökkentette az áramkeresletet, illetve ahol elszórtan kőolajat használtak tüzelőanyagként, ott az áremelkedés begyűrűzött. Emellett ekkor még a nemzeti energiarendszerek szigetszerűen működtek, a villamosenergia-rendszer infrastruktúrái még nem voltak összekapcsolva, csupán néhány átviteli vonal működött egy-egy szomszédos ország között.

Megemlítendő még az 1986-os csernobili atombaleset következménye is, amely rávilágított a nukleáris energia használatával kapcsolatos kockázatokra és beárnyékolta a hosszú távú lehetőségeket. A tagállamok nemzeti szinten szigorították a nukleáris létesítmények biztonsági előírásait és ellenőrzési rendszereit. Jóllehet, a baleset nyomán Európa-szerte erősödött az atomenergia-ellenes közvélemény, több országban is újra

megvitatották a nukleáris energia jövőjét, és már szóba került egyes esetekben moratórium bevezetése az új erőművek építésére, illetve a meglévők fokozatos leállításaik terve (Cini & Pérez-Solórzano Borragán, 2019).

Mindeközben az EGK kibővült Dániával, az Egyesült Királysággal és Írországgal (1973), Görögországgal (1981), valamint Spanyolországgal és Portugáliával (1986). Az integrációs folyamatok, illetve a folytatólagos gazdasági motivációk megkövetelték a római szerződés revízióját az egységes piac bevezetésének céljából. A létrejövő Egységes Európai Okmányt (*Single European Act*) 1986-ba ratifikálták, egy évvel később lépett hatályba, és az egységes piac megteremtésének 1992. év végéig történő bevezetésének célját tűzte ki célul, amely az ún. „négy alapvető szabadság”, tehát a javak, szolgáltatások, tőke és munkaerő tagállamok közötti szabad áramlását hivatott megvalósítani, ezzel is elősegítve a gazdasági növekedést, a versenyképességet és az integrációt. Az egyezmény nem kezelte külön az energiapolitika kérdését, de a szélesebb piaci keret az energiapiacok későbbi integrációjához vezetett (Kaposi, 2007). Ugyanakkor, az egyezmény ratifikálásával először került be explicit módon a környezetvédelem fontossága az Európai Közösség alapszerződéseibe, jogalapot biztosítva a természeti erőforrások védelmét és a környezetszennyezés csökkentését célzó közös környezetvédelmi politikához (Document L:1987:169). Az egybeesés nem véletlen, ha párhuzamba hozzuk a korábban leírtakkal, hiszen 1972-ben volt az első stockholmi ENSZ-konferencia az emberi környezetről, illetve 1987-ben jelent meg a Brundtland-féle jelentés a fenntartható fejlődésről.

A Szovjetunió 1991-es felbomlását követően lehetőség nyílt a szélesebb körű európai energetikai együttműködések megvalósítására. Erre jogi alapot nyújtott az 1994-es Energia Charta Szerződés, amelyet 44 ország írt alá és melynek elsődleges célja a posztsovjet országok integrációjának elősegítése a nyugati világ piacaiba, és kiterjed az energiakereskedelem valamennyi aspektusára (kereskedelem, szállítás, beruházás, energiahatékonyság). Ez tehát újabb lépés volt a közösségi szintű energiapolitika kialakításában (Kengyel, 2020).

Az Egységes Európai Okmány által bevezetett reformok és intézkedések megalapozták az utat az Európai Közösségek további fejlődésében, ami a Maastrichti Szerződés aláírásához vezetett 1992-ben. Ennek köszönhetően 1993-ban megalakult az Európai Unió, amely jelentős intézményi és szervezeti változásokat hozott az EGK struktúrájában. A gazdasági-politikai integráció elmélyítése az EU hárompilléres szerkezetében csúcsonodott ki (Európai Közösség, közös kül- és biztonságpolitika, valamint bel- és igazságügyi együttműködés). Energetika szempontjából viszont továbbra sem tartalmazott kapcsolódó fejezetet a szerződés, ugyanakkor

a környezetvédelmet hivatalos uniós szakpolitikai területté tette (European Parliament, é.n.; Kaposi, 2007).

Az EU megalakulását követően már nem kellett sokat várni arra, hogy az energiapiacok helyzete és szükséges reformjai a fókuszpontba kerüljenek. Rögtön két perspektívából jöttek javaslatok és irányelvek: a megújuló energiaforrások és az energiapiaci integráció szempontjából. Az EB 1996-ban tette közzé a megújuló erőforrásokról szóló ún. zöld könyvét, mely áttekintést nyújtott a megújuló energiaforrásoknak az EU energiamixében betölthető szerepéről és felhívta arra a figyelmet, hogy az EU várható energiainport-függősége 2020-ra már 70% körül fog alakulni, amely energiaellátás-biztonsági aggodalmakat vet fel. Ebben viszont megoldást jelenthetnek a megújuló energiákban rejlő lehetőségek kiaknázása (COM(96) 576 final). Rá egy évvel később elkészült az ún. fehér könyv, mely már konkrét nemzeti cselekvési terveket, pénzügyi ösztönzők és támogatási rendszerek bevezetését, valamint K+F folyamatok felfokozását tartalmazta, míg a dokumentum fő célkitűzése az volt, hogy a megújuló energiaforrások piaci részesedése 2010-re érje el a 12%-ot. A cél az akkori kontextusban elég ambiciózusnak minősült és hozzájárult a későbbi még inkább ambiciózusabb energiapolitikai célkitűzések meghozatalához (COM(97) 599 final). Mindkét konzultációs dokumentum felhívta a figyelmet a megújuló energiaforrások energiamixben való növelésének pozitív hatásaira az importfüggőség csökkenésén, az árak stabilitásán, a versenyképesség növelésén és a környezetvédelmi szempontok tekintetében.

Ezzel párhuzamosan elindult az EU villamosenergia- és gázpiacainak liberalizációja. Erre azért volt szükség, mert a nemzeti piacok még monopolizáltak voltak, és párhuzamosan az egyéb gazdasági ágazatok liberalizációs és integrációs törekvéseivel, az energiaszektorban is meg kellett nyitni a lehetőséget a versenyre. A fokozatos piaci nyitás keretén belül meg kellett különböztetni az iparág versenyképes (pl. fogyasztók ellátása) és nem-versenyképes (pl. hálózatok üzemeltetése) részét. Utóbbiaknál szabályozásra került a hálózathoz való hozzáférhetőség elve piaci szereplők számára. Továbbá fontos követelmény volt az is, hogy a vertikálisan integrált vállalatok válasszák szét (*unbundling*) hálózati (átviteli és elosztási) tevékenységeiket a termeléstől és kereskedelemtől, elősegítve ezzel a tisztességes versenyt és megakadályozva az érdekkellentéteket. Ennek az ún. első energiacsomagnak (*First Energy Package*) a villamosenergia-piac liberalizációjával foglalkozó irányelve (Directive 96/92/EC) 1996-ban jelent meg, míg a gázpiac liberalizációjáról szóló irányelv (Directive 98/30/EC) 1998-ban követte azt, és melyek rendre 1998-ban és 2000-ben kerültek adoptálásra a tagállamok jogszabályzataiban (Haffner, 2019). Emellett 1996-ban az EB a transzeurópai energiahálózatok (*Trans-European Networks for Energy, TEN-E*) kialakítására vonatkozó

iránymutatásokat határozott meg mindkét energiapiachoz kapcsolódóan, melyeknek elsődleges célja az energiaellátás biztosítása, valamint a gazdasági és szociális kohézió erősítése (Decision No. 1254/96/EC).

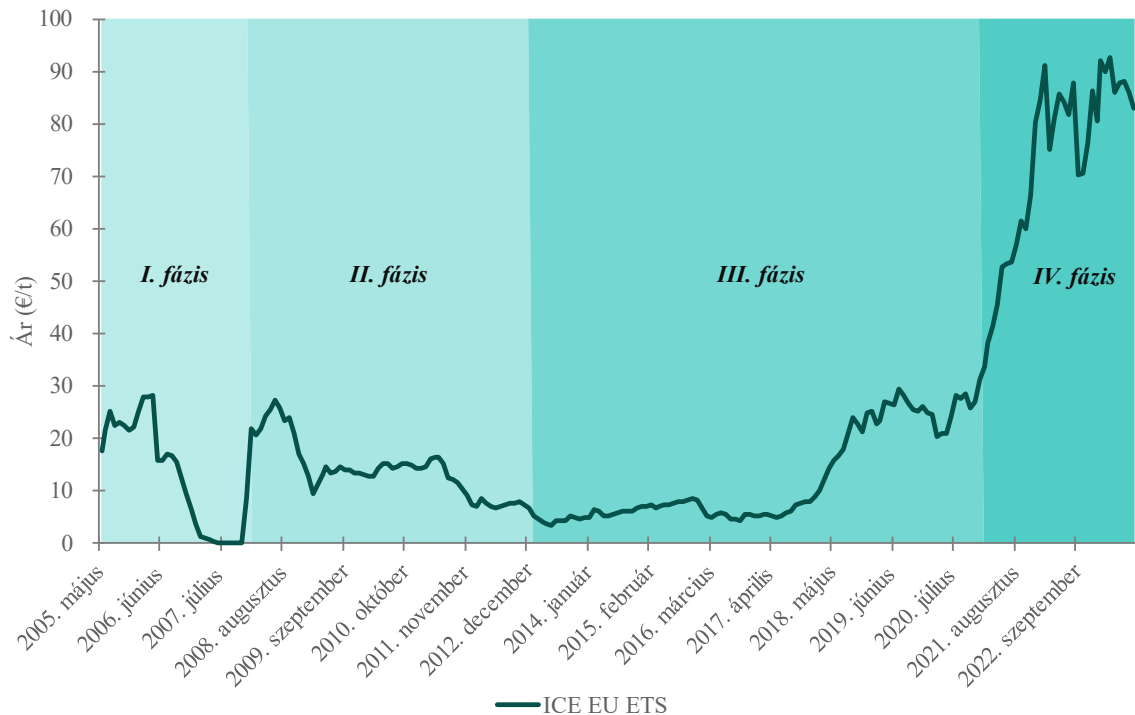
Jelentős mérföldkő volt az EU működésének fejlődésében az 1997-ben aláírt, majd 1999-ben életbe lépő Amszterdami Szerződés, melynek ugyan fő célja ugyan az EU intézményi struktúrájának és döntéshozatali mechanizmusainak újra tervezése, például a kül- és biztonságpolitika, illetve a bel- és igazságügyi együttműködés tekintetében, de azt is előírta, hogy a fenntartható fejlődés előmozdítása érdekében a környezetvédelmet minden uniós ágazati politikába be kell építeni (European Parliament, é.n.; Document C:1997:340).

Eközben a világban zajló nemzetközi klímakonferenciák folyamatosan hatással voltak az EU-s energiapolitikai irányvonalakra. Habár már az Európai Bizottság 2000-es zöld könyvére is hatással volt az 1997-es kiotói jegyzőkönyv, ez még elsősorban az energiaellátás-biztonságát helyezte előtérbe, kijelentve az EU strukturális gyengeségét az ellátásbiztosítás terén az olajimport-függőség tekintetében, és felhívta a figyelmet az infrastruktúra fejlesztésének szükségességére (COM(2000) 769 final). Ugyanakkor, a 2001-es irányelv a megújuló energiákról (Directive 2001/77/EC) az EU első, kifejezetten a megújuló energiával kapcsolatos jogszabálya volt, amely a villamosenergia-termelés megújuló energiaforrásokból való előmozdításáról szólt, konkrét jogi keretet és kötelező célokat meghatározva a megújuló energiaforrásokból származó villamosenergia-előállítás részarányának növelésére. Ebben az irányelvben már a környezeti fenntarthatóság volt a domináns szempont, így a klímaváltozás elleni küzdelem és az ÜHG-kibocsátásának csökkentése. A jogszabály átültette és felturbózta a korábbi fehér könyv javaslatait, legfőképp azt, hogy immáron az EU-nak átlagban el kell érnie 2010-re egy legalább 22%-os megújuló energiaforrásokból származó villamosenergia-termelés arányt. Az irányelv mind a 15 tagállam (1995-ben csatlakozott Ausztria, Finnország és Svédország) számára külön indikatív célkitűzéseket állapított meg, ösztönözve azokat arra, hogy dolgozzanak ki és hajtsanak végre nemzeti cselekvési terveket a megújuló energiaforrások használatának növelése érdekében. Emellett voltak egyéb energetikai szempontú irányelvek a 2000-es évek elején, úgymint az épületek energetikai teljesítményéről szóló irányelv (Directive 2002/91/EC), amely az épületek energiahatékonysági követelményeit, kapcsolódó tanúsítványait és az energiahatékonysági szempontok figyelembevételét tárgyalta az épületek tervezése és felújítása során. Vagy például a bioüzemanyagok használatának előmozdításáról szóló direktíva (Directive 2003/30/EC), amely a közlekedési szektort célozta meg a fosszilis üzemanyagoktól való függőség és az ÜHG-kibocsátás csökkentése céljából.

A Kiotói Jegyzőkönyvnek volt egy olyan fontos vonatkozása is, amely jogilag kötelező célokat állapított meg az ÜHG-kibocsátás csökkentésére a fejlett országok számára. Ennek az EU energiapolitikájába történő átültetése 2005-ben történt meg a 2003/87/EC direktíva alapján (Directive 2003/87/EC), amely bevezette az uniós kibocsátáskereskedelmi rendszert (*EU Emission Trading System, EU ETS*). Ez kezdetben kísérleti jelleggel működött, majd 2008-ban vált teljesen működőképessé. Az összes EU tagországon kívül jelenleg Izland, Liechtenstein és Norvégia is a szabályozói rendszer hatálya alá tartozik, a közös cél pedig az ÜHG kibocsátásának csökkentése a Kiotói Jegyzőkönyvben és a későbbi Párizsi Megállapodásban meghatározott ütemtervnek megfelelően (IEA, 2020a).

Az EU ETS alapvetően úgy működik, hogy meghatároz egy felső határt azon európai uniós kibocsátási egység mennyiségre (*EU Allowances, EUA*), amit a résztvevő vállalatok, gyárak és erőművek összességében kibocsáthatnak. Ez a felső határ évről évre csökken, így ösztönzi a kibocsátások csökkentését. Minden egyes kvóta egy tonnának megfelelő mennyiségű CO₂ egyenértékű ÜHG mennyiségének kibocsátását engedélyezi a birtokosnak (EC, 2016; Hafner & Luciani, 2022). A szükséges kvóták egy részét ingyenesen allokálják a rendszerben résztvevőknek különféle ágazati átlagok és az adott létesítmények teljesítménye alapján. Az ingyenes allokáció mértéke azonban fokozatosan csökken, így a rendszer arra ösztönzi a vállalatokat, hogy befektessenek a kibocsátás csökkentésére irányuló technológiákba, illetve hatékonyabban működjenek. A kvóták egy jelentős részét a tagállamok által megszervezett aukciókon értékesítik. Továbbá, ha egy vállalatnak több kvótája lett, mint amennyi a tényleges kibocsátásához szükséges, eladhatja a felesleges kvótáit más vállalatoknak az ún. másodlagos piacon (EC, 2021; Rathmann, 2007). Az ICE-n kereskedhető EUA árak a másodlagos piacot tükrözik (48. ábra). Ezek a mechanizmusok együtt biztosítják, hogy a kibocsátási kvóták a legtöbb gazdasági szereplő számára elérhetőek legyenek.

48. ábra A szén-dioxid kvóta árának alakulása az egyes fázisok függvényében



Forrás: Investing.com (é.n.) alapján saját készítésű ábra

Az EU ETS nem minden ágazatot érint egyformán, de valamennyi energiaigényes iparág (pl. vas-, acél-, üvegyártás, cement- és vegyipar-gyártás stb.), a kereskedelmi légi szállítványozás és az energiaszektor a hatálya alá tartozik. Továbbá, a rendszer fázisokra oszlik, amelyek alatt a kibocsátási kvóták allokációjának és a rendszer aktuális szabályainak megállapítása történik, építkezve az előző időszak tapasztalataira. Az első fázisban a kvóták nagy részét ingyen osztották ki, míg a 2008-2012 közötti időszakban már szigorodtak a kibocsátási határok és elkezdődtek az aukciók is. Ebben és a második fázisban az volt megfigyelhető a piacon, hogy a CO₂-kibocsátás folyamatos csökkenése miatt az EUA árai is csökkentek, mivel a piacon egyre több kvóta állt rendelkezésre. Ezért 2018-ban tovább szigorították a rendszert, csökkentették a felső határokat, megváltoztatták a szabad kiosztás módszereit, és fokozatosan, évente növekvő mértékben csökkentették a piacon hozzáférhető kereskedhető kibocsátási egységek számát. Erre a piac már megfelelően reagált, és az EUA ára emelkedésnek indult (Hafner & Luciani, 2022). Tehát az EUA-k költségei növelik a fosszilis tüzelőanyag-alapú erőművek működési költségeit. Minél magasabb az EUA ára, annál költségesebb a CO₂-kibocsátás. Ezért az áramár jellemzően tükrözi ezeket a többletköltségeket.

Az EUA-k árai a historikus tapasztalatok alapján ingadozhatnak, amely szintén növeli a villamos energia árának volatilitását.

A CO₂-kibocsátási engedélyek bevezetése egy közvetett támogatási mechanizmust jelentett a megújuló energiaforrások számára, hiszen a rendszer közvetve támogatja a megújuló energiák terjedését azáltal, hogy beárazza a CO₂-kibocsátást és megdrágítja a fosszilis tüzelőanyag-alapú entitások működését. Ugyanakkor, más kompenzációs formák is léteztek, a gyakorlatban a tagállamok különböző szakpolitikai eszközöket alkalmaznak, például kötelező átvételi tarifákat (*Feed-in-Tariff, FiT*), piaci áron felüli prémiumokat (*Feed-in-Premium, FiP*), beruházási támogatásokat vagy adókedvezményeket (Bhattacharyya, 2011). Németországban már például az 1991-es villamosenergia-betáplálásról szóló törvény (*Stromeinspeisungsgesetz*) rendelkezett a FiT-ről (IEA, 2013).

A megújuló energiaforrásokra való fókuszálás mellett azonban az energiapiacok liberalizációs és integrációs folyamatai még nem értek véget. Az első energiacsomag eredményei azt mutatták, hogy jelentős tagállami különbségek voltak, a piacnyitás nem egyenlő mértékben történt meg. Ezért az EU módosította a korábbi vonatkozó irányelveket, és 2003-ban újakat fogadott el a villamosenergia-piacra (*Directive 2003/54/EC*) és a gázpiacra (*Directive 2003/55/EC*) egyaránt. Ebben még szigorúbb szabályozási rendszert állítottak fel (bevezették a funkcionális és jogi szétválasztást is), előírták az EU összes energiapiacának teljes liberalizációját 2007-re, ami azt jelentette, hogy minden fogyasztó (beleértve a lakossági fogyasztókat is) szabadon választhat energiaszolgáltatót (Haffner, 2019). Továbbá elrendelték nemzeti független energiapiaci szabályozó hatóságok felállítását is. A villamosenergia-piacokhoz kapcsolódóan volt egy olyan irányelv is, amely a határokon átnyúló villamosenergia-kereskedelem előmozdítását szolgálta, szabályozva a határokon átnyúló átviteli tarifákat és kapacitásokat (Kengyel, 2016). Tehát összességében az ún. második energiacsomag gazdasági szempontokat helyezett előtérbe az EU energiapiacainak további nyitásával és integrációjával, valamint a verseny és kereskedelem növelésével.

Miközben a korábbiakban részletezett WEC évről évre foglalkozik a három „A” energiafejlesztésének témakörével, a 2000-es évek első évtizedének közepén tovább folytak az EU-ban is tanulmányok és vizsgálatok az energiagazdálkodás gazdasági, ellátásbiztonsági és környezeti dimenzióit illetően. A 2006-os Zöld Könyv is a környezeti fenntarthatóság, versenyképesség és ellátásbiztonság, mint három fő célkitűzés elérésének lehetőségeit vizsgálta, míg a 2007 januárjában lezárult szektorális vizsgálat a piaci versenyének akadályaira összpontosított (COM(2006) 105 final). Mindez oda vezetett, hogy 2007. év elején az EB két meghatározó jelentést tett közzé. Az „Európai energiapolitika” címet viselő bizottsági

közlemény úgy fogalmazott, hogy „Az európai energiapolitikának három alapvető kiindulópontja van: az éghajlatváltozás leküzdése, az EU kiszolgáltatottságának csökkentése a behozott szénhidrogének tekintetében, valamint a munkahelyteremtés és a gazdasági növekedés ösztönzése; mindez elérhető áron megvalósuló, biztonságos energiaellátás mellett.” (COM(2007) 1 final, 5. o.). Ebben tehát expliciten megjelenik az energiagazdálkodás három dimenziójának szempontjai, reflektálva az energia fontosságára és kihívásaira. Emellett a másik közlemény, mely a „Megújulóenergia-útiterv – Megújuló energiák a XXI. században: egy fenntarthatóbb jövő építése” címet viselte, már az Európai Bizottság konkrétabb, hosszú távú energiastratégiájára vonatkozott, melyben javasolták egy új jogszabályi keret létrehozását a megújuló energia előmozdításának és felhasználásának fokozása érdekében, valamint megfogalmazták azt a javaslatot, hogy 2020-ra az EU energiafogyasztásában a megújuló energiaforrások részarányát 20%-ban, a bioüzemanyagokét pedig legalább 10%-ban kötelező célként határozzák meg (COM(2006) 848 final).

Miután az EU tovább bővült 2004-ben 10 (Ciprus, Cseh Köztársaság, Észtország, Lengyelország, Lettország, Litvánia, Magyarország, Málta, Szlovákia és Szlovénia), valamint 2007 elején kettő (Bulgária és Románia) új tagállammal, a 2007-ben ratifikált Lisszaboni Szerződés után EU működési kerete jelentős változáson ment keresztül, modernizálva ezzel az EU intézményi struktúráját és döntéshozatali folyamatait, valamint kidolgozásra került az Unió Alapjogi Chartája is. A Lisszaboni Szerződés azért is volt jelentős, mert jogalapot teremtett az EU energiapolitikájának, és úgy határozott, hogy ez az Unió és a tagállamok közötti megosztott hatáskörbe tartozik. A tagállamok közötti szolidaritás szellemében az energiapolitika célja az uniós energiapiac működésének és az ellátás biztonságának megteremtése az EU-ban, valamint az energiahatékonyság és -takarékoság, a megújuló energiaforrások fejlesztése, valamint a hálózatok összekapcsolása (Kaposi, 2007; Kengyel, 2020).

A 2000-es évek elején az EU energiastratégiájára nem csak az ellátásbiztonsági kérdések, globális klímakonferenciák és belső strukturális változások voltak hatással. A 2008-2009-es pénzügyi világválság mély gazdasági recessziót eredményezett. Ebben a helyzetben több kormány, köztük az EU vezetése is felismerte annak lehetőségét, hogy a gazdaságélénkítés egy része megtörténhetne a tiszta energiafejlesztésekbe történő beruházások elősegítésével. A 2008-as „Európai Gazdaságélénkítési Terv”, valamint a 2009-es „Az európai energiaügyi gazdaságélénkítő program” jelentős zöldítési ösztönzőket tartalmazott, amelyek főleg tiszta energiatechnológiákba történő beruházások és az energiahatékonyság növeléséhez, valamint a meglévő infrastruktúrák fejlesztéséhez kapcsolódtak (IEA, 2020b). A 2009-es

Megújulóenergia-irányelv (*Renewable Energy Directive, RED I*), valamint a szintén 2009-es ún. harmadik energiacsomag jelentősen kapcsolódtak ehhez a stratégiához.

A RED I (Directive 2009/28/EC) hatályon kívül helyezte a korábban ismertetett megújulókkal kapcsolatos 2001/77/EC és 2003/30/EC irányelveket, és helyette egy ambiciózusabb és átfogóbb, valamennyi szektort érintő direktívát fogadtak el. A célkitűzése szerint 2020-ra a megújuló energiaforrások az EU teljes bruttó végső energiafogyasztásának legalább 20%-át tegyék ki, míg a közlekedésben legalább 10% legyen ez az arány. A végső energia felhasználása, mint szempont megkönnyíti a cél elérését a korábbi elsődleges energiafelhasználással szemben, mivel a jelenlegi megújulóenergia-technológiákkal (pl. nap-, szél-, és vízenergia) könnyebb elérni a végső energia 20%-át, mint a primerenergia 20%-át. Ennélfogva, ez az irányelv a villamosenergia-termelésen túl a fűtés-hűtési, valamint közlekedési szektort is érintette és kötelező nemzeti célokat tűzött ki valamennyi tagállam számára. Továbbá megjegyezték a TEN-E program felgyorsításának szükségességét is.

Ezzel szemben a harmadik energiacsomag fókuszában, melynek előzményei közé tartoznak a fent említett 2006-os és 2007-es bizottsági közlemények, újra a villamosenergia- és gázpiacok liberalizációs folyamatai voltak, ugyanis a vizsgálatok arra a következtetésre jutottak, hogy a piaci koncentráció még mindig magas a megfelelő energiapiaci verseny tekintetében, így a strukturális hiányosságok további kezelésére volt szükség. Ezért hatályon kívülre helyezték a korábbi kapcsolódó irányelveket, és új villamosenergia-piaci (Directive 2009/72/EC) és gázpiaci (Directive 2009/73/EC) irányelveket hozták meg, amelyekben újra előkerültek többek között az ellátási lánc alapján történő szétválasztási szabályok, a szabályozói hatóságok, az egyetemes szolgáltatás és a fogyasztói jogok kérdései. Ezeket az irányelveket a tagállamoknak 2011-ig kellett beültetniük a saját jogrendszereikbe. Továbbá, a kapcsolódó rendelet értelmében 2010-ben megalakult az Energiaszabályozók Európai Uniói Együttműködési Ügynöksége (*European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators, ACER*) is, amely energiapiac-felügyeleti jogköre mellett platformot nyújtott a piaci szereplők (TSO-k, DSO-k, ENTSO-E, energiatőzsdék és egyéb hatóságok) együttműködéséhez (Haffner, 2019). Az ENTSO-E is a harmadik energiacsomag következtében jött létre.

A pénzügyi válságot követően az EU megfogalmazta a 2010-2020 közötti időszakra vonatkozó általános célkitűzéseit a fenntartható növekedés jegyében. Ebben a foglalkoztatás, K+F, oktatás és szegénység elleni küzdelem mellett ötödik célterületként jelent meg az éghajlatváltozás és energia témaköre. Ehhez kapcsolódóan úgy rendelkeznek, hogy „Az üvegházhatást okozó gázok kibocsátását az 1990-es szinthez képest legalább 20, kedvező feltételek esetén 30 %-kal csökkentenünk kell; a megújuló energiaforrások arányát 20 %-ra kell

növelnünk a teljes energiafogyasztásban, és az energiahatékonyság 20 %-kal történő növelése is szükséges.” (COM(2010) 2020 final, 11. o.). Ez a célkitűzés – melyet szokás 20/20/20-nak is hívni – már az Európai Tanács 2007-es ülésén is meghatározásra került, és közvetlenül kapcsolódott az EU klímapolitikájához, mint a három kulcsfontosságú befolyásoló terület az éghajlatváltozással szembeni közdelemben (COM(2008) 30 final). Azt, hogy a 2010-es évekre az energiastratégia mennyire az EU esszenciális sarokköve lett, mi sem bizonyítja jobban, mint a 2010-ben kiadott *Energy 2020 – A strategy for competitive, sustainable and secure energy* megnevezésű bizottsági közlemény első két mondata úgy hangzik, hogy „*The price of failure is too high. Energy is the life blood of our society.*” (COM(2010) 639 final, 2. o.) A következő évtizedre vonatkozó energiastratégiát öt fókuszpontban definiálták: az energiatakarékosság előmozdítása, valódi páneurópai integrált energiapiac kiépítése az energia szabad mozgásának biztosítása érdekében, a fogyasztók számára megbízható, hozzáférhető és megfizethető energia biztosítása, Európa vezető szerepének megerősítése az energiatechnológiákban és az innovációkban, valamint erős nemzetközi partnerségek kialakítása, főleg a szomszédos országokkal. Továbbá rögzítik azt is, hogy az Európai Bizottság ezt a stratégiát egy 2050-ig tartó teljes cselekvési tervvel fogja kiegészíteni a későbbiekben. Mindezt, ahogy a dokumentum fogalmaz, egy fenntartható energia jövőkép céljából (COM(2010) 639 final).

A 20/20/20 megközelítés 2014-ben továbbfejlesztésre került – immáron Horvátország 2013-as csatlakozásával – a 28 tagú EU által, amelynek kidolgozásában kulcsszerepet játszottak az előző évek klímaváltozással kapcsolatos tudományos megállapításai és a közlegő Párizsi Megállapodás előkészületei. A 2030-ra vonatkozó célokat tartalmazó keretrendszerben az ÜHG-kibocsátásának az 1990-es kibocsátási szinthez képest már 40%-os csökkentését, a megújuló energiaforrások az EU energiafogyasztásán belüli részarányának legalább 27%-ra történő növelését, valamint energiahatékonyság szintén is legalább 27%-os növelést javasolták (EUCO 169/14).

2015-ben az Európai Bizottság bemutatta az EU energiauniójára vonatkozó elképzelését, amelyben az energia szabad áramlását az ötödik alapvető szabadságjoghoz hasonlították, és többek között számos korábbi irányelv és szabályozói keret revízióját, a villamosenergia-piac működésének fejlesztését, valamint új megújuló energia-irányelv kidolgozását sürgették. Továbbá új konkrét célkitűzésként jelent meg a stratégiában, hogy valamennyi EU-tagállam legalább 10%-os villamosenergia-összekapcsolási arányt érjen el 2020-ig. Az Európai Tanács elkötelezett az energiaunió megvalósítása mellett, amely az EU éghajlatpolitikáján alapul, és gazdasági és ellátásbiztonsági maximumra törekszik (COM(2015) 80 final). Erre a koncepciójára építkezve mutatta be a javaslati csomagját az EB 2016-ban, mely a „Tiszta

energia minden európainak” (*Clean Energy for All Europeans Package*) megnevezést kapta, és mely végül 2019-ben került véglegesítésre.

Ez a negyedik energiacsomag a korábbiaktól eltérően nem tartalmazott külön rendelkezéseket a gázpiacra vonatkozólag, ugyanakkor tovább építkezett a harmadik energiacsomag releváns tartalmaira. A csomag összesen nyolc rendelkezésből állt, amely négy irányelvből, valamint négy kötelező érvényű rendeletből állt, melyek az alábbiakhoz kapcsolódtak:

1. *Épületek energetikai teljesítményéről szóló irányelv* (Directive 2018/844) – az energiahatékonyabb épületekre vonatkozó rendelkezés;
2. *Energiahatékonysági irányelv* (Directive 2018/2002) – 2030-ra 32,5%-os (nem kötelező érvényű) energiahatékonyságot tűzött ki célul;
3. *Megújuló energiaforrásokról szóló irányelv* (Directive 2018/2011) – a korábbi RED-I módosítása (RED-II) immáron 2030-ra 32%-os célt tűzött ki a megújuló energiaforrások részarányára az EU energiamixében;
4. *A villamos energiáról szóló irányelv* (Directive 2019/944) – az értéklánc minden elemére vonatkozólag tartalmaz rendelkezést a fogyasztók védelme és a DSO-k beszerzési folyamataira vonatkozólag;
5. *A villamosenergia-rendelet* (Regulation 2019/943) – a rendelet a belső villamosenergia-piac működésére, azon belül is a nagykereskedelmi villamosenergia-piacra és a hálózatüzemeltetésre fókuszál (pl. új regionális koordinációs központok kialakítása, ajánlati zónák felülvizsgálati rendje);
6. *A kockázati készülségi rendelet* (Regulation 2019/941) – a potenciális villamosenergia-zavarok kezelését célzó nemzeti és közös forgatókönyvek, illetve konkrét tervek kidolgozása;
7. *ACER rendelet* (Regulation 2019/942) – felülvizsgálták az ACER működését, növelve a hatás- és feladatkörét;
8. *Az energiaunió irányításáról szóló rendelet* (Regulation 2018/1999) – új irányítási rendszer felállítása, valamint minden tagállamnak egy 10 éves nemzeti energia- és klímastratégiát kell kidolgoznia a 2021-2030-as időszakra.

A tiszta energia csomag rendelkezései tehát szorosan kapcsolódtak a Párizsi Megállapodásban tett 40%-os ÜHG-kibocsátás csökkentéséhez, vagyis a fosszilis tüzelőanyagoktól a tisztább energiaforrások felé való elmozduláshoz (40/32/32,5) (Florence School of Regulation, 2020).

Az eddig áttekintett energiapolitikai irányelvek és rendeletek pedig elvezettek a 2010-es évek utolsó nagyobb Uniós energiastratégiai reformjához, amelynek az eredménye az európai zöld megállapodás (*European Green Deal, EGD*) volt, illetve a 2020-as évek elején implementált kapcsolódó rendelkezések. A megállapodás jogszabályi környezetbe történő átültetésében azonban az Egyesült Királyság már nem vett részt az EU-ból történő 2020. januári kilépése miatt.

Az EGD 2019 végén került bejelentésre, amely tovább erősítette az EU elkötelezettségét az éghajlat és környezetvédelmi kihívások kezelése iránt. Megfogalmazták, hogy 2050-re az EU el fogja érni a klímasemlegességet, azaz a nettó zero ÜHG-kibocsátást, ezáltal fenntarthatóbb pályára állítva a gazdaságot és társadalmat. E kezdeményezés tehát a környezeti fenntarthatóságra épült, és felhívja a figyelmet arra, hogy a cél érdekében számos szakpolitikát újra kell gondolni többek között az ipar, a közlekedés, a mezőgazdaság, az építőipar terén, miközben a természeti erőforrások fenntartható felhasználása megvalósul. Továbbá kiemeli a digitális transzformáció katalizátor szerepét is ebben a folyamatban, valamint az energiaellátás hardverét szabályozó TEN-E rendelet felülvizsgálatát. Végezetül rögzítik, hogy újtárra indítják az európai éghajlati paktumot, amely platformot fog nyújtani a társadalom széles rétegei számára az ügyszöz kapcsolódó információk és legjobb gyakorlatok cseréjének érdekében (COM(2019) 640 final). Az EGD klímasemlegességi tervéhez kapcsolódóan az Európai Tanács jóváhagyta 2020. év végén azt a kötelező uniós célkitűzést, mely 2030-ra az 1990-es bázisévhez képest legalább 55%-os EU-s nettó ÜHG-kibocsátás-csökkentést kell elérni. Ezen felül a zöld finanszírozáshoz kapcsolódó standardok kidolgozására, valamint az EU ETS rendszer felülvizsgálatára is felkérte az EB-t (COM(2020) 562 final). Az Európai Tanács jóváhagyását követően fél évvel később, 2021 közepén hatályba lépett az EU klímátörvénye, amely jogerősen kötelezi a tagállamokat mind a 2030-as, mind a 2050-es klímacélok teljesítésére. Habár a COVID-19 pandémia ekkor már javában tombolt, de a klímátörvény a pandémia előtti tervezési és tárgyalási folyamatok eredményeként jött létre, az EGD részét képezte, és elfogadása a pandémia közepette is megvalósult, hangsúlyozva ezzel az EU elkötelezettségét a hosszú távú klímacélok és a tiszta energiaátmenet mellett (Council of the European Union, 2021). A klímátörvényhez kapcsolódóan az „Irány az 55%!” (*Fit-for-55!*) intézkedéscsomag részben a hatályos jogszabályok felülvizsgálatát, részben pedig új javaslatokat tartalmazott a tagállamok számára az ambiciózus 55%-os ÜHG-csökkentés elérésének érdekében. A javaslatok között az EU ETS reformja, a szociális klímaalap és az importárúk karbonintenzitását ellensúlyozó mechanizmusok kidolgozása, egyes gépjárművek új CO₂-kibocsátási előírásai és fenntartható üzemanyagok kifejlesztése, valamint a földhasználathoz és erdőgazdálkodáshoz kapcsolódó

ÜHG-kibocsátás és -elnyelés új előírásai találhatóak. Ezen felül rögzítették, hogy a tiszta energiacsomaghoz kapcsolódó, de az előbbi intézkedéscsomaggal már részben módosított 55/30/32,5 célkitűzés megújulóenergia- és energiahatékonysági irányelve is felülvizsgálatra szorul. A 30%-os megújulóenergia-arányt 40%-ra javasolták növelni, míg a 32,5%-os nem kötelező érvényű energiahatékonysági célt újra modelleztek 2020-as számítások alapján, és ehhez az új bázisévhez képest 9%-os végső energiafogyasztási csökkentést javasolták (amely megfelel a primer és végső energiafogyasztásra vonatkozó rendre 39%-os és 36%-os energiahatékonysági célkitűzéseknek) (Council of the European Union, 2023).

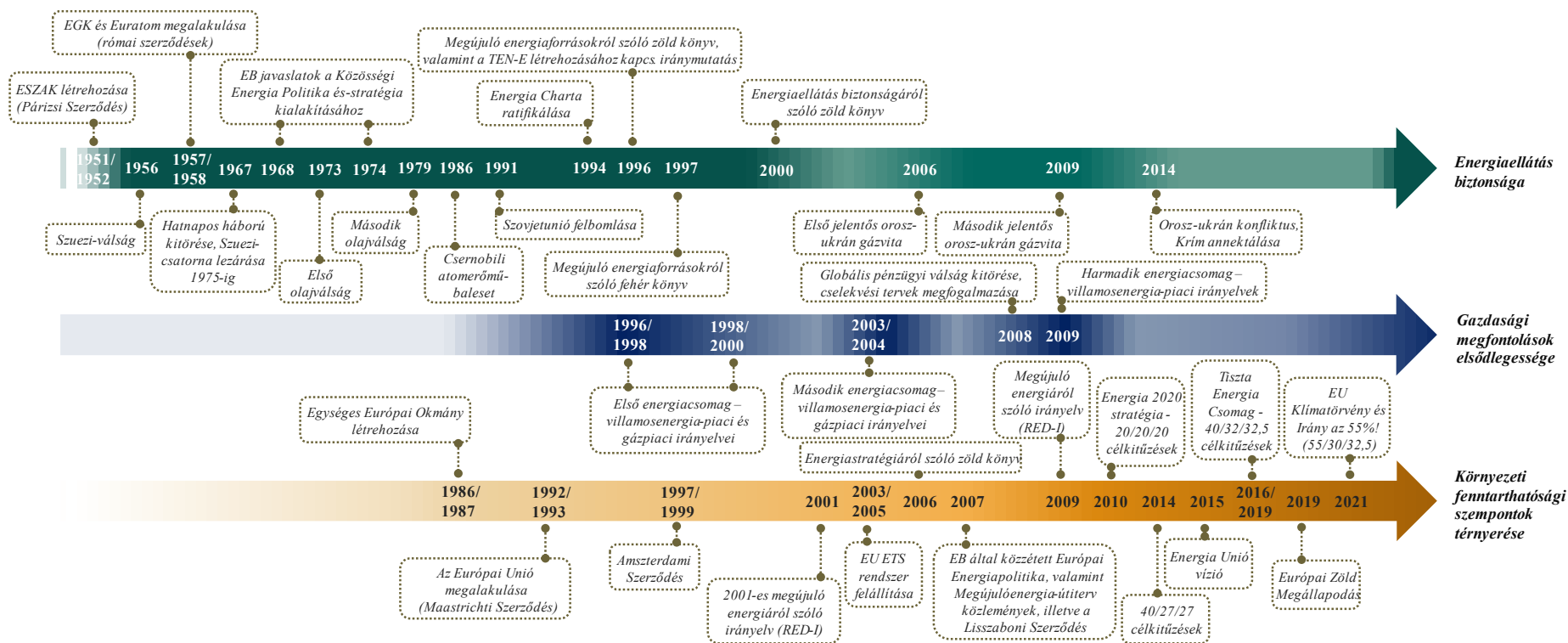
Összességében az állapítható meg, hogy az ESZAK létrehozása óta a 2020-2021-es évekig az EU-ban az energiatrilemma dinamikája mindig központi szerepet játszott, hol közvetett, hol közvetlen módon, még úgy is, hogy az energiapolitika explicite csak a 2007-es Lisszaboni Szerződésben kapott hivatalosan is jogalapot. Kezdetben az energiaellátás biztonságpolitikai kérdései voltak egyértelműen a leghangsúlyosabbak, amelyeket főleg a külső makroökonomiai és geopolitikai változások alakítottak. A Maastrichti Szerződést követően azonban elkezdett a hangsúly lassan áttolódni a gazdasági, illetve a környezeti fenntarthatósági szempontokra is. Látható volt, hogy előbbi esetén a piaci liberalizációs folyamatok nem az energiapiacok és annak szereplői által jöttek létre természetes módon, hanem felülről irányítva, szabályozói beavatkozások révén alakult át a piacszerkezet. A környezeti szempontok EU-s direktívákba történő átültetésére nagy hatással voltak a világban párhuzamosan zajló, az éghajlatváltozással és a fenntartható fejlődéssel kapcsolatos konferencia-sorozatok megállapításai és irányai. Mindezt úgy, hogy az ellátás biztonságának fontossága minden egyes áttekintett dokumentumban megjelenik valamilyen módon. Hiszen az EU-t közvetlenül érintő geopolitikai feszültségek a 2000-es évek után is voltak, gondolok itt főleg az orosz-ukrán konfliktusokra (gázviták, Krím félsziget annektálása). Ukrajna fontos tranzitország az orosz gáz európai szállításában, így a konfliktusok érzékenyen érintették az EU energiaellátásának kérdését. Mindazonáltal, a 2010-es évektől kezdve az energiaellátás biztonsági aspektusai talán egy kicsit háttérbe szorultak, amelyet ellensúlyozott a megújuló és tiszta energiaátmenetre, tehát a környezeti fenntarthatóságra való elkötelezettség növekedése.

Az egész elemzési szemlélet jól tükrözi azt, amit a fejezet legelején megjegyeztem, hogy az EU megalakulásától számítva nem lehetséges ceteris paribus megállapítani egy irányelvről vagy rendeletről, hogy az csak gazdasági, társadalmi vagy környezeti szempontokat tartalmazott. Az energiapolitikai döntések következményeinek multipoláris jellege jól szemlélteti a rendszerszemlélet szükségességét az energiarendszerek komplexitása miatt. Ugyanakkor a döntéshozók számára az energiatrilemma elméleti egyensúlyának keresése

paradox módon gyakran jár valamely dimenzió rövid- vagy középtávon prioritásként kezelésével, vagyis döntési kényszerűséggel. Erre a legkiválóbb példa éppen az energiaátmenet lételemét jelentő megújuló energiák hasznosítására történő növekvő átállás, amely hosszú távon ugyan elősegíti az energiatrilemma egyensúlyának megteremtését, de az átállás idején a megújulók természetéből, valamint a villamosenergia-piac működési mechanizmusából fakadóan a megnövekedett földgázszükséglet, mint áthidaló és rugalmasan felhasználható energiahordozó iránti növekvő kereslet ellátásbiztonsági kockázatokat vet fel az EU számára, amely szűkölködik saját földgáz-lelőhelyeket és tartalékokat illetően, és energiainportra szorul. Ezek a biztonsági kockázatok pedig szignifikánsan meg tudnak nőni kedvezőtlen geopolitikai és geoökonómiai környezetben, mint amilyeneket a 2020-as évek elején tapasztalt meg az Unió.

Végezetül, energiatrilemmai szempontból az EU történetéhez kapcsolódó főbb mérföldkövek, rendeletek és irányelvek, valamint külső geopolitikai események idővonalas és gazdasági, ellátásbiztonsági, valamint környezeti fenntarthatósági szempontból történő ábrázolását az *48. ábra* szemlélteti. Ismételten kiemelem azt, ami bizonyos tekintetben az ábra korlátját is jelenti, hogy valamennyi belső és külső, az energiagazdálkodást érintő esemény és szabályozás közvetlenül és közvetetten is érinti a három dimenziót – utóbbit szemlélteti a halványabb jelölés. Az eseményeket ott tüntettem fel, amelyik dimenzióhoz legjobban kapcsolódnak.

49. ábra Az EU energiaterlemjének megítélésében résztvevő főbb külső és belső tényezők (1951-2021)



Forrás: Saját készítésű ábra

„(...) it is very difficult to think about climate change impacts when you have impacts of Russian missiles in our Kyiv, and tanks everywhere.”

- Svitlana Krakovska, Head of Applied Climatology Laboratory, Ukrainian Hydrometeorological Institute, 2022 (Weise & Mathiesen, 2022)

6.2. A szélsőséges események hajnalán: a multiválságok kora

Az EU a 2000-es évek legelején már átélt egy világválságot, amely nem sokkal később duplán megismétlődött – igaz, merőben más okokkal és következményekkel. A 2007/2008-as pénzügyi válságot követően az európai spot villamos energia árak átlagosan egy 0 és 100 EUR/MWh terjedelemben mozogtak és átlagosan 22,45 EUR/MWh szórással rendelkeztek egészen a második évtized elejéig. Ekkor azonban új korszak indult, amikor is a társadalmakat és gazdaságokat széleskörűen érintő váratlan események hatására az energiahordozók árai – különösen a villamos energia, a földgáz és a szén árai tekintetében – ugrásszerűen megemelkedtek és a villamosenergia-árak esetében soha nem látott szinteket értek el. A multiválságok következményei jelentős hatással voltak (és vannak) az EU 2020-as évtized első felének energiastratégiájára és a jövőbeli kilátásokra. A következőkben e válságokat fogom röviden bemutatni – kitekintve a válságok kialakulásának okaira –, amit az EU 2020 és 2023 közötti energiapolitikájának elemzése követ.

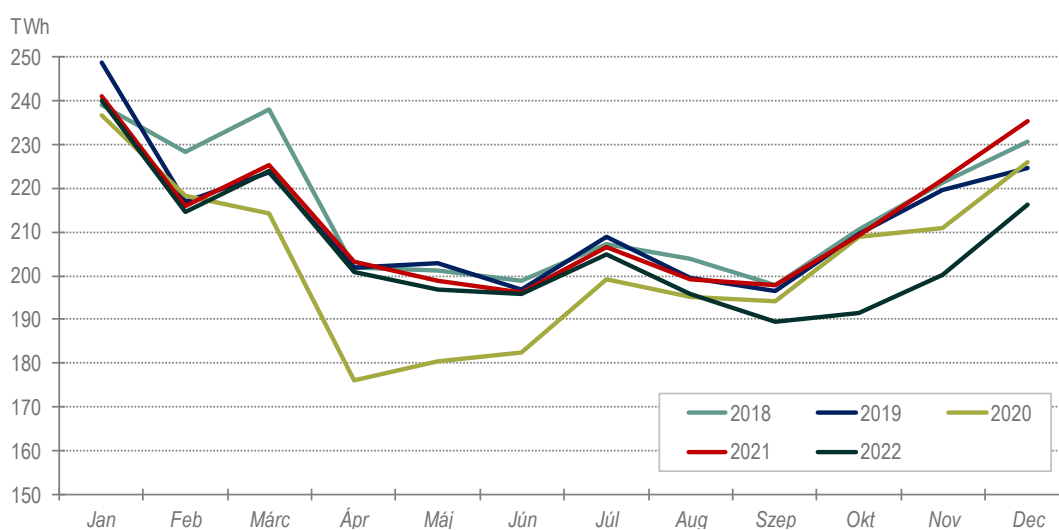
6.2.1. Törésvonalak a pandémia és a geopolitikai feszültségek következtében

A 2010-es évek viszonylagos nyugalmi időszakát követően a fordulópontot az új típusú SARS-CoV-2 koronavírus (COVID-19) által okozott világjárvány 2019 végi kínai kitörése jelentette, mely villámgyorsan globális világjárvánnyá fejlődött (az Egészségügyi Világszervezet már 2020. márciusában pandémiának nyilvánította a COVID-19-et, mivel a vírus már több mint 100 országban jelen volt). A vírus cseppfertőzéssel és közvetlen kontaktussal gyorsan terjedt, a fertőzés tünetei pedig változatosak voltak, súlyos esetben tüdőgyulladásos és akár halálhoz is vezettek. A helyzet számtalan egészségügyi intézkedést, kormányzati beavatkozást, utazási korlátozást és a hatékony vakcinák kifejlesztéséért folytatott versenyt eredményezett. Az esetszámok alakulásában különböző hullámok alakultak ki az intézkedések és a vakcinák hatásosságának függvényében, valamint a különböző vírusvariánsok is befolyásolták az esetszámokat és a mortalitás alakulását. Az EU-ban az első hullám a csúcspontot 2020 április elején érte el, majd 2020 végén és 2021 elején tetőzött a második hullám, amelyet egy évvel később követett a harmadik hullám (2021 vége – 2022 eleje) is.

2023 végéig mintegy 1,26 millió fő halálát okozta az EU-ban, és több mint 7 millió emberét az egész világon World Health Organization (é.n.).

A társadalmat érintő korlátozó lépések negatív hatással voltak a gazdaságra, a pandémia zavart okozott a kereskedelmi és ellátási láncokban, az üzletbezárásokkal megnőtt a munkanélküliség aránya, valamint csökkent az ipari tevékenységek mértéke is. Mindezek következtében pedig visszaesett a villamos energia iránti kereslet is (50. ábra), amely az árak átmeneti csökkenéséhez vezetett (IEA, 2023; Zhong et al., 2020).

50. ábra Havi villamosenergia-fogyasztás az EU-ban

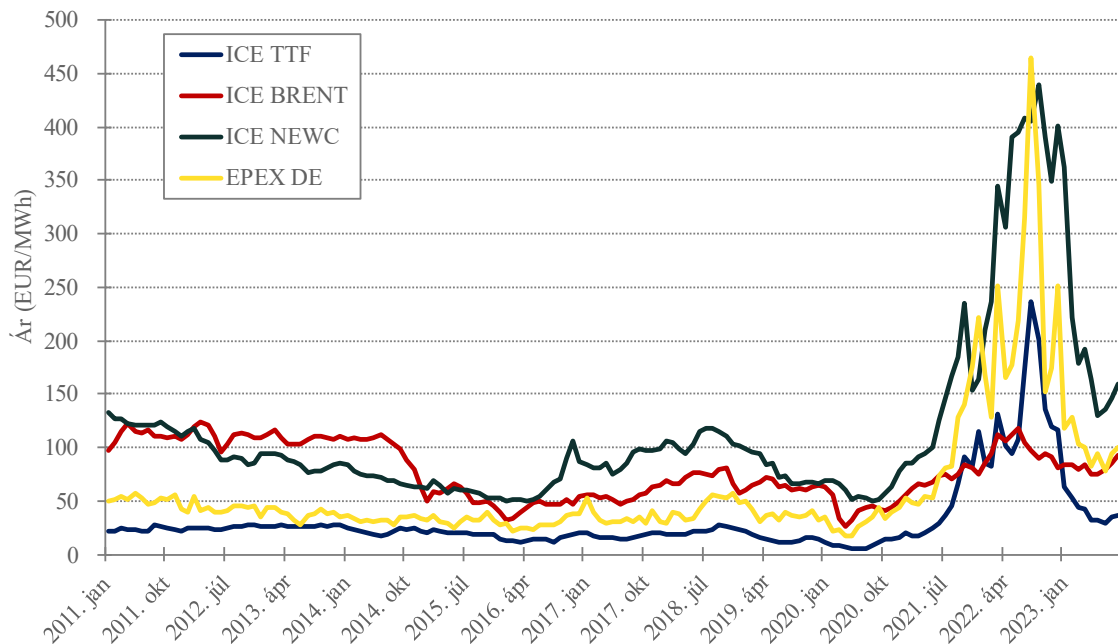


Forrás: Eurostat (é.n.-a) alapján saját készítésű ábra

Az ábrán jól látható, hogy a 2018 és 2019-es trendekhez képest mennyire leesett a 2020-as áramfogyasztás, főleg április magasságában – párhuzamosan az első hullám tetőzésével. Bár a lakossági fogyasztás megnőtt, hiszen az emberek a karantén miatt otthon kényszerültek maradni, így a munkavégzés is otthonra tevődött át, amely megnövelte a lakossági áramfogyasztás mértékét, de ahhoz képest sokkal nagyobb volt az ipari termelés visszaesése, így azt nem tudta ellensúlyozni. Ugyanakkor az is látszik, hogy a korábbi évek szintjéhez való visszatérés már az ősz kezdete előtt megtörtént.

A pandémia átmeneti energiafogyasztás-csökkenő hatása az energiaárakra is hatással volt (51. ábra). A közlekedés és szállítás visszaesése miatt a kőolajszükséglet is csökkent, amely miatt beesett a kőolaj ára. Továbbá az előző ábrán bemutatott áramfogyasztás visszaesése értelemszerűen a termelést és annak forrásmixét is befolyásolta, amely így hatással volt a villamosenergia-árakra is.

**51. ábra Havi átlagos tőzsdei villamos energia, kőolaj, földgáz és kőszén árak
(2011. január – 2023. szeptember)**



Forrás: Energy-Charts (é.n.), Investing.com (é.n.) és Refinitiv Eikon (é.n.) alapján saját készítésű ábra

Általánosságban sok országban a vártnál hamarabb megtörtént a gazdasági nyitás és fellendülés, a recesszióból való kilábalás, emiatt hirtelen növekedni kezdett a kereslet, amely újra emelkedő pályára helyezte az energiaárakat. Ez azonban, ötvözve egyéb kínálatot és keresletet befolyásoló tényezőkkel, az energiaárak, így a villamosenergia-árak 2021-2022-es meredek emelkedéséhez vezetett. Összességében az alábbi szempontok játszottak szerepet az energiaválság kialakulásában IEA (é.n.-b, 2021b, 2022b):

- ❖ *A vártnál gyorsabb gazdasági nyitás és fellendülés-előrejelzés az energiaigény hirtelen és jelentős növekedését eredményezte a pandémia után;*
- ❖ *Az ellátási láncok rugalmatlansága – a COVID-19 által okozott leállások és egészségügyi problémák, amelyek munkaerőhiányhoz vezettek, a globális ellátási láncok és a szállítmányozás lassulását okozták, melyek csak nagyon lassan tértek magukhoz a kilábalás során;*
- ❖ *Extrém időjárási körülmények – a 2020-2022-es szélsőséges időjárási körülmények, például aszályok és hőhullámok kihatottak a termelésre és a fogyasztási szükségletekre is. Az aszályos időszak miatt a vízerőművek, melyek jelentősen hozzájárulnak a megújuló áramtermelés arányához, alacsonyabb hatásfokkal tudtak termelni főleg*

2022-ben, illetve voltak olyan európai országok, ahol az atomerőművek működését is vissza kellett fogni a vízhiány miatt. Továbbá a 2021-es év elején az átlagosnál hidegebb tél volt az északi féltekén, mely kihatott a gázkészletek nagyobb arányú felhasználására, valamint Európa szerte alacsonyabb szélereősséget mértek;

- ❖ *Megújuló időjárásfüggő jellege* – az előzővel szorosán összefüggő, ugyanakkor külön kiemelendő a nap-, szél- és vízerőművek időjárásfüggő jellege. Mivel a nap- és szélenergia nem mindig elérhető, ez az instabilitás megköveteli az energiarendszer rugalmasságának növelését, amelyet jelenleg a földgáz-használat tesz lehetővé. Tehát a megújuló áramtermelés kiesése, illetve pótlása külön-külön is hatással van az áram- és gázárakra;
- ❖ *Földgáztárolás szintje* – az európai földalatti gáztárolók szintje 2021. nyár elején 30%-kal, míg szeptember végén 15%-kal volt alacsonyabb az előző öt év átlagánál részben az adott évi hidegebb tél, részben pedig az oroszországi gázszállítások volumene miatt. Ez pedig tovább növelte az EU gázimportra való kényszerűségét a fűtési szezonban;
- ❖ *Tervezett és nem tervezett termelési kiesések* – a pandémia miatt számos erőműnél világszerte a beruházási folyamatok leálltak, valamint a karbantartási munkálatok elhalasztásra kerültek, amelyek a fellendülést követően azonban szükségessé váltak. Emellett váratlan kiesések is ellátási zavarokat okoztak a rendszerben (pl. Indonéziában egy hónapig betiltották a szénexportot, Ausztráliában 2022 elején áradások a széntermelés ideiglenes leállítását eredményezték, míg a világban számos helyen váratlan kiesések voltak az LNG-terminálokkal kapcsolatban);
- ❖ *OPEC+ olajtermelési korlátozásai* – az OPEC+ 2022. októberében napi kétmillió hordóval csökkentette az olajtermelést, ami hozzájárult az áremelkedéshez;
- ❖ *Orosz-ukrán háború közvetlen és közvetett következményei.*

A felsorolás alapján belátható, hogy ezek a kritikus tényezők önmagukban és együttesen, multiplikáló hatást generálva gerjesztették az energiaárakat. Az energiapiacok összekapcsoltsága és az energiahordozók bizonyos körülmények közötti helyettesíthetőségei tovább erősítették ezt a folyamatot. A villamosenergia-termelés és -árak szempontjából tehát a szélsőséges időjárási körülmények miatti megújuló és tiszta áramtermelés átmeneti visszaesése (tehát beleértve az atomenergiát), valamint a fosszilis energiahordozók – különösen a szén- és gáztermékek – árának drasztikus emelkedése volt meghatározó. Ez utóbbihoz közvetlenül és közvetetten is kapcsolódik az eddigiekben még nem részletezett, ugyanakkor az energiaválság és a rekordmagas energiaárak kialakulásához legszignifikánsabb hozzájáruló eseménysorozat, az orosz-ukrán háború.

Ukrajna és Oroszország sorsának összefonódása mély történelmi gyökerekkel rendelkezik, amelyek egészen a középkorig nyúlnak vissza. Oroszország és Ukrajna közös történelme a Kijevi Rusz államban gyökerezik, amely a mai Ukrajna, Fehéroroszország és Nyugat-Oroszország területein helyezkedett el. Ez az államalakulat volt az első olyan szláv állam, amely jelentős kulturális és vallási központtá vált az ortodox kereszténység felvétele után. Emiatt Vladimir Putyinnak, Oroszország jelenlegi vezetőjének mindig is az volt a véleménye, hogy az ukránok és az oroszok ugyanaz a nép, és a fehéroroszekkal együtt a szláv testvériségnek részei. Az elmúlt évezredben azonban Ukrajna területére többször is igényt tartottak egymással versengő hatalmak. Az 1600-as évektől kezdve az Orosz Birodalom fokozatosan terjeszkedett nyugat felé, és ebben az időszakban számos ukrajnai terület került orosz uralom alá. A Dnyeper folyó, amely keresztül megy Ukrajna területén, egy természetes választót jelentett akkoriban az orosz (balpart) és lengyel (jobbpart) fennhatóság között. Az 1700-as évek végén elindult az erőteljes orosz kulturális asszimiláció (russzifikáció) a fennhatóság alatt, majd a Lengyel-Litván Unió felosztása után Ukrajna Dnyeper jobbpartján fekvő részének egy része is az Orosz Birodalom fennhatósága alá került. Majd az első világháborút követően, 1922-től kezdve Ukrajna a Szovjetunió részét képezte annak felbomlásáig. A szovjet időszak alatt Ukrajna szorosan integrálódott a Szovjetunió politikai és gazdasági rendszerébe, ugyanakkor több tragikus esemény, mint például a Holodomor (nagy éhínség) mély sebeket hagyott az ukrán nép emlékezetében (Hill, 2023; National Geographic, 2023).

A történelem ezen sajátos örökségei tartós törésvonalakat hoztak létre. Mivel a keleti országrész sokkal korábban került orosz uralom alá, így a kelet-ukrajnaiak erősebb kötődéssel rendelkeznek Oroszországhoz. Nyugat-Ukrajna ezzel szemben évszázadokat töltött az európai hatalmak irányítása alatt. Ennek pedig politikai, kulturális, nyelvi és vallási következményei is lettek. Mindazonáltal, a Szovjetunió összeomlásával Ukrajna 1991-ben kikiáltotta függetlenségét, az ország tényleges egységének megvalósítása azonban még csak ekkor következett. Az 1990-es évek óta az orosz-ukrán kapcsolatok változó intenzitásúak, időnként együttműködőek, máskor feszültségekkel teli voltak, különösen a nyelvi és etnikai kisebbségek jogai, az energiaellátás (gázviták), valamint a geopolitikai orientáció tekintetében (National Geographic, 2023). Utóbbihoz az is kapcsolódik, hogy Putyin vissza akarja szerezni történelmi befolyási övezetét nyugati határai körül, átalakítva ezzel a hidegháború után kialakított biztonsági struktúrát, amelyre a NATO potenciális keleti terjeszkedése fenyegetést jelent. Hill (2023) megjegyzi, hogy Putyin valójában soha nem fogadta el, hogy Ukrajna valódi állam és

önálló nemzeti identitással rendelkezik, ehelyett az orosz nemzeti örökség szerves részének tekinti.

Mindezek is hozzájárultak ahhoz, hogy 2014-ben Oroszország megszállta, később pedig – megkérdőjelezhető hitelességű népszavazásra hivatkozva – anektálta a Krím félszigetet (beleértve Szevasztopol városát), amely sokak szerint a napjainkban dúló orosz-ukrán háború kezdetét is megjelölte. Közel 10 évvel később, számos diplomáciai erőfeszítés ellenére, ugyanakkor belső és külső politikai változások és a Kelet-Ukrajnában kitört fegyveres konfliktusok miatt Oroszország 2022. februárjában nyíltan megtámadta Ukrajnát. 2023. év végén Oroszország Ukrajna mintegy ötödét tudta megszállni. A nagyjából 1000 km-es frontvonalon zajló háború jelen dolgozat írása alatt még mindig tart, a vége pedig sajnálatos módon nem látszik.

Az orosz-ukrán háború olyan brutális agressziót és geopolitikai konfliktust jelent, amelyben Európának hosszú idő óta nem volt ilyen közvetlenül része. Habár a háború szörnyűségei az EU területét nem érintik, gazdasági és biztonságpolitikai szempontból jelentős hatással vannak az EU piacaira, kiváltképp az energiapiacára.

Ahogy az ásványivagyon-lelőhelyek és tartalékok korábbi áttekintésénél is látható volt, az EU nem rendelkezik jelentős mennyiségű földgáztartalékokkal, ugyanakkor az energiaigény kielégítésére és a megújuló erőművek termelési sajátosságaiból fakadóan szüksége van jelenleg az EU-nak gáztüzelésű erőművek használatára. Következésképpen számos EU-tagállam földgázimportra szorul, amelyet történelmileg javarészt Oroszországból származó forrásokból elégítettek ki különböző gázcsatornákon keresztül. Az 52. ábrán látható a tagállamok közötti megoszlás az orosz gázimport teljes importált gázmennyiségen belüli részarányát tekintve, 2021-re vonatkozólag. Összességében becslések szerint az EU-s átlag 2021-ben 45% körül volt e tekintetben, melyből kiemelkedett Ausztria, Bulgária, Csehország, Finnország, Lettország, Magyarország és Románia importált 75% fölötti átlagos éves arányban Oroszországból földgázt (Eurostat, é.n.-i; Friedrich-Ebert-Stiftung, 2023).

52. ábra Az EU tagállamok Oroszországból származó gázimport aránya a teljes importmennyiség %-os arányában, 2021-ben*



*Megjegyzés: Az Oroszországból származó földgázimportra vonatkozó dán, ír, horvát, máltai és osztrák adatok nem kerülnek lejelentésre az Eurostatnak.

Forrás: Eurostat (é.n.-i) és Friedrich-Ebert-Stiftung (2023) alapján Mapchart segítségével készített ábra

A gáztárolók alacsonyabb töltöttségi szintje is már annak volt a következménye, hogy Oroszország hónapokkal az ukrajnai inváziója előtt kezdte visszatartani az Európába irányuló gázszállításokat. Az orosz-ukrán konfliktus súlyosbodása miatt egyre erősödtek a gázellátás biztonságával és folytonosságával kapcsolatos kérdések, hiszen egy esetleges nyílt háború veszélyeztethetné a gáztranszit útvonalakat, illetve Oroszország szándékosan csökkentheti a gázszállításokat politikai nyomásgyakorlás eszközeként. A háború kitörését követően a kezdeti nagyfokú bizonytalanságban és a hiánytól való félelemben a piaci szereplők igyekeztek felkészülni a lehetséges ellátási zavarokra, ami tovább növelte a már így is emelkedett árakat. Ráadásul a nemzetközi közösség, így az EU is folyamatosan, többek között személyek elleni és gazdasági szempontú (kereskedelmi termékek meghatározott körét, valamint pénz-,

energia-, közlekedési és védelmi piacokat érintő) szankciókat vezetett be Oroszország ellen, amelyek hol közvetlenül, hol közvetetten érintették az energiapiacokat és a gázkereskedelmet.

Mindezek következtében Európa-szerte drasztikusan kilóttek a nagykereskedelmi gázárak, a referenciaértékként szolgáló holland TTF gázárak 2022. augusztusában rekord magas, átlagosan 236 EUR/m³ árat is elértek. Mindez pedig oda vezetett, hogy a villamosenergia-piac mechanizmusa következtében a magas földgázárak miatt a napi átlagos áramár is az egekbe szökött, 2022. augusztus végén a német energiátőzsdén meghaladta a 465 EUR/MWh havi átlagértéket is.

Az energiaválság tehát gyakorlatilag a COVID-19 világjárványból nőtte ki magát, és átfogó, globális energiaválságként tetőzött azt követően, hogy 2022. februárjában kitört az orosz-ukrán háború. Ez a geopolitikai esemény felerősítette az EU energiabiztonságával és ellátási láncának stabilitásával kapcsolatos aggodalmakat, valamint meghatározta az elkövetkezendő időszak energiapolitikai kezdeményezéseit és energiastratégiai irányát is.

6.2.2. Az energiaválság lecsengése és energiapolitikai következményei

Az EU már a háború kitörését követő második hét végén hivatalos nyilatkozatot tett az Ukrajna elleni orosz agresszióról, melyben ismételten kinyilvánították azt a tényt, hogy a katonai agresszió súlyosan sérti a nemzetközi jogot, és aláássa az európai és a globális biztonságot. Egyúttal az EU szolidaritását fejezte ki Ukrajna iránt és megerősítették, hogy az EU és tagállamai továbbra is összehangolt politikai, pénzügyi, anyagi és humanitárius támogatást fognak nyújtani ameddig szükséges (Consilium European Council, 2022).

A támogatás mellett bevezetett különféle szankciók egy része az energiapiacot, azon belül is leginkább az olajpiacot érintették 2023 végéig (a dolgozat lezártáig kihirdetett szankciókról készült összefoglaló megtalálható a Függelék *F8. táblázatában*). Az ötödik szankciós csomag (2022. április 8.) többek között megtiltja az Oroszországból származó szén és egyéb szilárd fosszilis tüzelőanyagok importját, valamint orosz hajók kikötését az EU kikötőiben. A hatodik csomag (2022. június 3.) importtilalma – bizonyos kivételektől eltekintve – már a nyersolaj és feldolgozott kőolajtermékek körére is kiterjedt. A nyolcadik szankciós csomag (2022. október 6.) már az orosz kőolaj harmadik országok részére történő tengeri szállítását is hivatott szabályozni, árplafont bevezetve a díjazásnál. Erre a megoldásra építkezve, 2022. december 3-án már az orosz olajtermékek egy körére hordónkénti 60 dolláros maximális árat állapítottak meg, ezzel is korlátozva az árak volatilitását (Council of the European Union, é.n.).

Mindebből az következik, hogy az EU a háború kitörését követő 22 hónapban még nem vezetett be konkrét importtilalmat vagy árplafont a gáztermékekre vonatkozólag. Ez nem véletlen, hiszen az EU orosz gázimport függősége szignifikáns volt a multiválságok előtt, kiváltképp néhány tagállamban (pl. Lettország, Csehország és Magyarország). Ha a gázcsapok elzárása egyik napról a másikra történt volna, az lehetetlen helyzetbe hozta volna ezen és még jónéhány EU-s tagállam piaci helyzetét a villamosenergia-termelés és a fűtés-hűtés szektorokban egyaránt. Az energiaválság közepén ez beláthatatlan következményekkel járt volna, ezért tiltakoztak is ellene tagállamok – legalább addig, amíg valamilyen alternatív megoldást nem találnak az orosz gázbeszerzések pótlására.

Tehát az ukrajnai háború jelentős hatást gyakorolt az Európai Unió energetikai panorámájára, mivel az Oroszország elleni szankciók kontextusában a földgázimporttól való függőség csökkentése, az energiaforrások diverzifikálása és új partnerek keresése, az infrastruktúra fejlesztése, valamint az ellátásbiztonság növelése prioritást nyert az EU kialakulóban lévő új energiastratégiájában.

Válaszul az energiaválság és az orosz-ukrán háború okozta biztonsági kockázatokra, de nem elfeledve az EU zöld átállásra való törekvéseit, 2022. májusában létrejön a REPowerEU terv, mely ezekre igyekszik megoldást nyújtani: *„A REPowerEU célja az orosz fosszilis tüzelőanyagoktól való függőségünk sürgős csökkentése a tiszta átállás tervezettnél gyorsabb megvalósítása, valamint a reziliensebb energiarendszer és a valódi energiaunió létrehozása érdekében történő összefogás révén.”* (COM(2022) 230 final, 1. o.). A REPowerEU alapvetően az „Irány az 55%!” javaslatcsomagra épül, és olyan további intézkedéseket integrál, amelyek az energiatakarékossághoz, az ellátás diverzifikációjához, a tiszta energiára való átállás felgyorsításához, valamint a beruházások és reformok intelligens kombinálásához kapcsolódik. Tehát nem módosítja a Green Deal által lefektetett 55%-os ÜHG-kibocsátás-csökkenés célkitűzését, ugyanakkor azt rögzíti, hogy a korábbiakban tervezett energiaátmenet menetrendjén és a klímacélok elérésének módján változtatni kell. A jelentés rögzíti, hogy az EU energia-infrastruktúrájának bővítése és korszerűsítése központi szerepet kell, hogy kapjon, valamint a földgázról való gyorsabb leválás miatt úgy fogalmaznak, hogy lehetséges, hogy a szénerőműveket a vártnál hosszabb ideig kell majd üzemeltetni, továbbá az atomenergia megosztó szerepének újragondolását is napirendre tűzte. Mindezzel együtt az EU támogatja Ukrajnát is, hiszen közvetett módon jelentős bevételi forrásoktól fosztják meg Oroszországot ezen intézkedések bevezetésével (COM(2022) 230 final).

A beruházások tekintetében úgy határoznak, hogy mintegy 210 milliárd euróra van szükség 2027-ig, hogy megvalósuljon a teljes leválás az orosz gázimportról. Ennek nagy részét

megújuló erőművekbe, energiahatékonyságot célzó technológiákba, biometán előállításra, valamint hálózati fejlesztésekre tervezik szánni (COM(2022) 230 final). Tehát a zöld technológiákra (*GreenTech*) – pl. LED-es világítás, intelligens hálózatok, elektromos járművek, passzívházak stb. – való áttérés kritikus fontosságú a célok elérésében. Ehhez szorosan kapcsolódik a zöld digitalizáció és pénzügyek témaköre is, melyek szintén segítenek elérni az ambiciózus klímacélokat. A digitalizáció kulcsfontosságú a különböző iparágak energiaátalakításához, míg a zöld befektetések új típusú finanszírozási lehetőségeket nyitnak. Ezt az EB is felismerte, és a 2022-es stratégiai előrejelzési jelentésében már úgy fogalmazott, hogy a zöld és digitális átmenet ebben a megváltozott geopolitikai környezetben együttesen jelent kritikus fontosságot a CO₂-semleges gazdaságra való törekvés során. Ezzel az EU megerősítheti ellenálló képességét és jobban felkészülhet egy új váratlan globális kihívásra (Herczeg et al., 2023).

A REPowerEU keretén belül továbbá létrehoztak egy platformot is a földgáz, az LNG és a hidrogén közös beszerzésére, amely kihasználja az EU kollektív politikai és piaci súlyát, hogy jobb árakat érjen el a gázbeszerzések kapcsán. Továbbá azt is előírták, hogy az EU-ban a földalatti gáztárolókat minden év novemberére 90%-ra kell feltölteni, hogy biztosítva legyen a téli ellátás. Az EU szorgalmazta stratégiai partnerségek kialakítását a beszerzések terén is, így a harmadik országoktól történő csővezetékes gáz behozatala, valamint az LNG beszerzés növelése és kapcsolódó terminálok kiépítése is fontos szempont volt a biometán és hidrogén használatának növelése mellett (IEA, 2024). Mindezen célok együttesen eredményesek voltak az orosz gázimporttól való függőség csökkentésében. 2023 harmadik negyedében a gáznemű földgáz közel fele (48,6%) Norvégiából származott, amelyet Algéria követett 17,8%-kal, megelőzve Oroszországot (16,0%) és az Egyesült Királyságot (10,5%) (Eurostat, 2023b).

A földgázbeszerzés mellett az előbb említett LNG beszerzés felfuttatása jelenthet potenciált az EU számára. A cseppfolyósított földgáz gazdaságossági előnyeiről már volt szó a korábbiakban, maga az LNG-kereskedelem természeténél fogva rugalmas és beszerzésére új források útján van is lehetőség, ugyanakkor az újragázosítási kapacitásokhoz az infrastruktúrát folyamatosan szükséges erősíteni. Az Eurostat (2023b) jelentése szerint 2023 harmadik negyedében az importált LNG közel felét (48,5%) az Egyesült Államok szállította, megelőzve Katart (14,0%), Algériát (10,1%) és Oroszországot (8,8%).

Tehát a REPowerEU mind keresleti (hatékonyságnövelés), mind kínálati (import diverzifikálás, megújuló erőművek folyamatos létesítése) oldalról igyekszik megfogni a földgázhasználat mértékét, míg a szankciós politika energiapiaci vonatkozásai a szén- és kőolajtermékek behozatalának tiltásával gyakorlatilag lenullázzák a teljes energiainport

mértékét Oroszországból. Ezt jól tükrözi az is, hogy míg 2021 első negyedévében 26% körül volt az EU teljes energiaimportjának Oroszországtól származó része, addig ez az arány az intézkedéseket követően 2022 harmadik negyedévére 14,5%-ra, míg 2023 harmadik negyedévére 6,5%-ra csökkent (Eurostat, 2023b).

Mindemellett, a REPowerEU tovább vitte azt a kezdeményezést is, amely már az „Irány az 55%!” jogszabály-csomagban is megjelent ajánlásként, hogy a korábbi RED-II irányelvben szereplő 2030-ra szóló megújulóenergia-célértéket növeljék meg ezúttal 45%-ra. Ez elvezetett 2023. év végére a 2018-as megújulóenergia-irányelv módosításához (Directive 2023/2413, RED-III), amelyben végül 42,5%-os kötelező érvényű célt tűztek ki az EU átlagára vonatkozólag. Emellett az energiahatékonysági célkitűzést is módosították, az „Irány az 55%!” csomag 2030-ra szóló, kötelező erejű és a 2020-as bázisévhez képest 9%-os energiafogyasztási csökkentést javasoló kezdeményezés végül a módosított, de immáron kötelező erővel bíró energiahatékonysági-irányelvben (Directive 2023/1791) az EU végső energiafogyasztásának 11,7%-os csökkentését tűzte ki célul.

Összességében a COVID-19 pandémia, az orosz-ukrán háború, valamint e kettő alatt és által gerjesztett energiaválság olyan törést okozott az EU társadalmában és gazdaságában, amelyet nem tapasztalt még korábban. Ez új forgatókönyveket, döntési kényszerűséget és radikális lépéseket eredményezett gazdaságpolitikai perspektívában. A multiválságok az EU elmúlt évtizedbeli energiapolitikáját is új megközelítésbe helyezték, a 2050-re történő karbonsemlegesség elérésének menetrendjének újratervezése a geopolitikai feszültségek következtében szükségessé vált. Azt nagyon fontos kiemelni, ami a REPowerEU-ban is rögzítésre került, hogy a Green Deal klímavédelmi célkitűzéseiről az EU nem mond le, azt nem módosítja, nem tolja ki a határidőt. Ez lényegében azt jelenti, hogy az energiaátmenet továbbra is prioritást élvez, megerősítve ezzel a hosszú távú célkitűzést, a fenntartható energiák használatát.

Ugyanakkor, a multiválságok alaposan átrendezték az energiatrilemma szempontrendszerét. Az ellátásbiztonság kérdése rövid- és középtávon kiemelt figyelmet kapott az orosz agresszió és az EU gázimport-függőségének összefüggésében, ezáltal az energiaellátást biztosító eszközök és intézkedések előtérbe kerültek. Mindezt úgy, hogy például a szénerőművek – melyek a környezeti fenntarthatóság egyik legnagyobb ellenségei – újra szerepet kaphatnak az ellátásbiztonságban amíg nem sikerül megoldani a gázbeszállítók diverzifikációját – illetve amíg egyáltalán szükség van gáztüzelésre, mely pusztán a technológiai fejlődés kérdése –, de csak rövid ideig, átmeneti jelleggel. Tehát az energiabiztonság növelése átmeneti jelleggel a környezeti fenntarthatóság rovására mehet.

Másrésről, az EU potenciális nyitása a nukleáris erőművek felé nem csak az ellátásbiztonságot növelheti, hanem hozzájárulhat a tiszta energiaátmenethez is. A REPowerEU-hoz kapcsolódó megújuló erőforrások arányának növelése az áramtermelésben, és az energiahatékonysági célkitűzések szintén azt támasztják alá, hogy az EU egyáltalán nem mondott le energiastratégia szinten és hosszú távon a fő küldetéséről, azaz a fenntartható energiaátmenet teljesítéséről. Az energiainport-függőség csökkentése hosszú ideje már fontos szempont az EU energiastratégiájában, azonban az orosz-ukrán háború következtében olyan hirtelen kardinálissá váló megoldandó problémává vált, amely nem volt összeegyeztethető többé a korábbi ütemtervekkel. A politikai döntéshozók ismét újratervezési és döntési kényszerűséggel szembesültek az energiatrilemmát illetően, hogy az EU minden áron leválhasson az orosz gáztól. Ez azonban hosszú távon az energiaátmenet felgyorsulását is magával hozhatja.

6.3. Változó energiapiaci dinamikák az EU energiapolitikai döntései nyomán

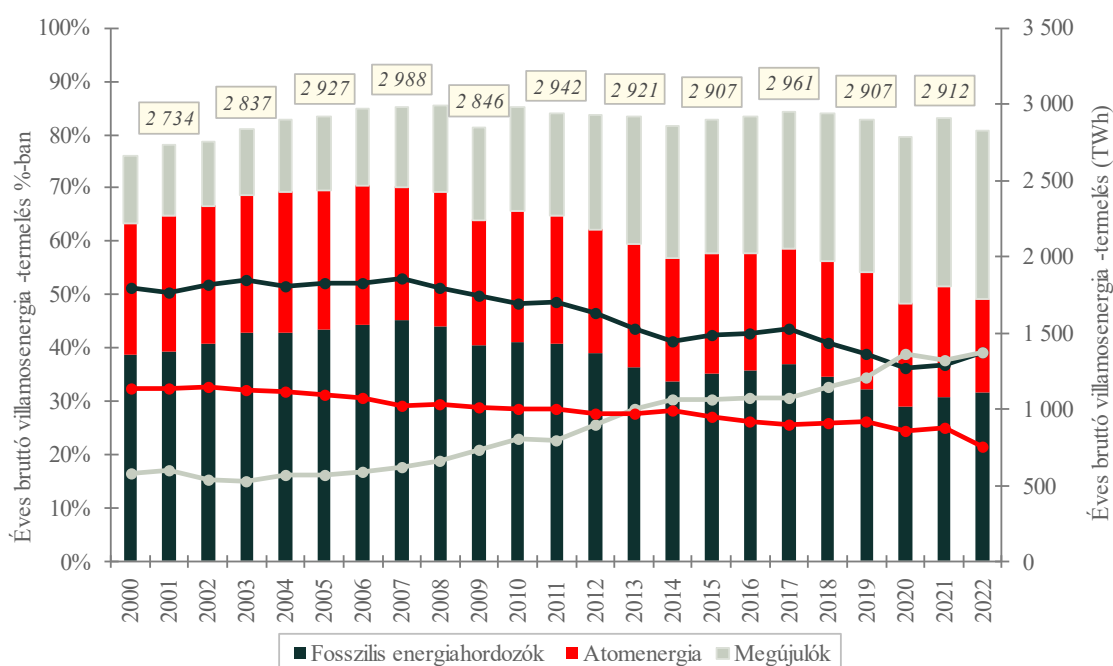
Az eddigiekben leginkább elméleti szinten, történelmi és jogi aspektusban vizsgáltam az EU energiapolitikáját illetően, és arra a konklúzióra jutottam, hogy a 2000-es évektől kezdve vált fokozatosan központi elemmé az EU energiastratégiájában a környezeti fenntarthatóság, és az energiaátmenet. Ez leginkább a 2016-os „Tiszta energia minden európainak” energiacsomag, a 2019-es Zöld Megállapodás és a kapcsolódó 2021-es „Irány a 55%!” energiastratégiai célkitűzésekben nyilvánult meg, és mely szintén a 2022-es REPowerEU fókuszában van az energiabiztonsági prioritások mellett. A következőkben azt fogom megvizsgálni, hogy mennyire sikerült az energiapolitikai irányelveket és rendeleteket a gyakorlatba átültetni, azaz mennyire látszanak az energiaátmenet jelei az EU energiapiaci (kiváltképp a villamosenergiapiaci) trendjei során az elmúlt bő 20 évben. Ennek megítéléséhez szempontrendszerként a WEC utolsó időszakban az országok energiatrilemma vizsgálatainál használt fő metrikáit fogom alkalmazni, melyeket a korábbi fejezetben ismertettem.

Az ellátásbiztonság terén alapvetően három kulcsmutató van: az energiamix a villamosenergia-termelésben (benne a megújulók arányának nagyságával), az importfüggőség mértéke, és a kiépülő termelői kapacitások nagysága.

Az 53. ábra az EU éves bruttó villamosenergia-termelését mutatja a 2000-es évek óta, mely alapján megállapítható, hogy az irány jó, még ha a megújulók arányának éves növekedési üteme lassú is. A 2000-es évek elején egészen az évtized közepéig a megújulók aránya nagyjából 16% körül mozgott. A pénzügyi válságot követően, 2011-ben a megújulók által

termelt elektromos áram elérte az 527 TWh értéket, amely a teljes 2 942 TWh össztermeléshez képest már 22,8%-os arányt jelentett. Mindeközben, a fosszilis tüzelőanyagok aránya ugyanezen időtávokban rendre ~51% és 48,6% volt, ami tehát 2011-ben még mindig több mint kétszerese a megújuló energiaforrások arányának. A megújulók 2012-ben majdnem elérték, 2013 óta pedig már többet is termeltek, mint az atomerőművek. Erre a trendre nagy hatással volt többek között a RED-I irányelv elfogadása.

53. ábra Éves bruttó villamosenergia-termelés (TWh) és megoszlása energiaforrásonként (%) az EU-ban



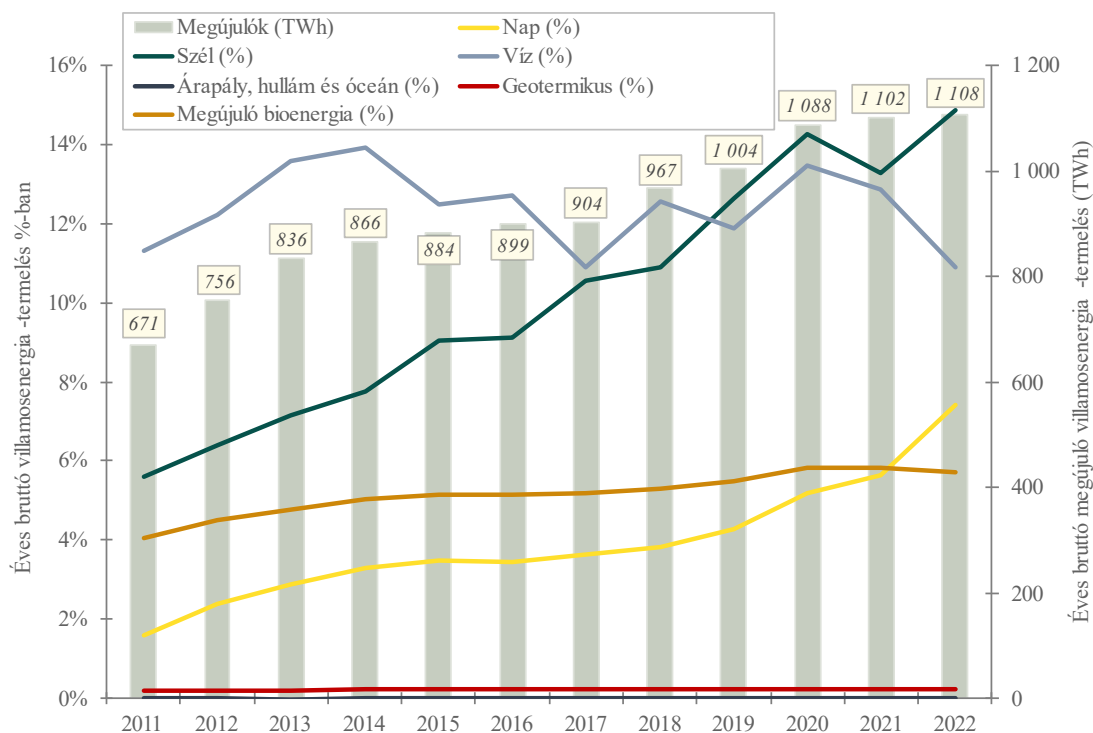
Forrás: Eurostat (é.n.-e, é.n.-d) alapján saját készítésű ábra

A következő fordulópontra egészen 2020-ig kellett várni, amikor is a megújulókból származó áramtermelés nagysága először volt magasabb (39,0%), mint a fosszilis tüzelőanyagoké (36,3%), mely külső tényezőknek is köszönhető volt. A COVID-19 pandémia és a gazdasági visszaesés okozta piaci helyzet 2020-ban tovább gyorsította az energiaátmenet folyamatát. Ugyanakkor, a 2021-2022-es évben látszik egy trendváltás. Az energiaválság és az orosz-ukrán háború kitörésének következtében az ellátásbiztonság fontossága előtérbe került, amely megtörte a fosszilis tüzelőanyagok csökkenő arányának trendjét, és az energiaválságnál ismertetett egyéb külső tényezők – főleg az időjárási körülmények – együttes hatása miatt 2021-ben a megújulókból származó áramtermelés aránya is alacsonyabb volt, mint egy évvel ezelőtt. Ám ez utóbbi szerencsére csak átmenetinek bizonyult, és 2022-ben a fosszilis

és a megújuló energiaforrások és -hordozók aránya közel azonos volt (~39,2%). Az atomenergia elfogadottsága az EU-ban tagállamonként jelentősen eltér. Egyes tagállamok, mint például Franciaország és Magyarország, nagymértékben támaszkodnak az atomenergiára a villamosenergia-termelésben, míg mások, mint Németország és Spanyolország, elkötelezték magukat az atomenergia fokozatos kivonása mellett (Timmons et al., 2014). Ezért az atomenergia szerepe az EU energiaátalakításában és a környezetvédelmi célok elérésében vitatott. Az atomenergiát támogatók azzal érvelnek, hogy az atomenergia stabil, alacsony CO₂-kibocsátású energiaforrás, amely nem járul hozzá az ÜHG-kibocsátásának növekedéséhez. Mások az ellenérveiket a nukleáris hulladéokra, a potenciális katasztrófák beláthatatlan következményeire, valamint az új erőművek építésének magas költségeire alapozzák. Többek között e negatív megítélés miatt az atomenergia részaránya 2000 és 2022 között közepes mértékben csökkent (32,3%-ról 21,5%-ra). Szerepe azonban, ahogy a REPowerEU is megjegyzi, újra az előtérbe kerülhet.

Amint azt az 54. ábra is mutatja, a megújuló energiaforrások által termelt villamosenergia 2011-ben az EU bruttó villamosenergia-termeléséből mintegy 671 TWh-t tett ki, amely a teljes termelés 22,8%-át jelentette. A megújuló energiaforrások 2022 végére közel kétszeresére nőttek (1 108 TWh), míg az arányuk 39,2%-ra emelkedett, figyelembe véve a biomassza megújulónak tekinthető részét is a számításban. A vízenergia továbbra is jelentős mértékben hozzájárult a megújuló energiaforrásokhoz, az évtized során ingadozó, de viszonylag stabil tartományban mozgó részarányát főként a változó időjárási viszonyok, különösen a csapadék- és hóolvadási tendenciák, valamint a szezonális ingadozások okozták. Ugyanakkor, jelen korszak meghatározó megújuló energiaforrásaivá a szél- és a napenergia váltak, e források szignifikáns növekedése (2011-ben rendre 5,6%, illetve 1,6%, ami 2022-re 14,9%-ra, illetve 7,4%-ra emelkedett) szintén kiemeli a gyors technológiai fejlődést és a költségcsökkentést ebben az ágazatban.

54. ábra Megújuló energiákból származó bruttó villamosenergia termelés (TWh) és energiaforrások szerinti megoszlása (%)



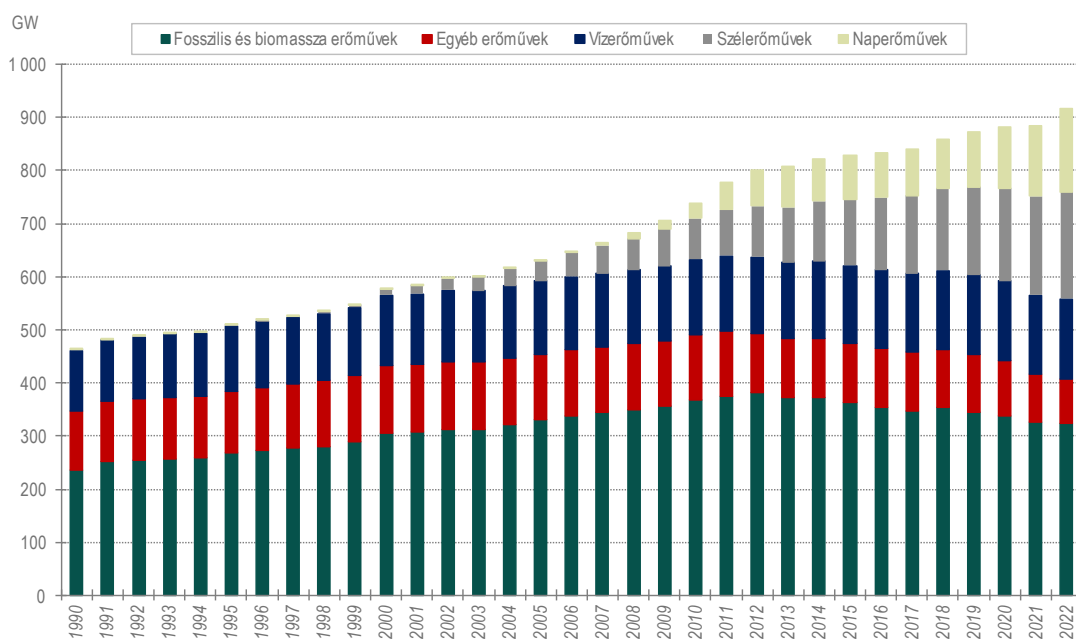
Forrás: Eurostat (é.n.-e, é.n.-d) alapján saját készítésű ábra

Ezek az ábrák arra engednek következtetni, hogy a megújuló energiaforrások növekedésének ceteris paribus az áramár csökkenését kellene eredményeznie, amely a magasabb költséggel működő erőművek piacról való kizárását eredményezné.

Az EU-s megújuló energiákhoz és ÜHG-kibocsátás-csökkentéshez kapcsolódó kötelezettségvállalások megsokszorozták a megújuló energiaforrások növekedési ütemét, amelyet, ahogy az IEA (2020a) jelentése is megjegyzi, tovább fokozott a zöld beruházások iránti növekvő kereslet, a folyamatos technológiai fejlődés által elérhető hatékonyabb eszközök és a zöld erőművek létesítésének költségcsökkentése. Ahogy korábban láthattuk, a szél- és naperőművek telepítése nőtt a legnagyobb mértékben az elmúlt két évtizedben. Ezekhez kapcsolódó kiépülő kapacitások növekedésének ütemét is szemlélte az 55. ábra. Ugyanakkor megjegyzendő, hogy az árapály- és hullámenergiában rejlő potenciál számos műszaki, gazdasági és földrajzi tényező miatt nagyrészt kihasználatlan maradt az EU-ban, míg a geotermikus energiát elsősorban a fűtésben hasznosítják jelenleg. A vízenergia jelentős megújuló energiaforrás, de bővítési lehetőségei korlátozottak, mivel az EU-ban a legtöbb optimális vízerőmű helyszín már használatban van. Ezen túlmenően, az ilyen erőművek telepítése gyakran környezetvédelmi és társadalmi aggályokat is felvet, miközben az

éghajlatváltozás jelentősen befolyásolja a vízmennyiség rendelkezésre állását. Ezért összességében az EU vízerőmű-kapacitása viszonylag maximalizálódott (IEA, 2021a). Végül a bioenergia – amely magában foglalja a biomasszát, a bioüzemanyagokat és a biogázt – ugyan az EU megújuló energia stratégiájának fontos részét képezi, de bővítését és fejlesztését egyensúlyba kell hozni a fenntarthatósági és társadalmi szempontokkal. A biomassza-termelésnek a földhasználatra, a biológiai sokszínűsége, az élelmezésbiztonságra és a CO₂-kibocsátásra gyakorolt hatása körül jelenleg is folynak társadalmi viták és szakpolitikai felülvizsgálatok annak biztosítása érdekében, hogy a bioenergia felhasználás káros környezeti hatások nélkül járuljon hozzá az EU fenntarthatósági céljainak eléréséhez (IEA, 2022a). 2023. év elején az EU 27 tagállamában 105 atomerőmű működött (ebből 56 Franciaországban), mely az egészében termelt bruttó villamos energia mintegy ötödét szolgáltatja (WNA, 2024).

55. ábra Nettó maximális villamosenergia-kapacitás az EU-ban



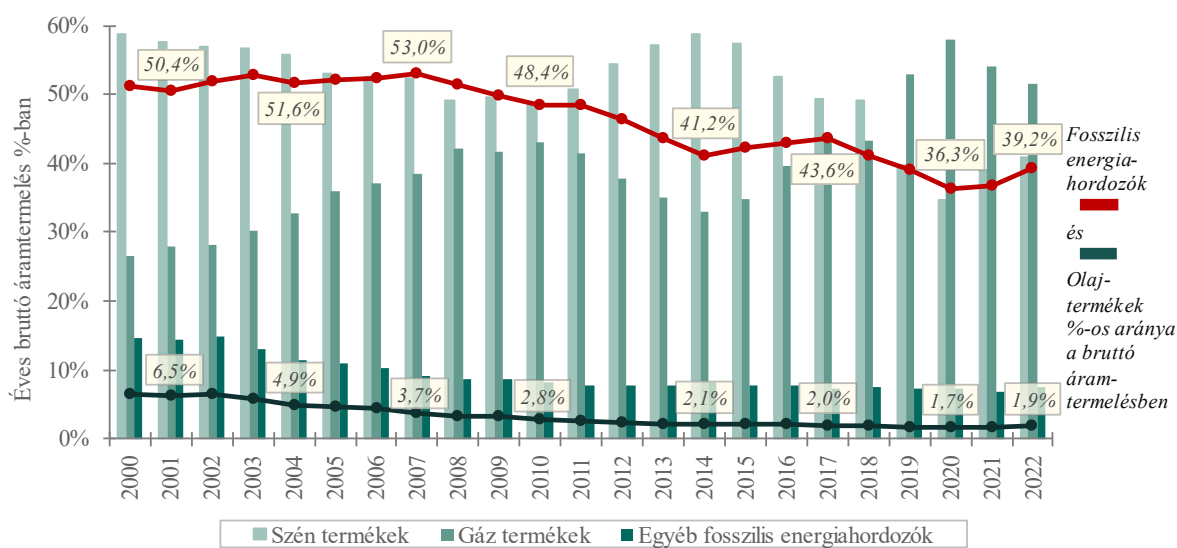
Forrás: Eurostat (é.n.-b) alapján saját készítésű ábra

Az EU tehát elsősorban a gazdaságilag legéletképesebb, technológiailag legkiforrottabb, még nem maradéktalanul kiaknázott és egyben a legtisztább lehetőségekre összpontosít, vagyis a szél- és a napenergiára. Ugyanakkor, az energiaátmenet megoldatlan problémája az időjárás-szenzitív megújuló energiaforrások változó termelési határfoka, amely a gazdaság és a társadalom óráról órára változó energiaszükséglete mellett szükségessé teszi rugalmas és szabályozható erőművek létét is, amelyeket gyorsan lehet a működésbe bekapcsolni. Ezért jelenleg továbbra is szükség van olyan nem megújuló energiaforrásokra, mint a földgáz, hogy

a rugalmas gáztüzelésű erőműveket e célból lehessen hasznosítani (Bhattacharyya, 2011; Zakeri et al., 2022).

Összességében az energiaátmeneti törekvések következtében a fosszilis tüzelőanyagok 2000 óta mintegy 12,0%-ot veszítettek a bruttó villamosenergia-termelésben betöltött arányukból. Az 56. ábra érdekes tendenciát mutat be a konvencionális energiaforrások alakulásában. Az ezredfordulókor az összes fosszilis tüzelőanyag több mint felét kitevte a bruttó villamosenergia-termelésnek (51,2%), amelyen belül a széntermékek domináltak (58,8%), melyeket a gáztermékek (26,6%) és az egyéb fosszilis tüzelőanyagok, mint például az olajtermékek, a nem megújuló biomassza és az egyéb tüzelőanyagok (14,5%) követték. Utóbbiak a 2010-es évek elejére az áramtermeléshez már csak mintegy 7-8%-ban járultak hozzá, mely arány jelenleg is változatlan (2022: 7,5%). Ezt elsősorban az olajtermékek felhasználásának csökkenése okozta (a 2000-es 12,7%-ról 2022-re 4,9%-ra csökkent az arány) a fosszilis tüzelőanyagok között. Közvetlenül a bruttó villamosenergia-termelést tekintve, a kőolaj és kőolajtermékek a vizsgált időszakban csak 1,6% és 6,6% között járultak hozzá az áramtermeléshez. Tehát az látszik, hogy az olajtermékek nem szignifikánsan és csökkenő arányban kerültek hasznosításra villamosenergia-előállítás szempontból. Ugyanakkor, a szén- és gáztermékek jelentősen változó trendeket követték az elmúlt két évtizedben, különböző gazdasági, geopolitikai és környezetvédelmi okok miatt.

56. ábra A bruttó villamosenergia-termelésben résztvevő fosszilis tüzelőanyagok főbb típusok szerinti megoszlása (%)



Forrás: Eurostat (é.n.-e, é.n.-d) alapján saját készítésű ábra

A széntermékek a 2010-es évek végéig domináltak. Ennek oka, hogy a szén bőségesen rendelkezésre állt, és egyes EU tagállamok előnyben részesítették a szénfelhasználást a földgázzal szemben, csökkentve ezzel az importált földgáztól való függőségüket, mely javarészt Oroszországból származott (Leal-Arcas et al., 2016). Ráadásul a földgáz ára akkoriban magasabb volt, mint a szén ára, ami szintén hozzájárult ahhoz, hogy a széntermékek kiaknázását részesítették előnyben. Azonban a környezetvédelmi problémák és az ehhez kapcsolódó olyan nemzetközi megállapodások, mint a 2015-ben elfogadott Párizsi Megállapodás nyomást gyakoroltak az országokra, hogy csökkentsék a szénfelhasználást. Ahogy korábban is ismertettem, a széntermékek a leginkább CO₂-intenzív energiahordozók, ezért számos ország törekszik a szénfelhasználás csökkentésére vagy fokozatos megszüntetésére a tisztább energiaforrások használatának érdekében. A szénnek a levegőminőségre és a közegészségügyre gyakorolt negatív hatása hozzájárult a széntüzelésű erőművek működésére vonatkozó szigorúbb szabályozáshoz. A nyomást tovább fokozta az EU ETS CO₂-kvóta rendszerének bevezetése, mivel a szén a megtermelt energiaegységre vetítve a legtöbb CO₂-t bocsátja ki (Hafner & Luciani, 2022).

A szén helyett a földgáz felhasználásának másik oka a felhasználás rugalmassága. A gáz elégetése egy sokkal rugalmasabb folyamat, mint a széné, ami elengedhetetlen a megújuló energiaforrások termelési volatilitásának kiegyensúlyozásához. Megfigyelhető, hogy a vizsgált időszak alatt a szén- és gáztermékek aránya az áramtermelésben résztvevő fosszilis tüzelőanyagokon belül ellentétes trendet követtek. A pénzügyi válság időszakáig a földgáz mennyisége jelentősen nőtt, míg a széntermékeké csökkent, amely javarészt a növekvő LNG importnak és az energiaátmeneti törekvéseknek volt köszönhető. Ugyanakkor, a válságot követő recesszió és kilábalás időszaka alatt megint a felhasznált széntermékek aránya volt felfutóban a gáztermékekkel szemben. Az EC (2021) jelentése alapján 2011 és 2014 között ez főleg a csökkenő LNG importnak tudható be, mivel az LNG Ázsiában és Latin-Amerikában ekkoriban volt felfutóban, amely magasabb gázárakhoz vezetett, így a széntüzelésű erőművek működtetése még mindig jobban megérte gazdaságilag. Az újabb fordulópontot a 2014-es év jelentette, melytől kezdve egészen a COVID-19-es pandémiáig folyamatosan nőtt a gáztermékek aránya a fosszilis tüzelőanyagokon belül, mígnem 2019-en már meg is előzte a széntermékek pozícióját. A gáztermékek jelentősen versenyképesebbé váltak a széntermékekkel szemben, főleg miután az EU ETS rendszer új fázisba lépett (Zakeri et al., 2022).

A pandémia, illetve az azt követő energiaválság azonban megint újrírta a trendeket. 2020-ban 36,3%-ot képviseltek összesen a fosszilis tüzelőanyagok a bruttó villamosenergia-

termelésben, amelynek nagy részét, mintegy 57,9%-ot a gáztermékek tették ki, míg a széntermékek 34,8%-ot és az egyéb fosszilis energiahordozók 7,3%-ot képviseltek. Az utolsó két vizsgált évben nem csak a bruttó villamosenergia-termelésben felhasznált fosszilis tüzelőanyagok általános szintje nőtt meg 39,2%-ra, hanem a széntermékek is reneszánsz korszakukat élték a földgázzal szemben. Ezt a trendet elsősorban geopolitikai tényezők befolyásolták.

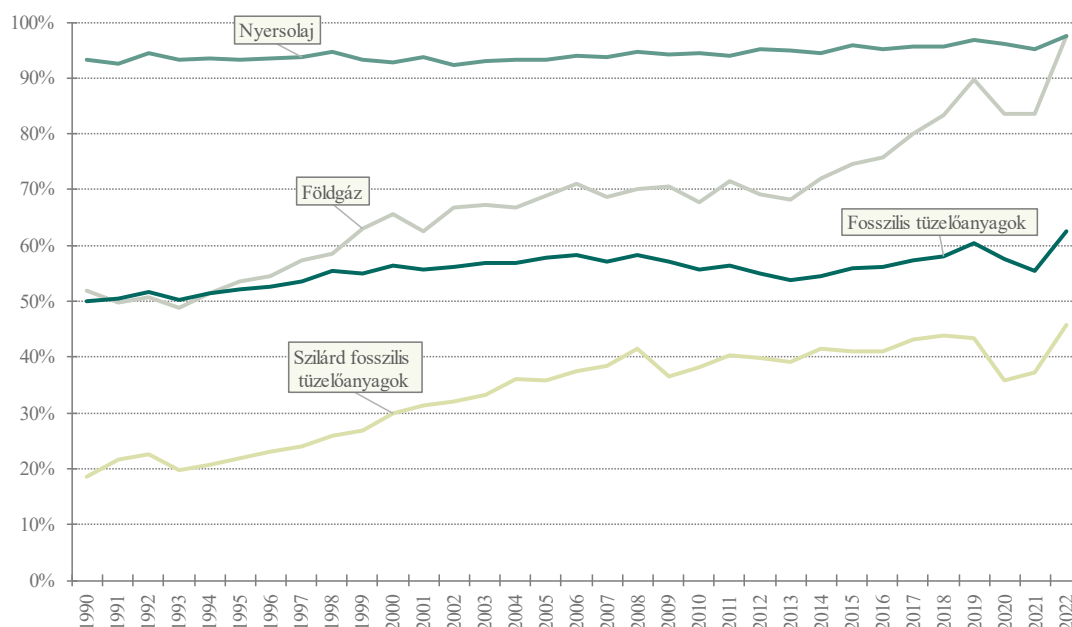
Ami a földgáz-tendenciákat illeti, a földgáz árának erőteljes emelkedését a COVID-19 világjárványból való vártnál gyorsabb gazdasági fellendülés okozta mivel a kínálat nem tudott lépést tartani a hirtelen megugró kereslettel. Ezt nagyban fokozták a növekvő geopolitikai feszültségek, a kitört orosz-ukrán háború és az EU szankciós politikája kétségbe vonta a jövőbeli orosz földgázszállítások megbízhatóságát. Emellett számos uniós tagállam is úgy döntött, hogy a potenciális hideg téli hónapok esetleges földgázellátási problémákra számítva megőrzi földgázkészleteit. Mindezek arra késztették az uniós országokat, hogy az ellátás biztonsága érdekében alternatív energiaforrásokat keressenek, és ilyen körülmények között átmenetileg a széntermékek gazdaságilag életképesebbé váltak. A bizonytalanság miatt a szén – amely gyakran több forrásból nagy mennyiségben is beszerezhető – egyes országok számára rövid távon biztonságosabb opcióvá vált. A megugró kereslet hatására a felhasznált mennyiség mellett a szén ára is emelkedett (IEA, 2023; Tol, 2023; Zachmann et al., 2023).

Fontos megjegyezni, hogy ez a 2021-2022-es trend egy extrém piaci és geopolitikai körülményekre adott átmeneti válasz következménye csak. Bár a REPowerEU kilátásba helyezi a széntüzelésű erőművek a tervezettnél lassabb kivezetését azok energiaellátás-biztosításában betöltött szerepük miatt, de az EU hosszú távú elkötelezettsége az ÜHG-kibocsátásának csökkentése és a megújuló energiaforrásokra való áttérés iránt továbbra is kulcsfontosságú, a földgáz szerepét pedig gyakran tekintik áthidaló megoldásnak ebben az átmenetben annak a szénfelhasználásnál tisztább jellege miatt (Zakeri et al., 2022). Összességben az is látszik, hogy a fosszilis (és biomassza) kapacitások kiépítése 2012 után megtorpant, majd csökkenésnek indult, miközben a megújulók térhódítása elkezdődött.

A fosszilis energiahordozókhoz kapcsolódik még az EU energiafüggőségének vizsgálata. Az EU elmúlt 30 évében ennek szektorfüggetlen alakulását az 57. ábra prezentálja. Ez nagyban összefügg az energiakörképénél ismertetett a természeti erőforrások elérhetőségével. A 2020-as évek elején a fosszilis tüzelőanyagok importját illetően egyértelműen látszik a COVID-19 okozta energiaszükséglet visszaesés, illetve a hirtelen fellendülés következménye is. Az orosz-ukrán háború azonban a korábbiakkal ismertetettekkel összhangban új helyzetet teremtett, mivel a kialakult bizonytalan helyzetben kritikussá vált az alternatív források keresése, és a

magasabb fokú készletezés. Ez összességében 2022-re visszaállította a fosszilis tüzelőanyagok függőségének elmúlt időszakbeli trendjét, míg a földgáz tekintetében jelentős növekedést eredményezett.

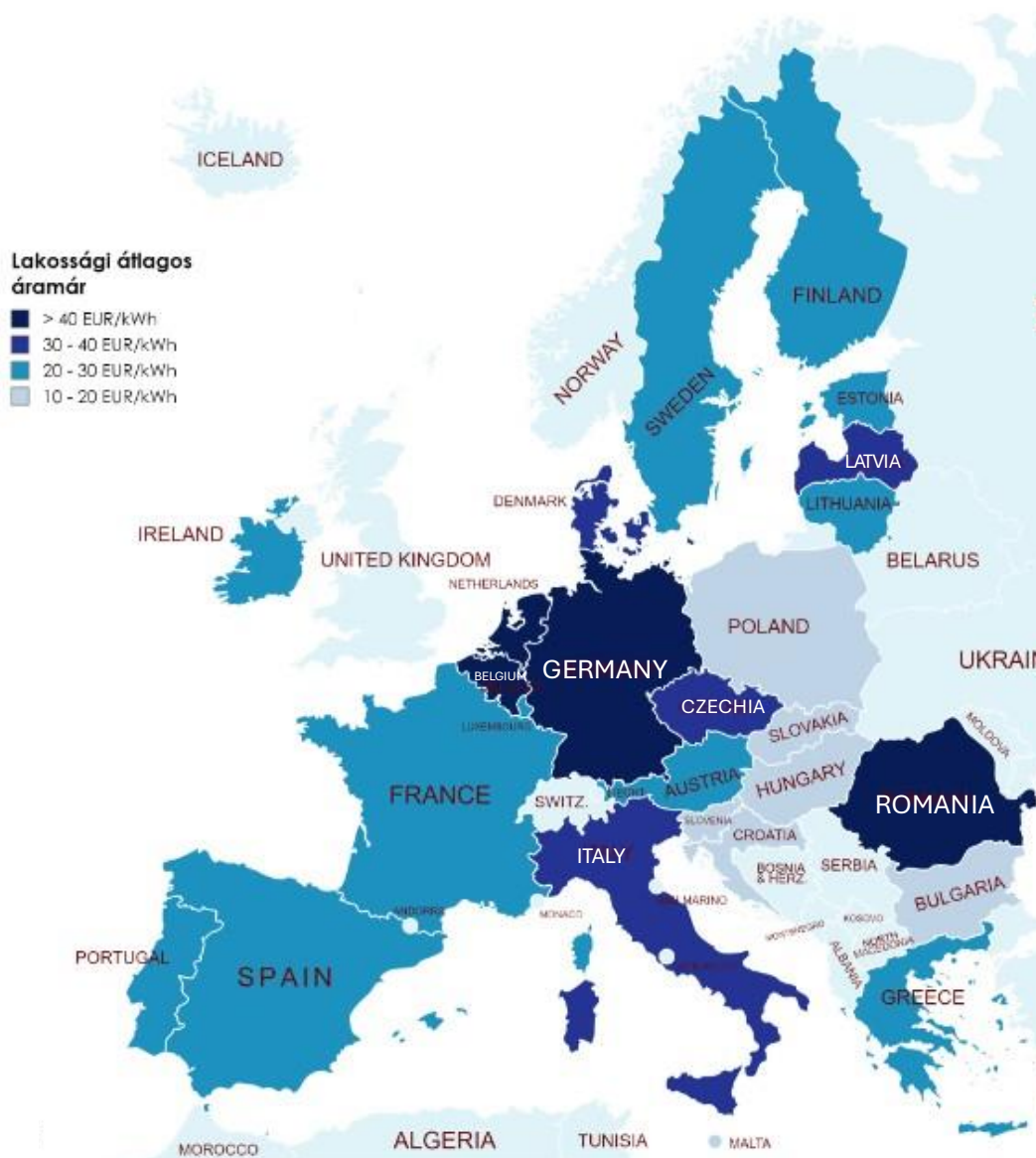
57. ábra Energiafüggőség aránya 1990-2022 között



Forrás: Eurostat (é.n.-j) alapján saját készítésű ábra

Áttérve a gazdasági aspektusra, a WEC itt a hozzáférhetőség, illetve az energiaárak alakulását tekinti kiindulási alapnak. Az IEA legfrissebb SDG-7 jelentése alapján 2021-ben a világ lakosságának mintegy 91 %-a rendelkezett villamosenergia-hozzáféréssel. Mivel az EU-ban minden állampolgárnak joga van ahhoz, hogy otthonát a helyi villamosenergia-hálózathoz csatlakoztassa és villamos energiával lássa el, így ez a hozzáférhetőség aránya az EU-ban 100%. 2023-ra a nagykereskedelmi energiaárak stabilizálódtak, és visszatértek a válság előtti évek átlagához. A lakossági áramárak megítélése nehezebb, hiszen országonként eltérnek az végső áramarat befolyásoló adózási elemek, valamint az egyedi rezsizabályok, hatósági tarifák. Az 58. ábra szerint 2023 első felében Hollandiában (47,5 EUR/kWh), Belgiumban (43,5 EUR/kWh), Romániában (42,0 EUR/kWh) és Németországban (41,3 EUR/kWh) volt a legmagasabb az átlagos lakossági villamos energia ára az EU-ban, míg a legolcsóbb Bulgáriában (11,4 EUR/kWh), Magyarországon (11,6 EUR/kWh) és Máltán (12,6 EUR/kWh) volt ebben az időszakban.

58. ábra Lakossági átlagos villamosenergia-árak* az EU-ban 2023 első felében



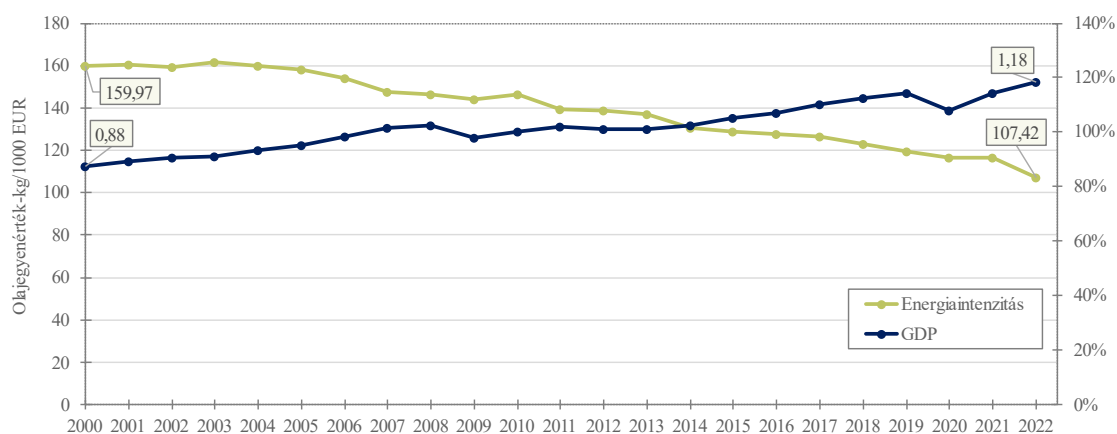
*Megjegyzés: Az árak a 2 500 kWh és 5 000 kWh közötti éves fogyasztású háztartások átlagáraként vannak feltüntetve. Az árak továbbá minden adót és illetéket tartalmaznak.

Forrás: Eurostat (é.n.-h) alapján és Mapchart segítségével készült ábra

A környezeti fenntarthatóság szempontjából a WEC a villamosenergia-termelés karbonsemleges arányát, a végső energiaintenzitást, valamint az egy főre jutó CO₂-kibocsátást tekinti fő mutatóknak. Ezek közül a legelsővel már részletesen foglalkoztam az energiamix értékelése során. Látható volt, hogy míg 2020-ban a megújulók aránya 16,4% volt (mely az atomenergiával, mint alacsony karbonkibocsátású energiával 48,7%-ot tett ki, addig ez 2010-re 22,9%-ra (51,5%), 2019-re 34,5%-ra (60,8%), míg 2022-re már 39,2%-ra (60,7%) nőtt meg. Tehát a javuló tendencia egyértelműen megállapítható.

Az energiatenzitás, mely a gazdasági tevékenység (pl. GDP) egy egységére jutó energiafelhasználása, közvetlenül kapcsolódik a környezeti fenntarthatósághoz. Alacsony energiatenzitású gazdaságok hatékonyabban használják az energiát, ami csökkentheti az ÜHG-kibocsátás mértékét. Az energiahatékonysági javulások és a tiszta, megújuló energiaforrásokra való áttérés hozzájárulhatnak az energiatenzitás csökkentéséhez. Ezt a trendet az 59. ábra vizualizálja.

59. ábra Az EU energiatenzitásának és GDP-jének* alakulása 2000-2022 között



*Megjegyzés: 2010-es alapévvvel indexált láncviszonszámok szerint.

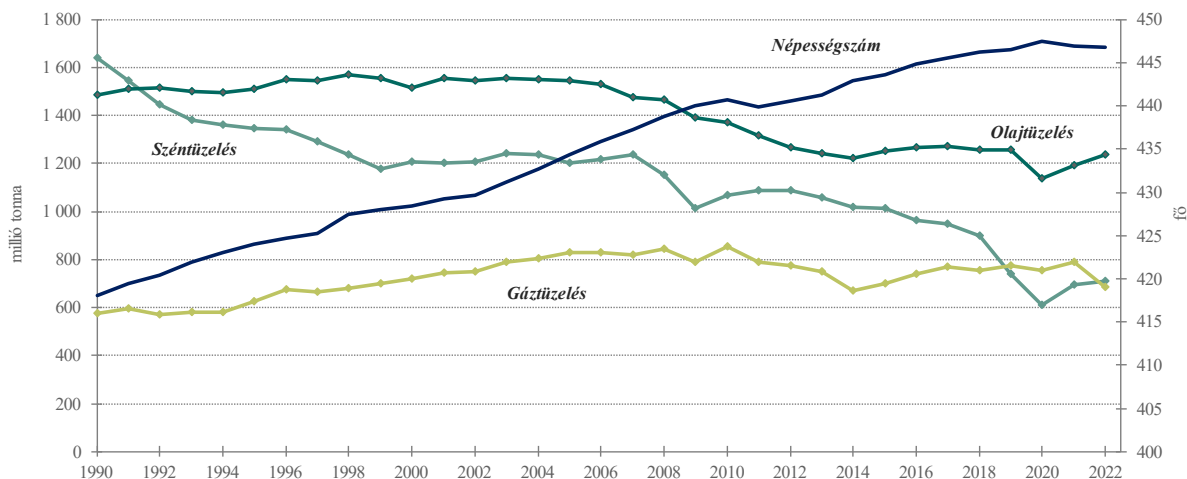
Forrás: Eurostat (é.n.-c, é.n.-g) alapján saját készítésű ábra

Az EU energiatenzitása – az inflációs hatások kiszűrése mellett – látszólag egy csökkenő tendenciát mutat, amely tehát azt is jelentheti, hogy a környezeti fenntarthatósági szempont javuló tendenciát mutat e tekintetben. Mivel ez egy viszonszám, tehát a számláló, vagy nevező, vagy e kettő együttes hatásának változása is befolyásolhatja a kalkulált értéket. Ezért fontosnak tartom megvizsgálni és összehasonlítani az ugyanolyan bázisév alapján indexált GDP változás alakulását is ugyanerre az időszakra vonatkozólag. Látszik, hogy a 2010-es bázisévhez képest összességében a GDP folyamatosan nőtt és csak a pénzügyi válság, illetve a pandémia miatt mutatott visszaesést. Ez tehát alátámaszthatja a korábbi állítást, miszerint az EU jó úton halad az energiahatékonyság tekintetében.

Végezetül, a környezeti fenntarthatósági szempontok közül már csak az EU karbonlábnyomának megítélése van hátra. Ez nem csak az energiatenzitás környezeti fenntarthatóságának egyik fontos mérőszáma, hanem gyakorlatilag magának az energiaátmenet folyamatának is talán a legmegfoghatóbb értékelési metrikája. A globális éghajlatváltozás jelenségének áttekintése során részletesen foglalkoztam ezzel a témakörrel már, most a

60. ábrán keresztül az EU fosszilis tüzelőanyag-karbonkibocsátására fókuszálok a WEC szempontrendszerrel összhangban, az 1990-es évektől vizsgálva.

60. ábra Az EU CO₂-kibocsátása a fosszilis tüzelőanyagok tekintetében



Forrás: Eurostat (é.n.-f) és Friedlingstein et al. (2023) alapján saját készítésű ábra

A villamosenergia-termelés – mely a teljes karbonkibocsátás mintegy 90%-át felel – szempontjából fontos szén- és gázerőművek karbonkibocsátás-mennyisége a COVID-19-ig egy ellentétes irányú folyamatot tükrözött, ahol is az olló 2019-ben zárt össze. A gáztüzelés esetén a technológia fejlődése is sokat számított, hiszen a ko- és trigenerációs, illetve a kombinált ciklusú erőművek különböző módon járulnak hozzá a gázfelhasználás hatékonyságának növeléséhez, így csökkentve a pótlólagos villamos (és hő) energia termelésének szükségességét. Mint a megújuló áramtermelés szükséges velejárója, a gázfogyasztás, és így a kapcsolódó CO₂-kibocsátás nem tudott olyan szignifikánsan csökkeni, mint ami a szénél látható. A több aspektusban már vizsgált multiváltságok – most ideértve a 2008-as pénzügyi válságot is – következményeinek a karbonkibocsátásban is látszik a hatása. Ahogy a széntüzelés az energiaválság és orosz-ukrán háború miatt előtérbe került ideiglenesen, úgy tört meg a korábbi csökkenő trend, míg a gáztüzelésnél pedig épp fordított a helyzet. Ugyanakkor, a 2022 folyamán életbe lépő orosz olajimport szankcióknak a hatásai még nem látszódnak érdemben a CO₂-kibocsátás tekintetében, melyet részben az alternatív kőolajbeszállítók felfutása is magyaráz, továbbá a kapcsolódó elsődleges energiafelhasználás (pl. közlekedés) nem csökkenő trendje is jelez.

Az EU energiapiaci trendjeinek vizsgálata során arra a következtetésre tudok jutni, hogy összességében a piaci tendenciák – beleértve az energiaár és energiamix változás, importfüggőség nagysága, karbonkibocsátás stb. alakulását – lekövetik az EU

energiapolitikájában és -stratégiájában bekövetkező változásokat. A válságok hatásai egyértelműen látszódnak a számokban, a háttérben húzódo okok és dinamikák ugyanakkor válságfüggőek. A 2020-as multiválságok ismét előtérbe helyezték az energiaellátás biztonságának kérdését, miközben nem került le napirendről a 2050-re elérendő nettó zéró kibocsátás elérése. Sőt, a politikai döntéshozók éppen a tiszta és megújuló technológiákba való magasabb fokú investálásban látják a megoldást, mely hozzájárul a folyamatosan épülő megújuló, elsősorban nap- és szélenergiák kapacitás kiépítéséhez, és a különböző zöld gazdasági szempontok (zöld pénzügyek, támogatási formák és adózási kedvezmények) térnyeréséhez. Ez a folyamat hosszú távon a hagyományos erőművek számára a véget fogja jelenteni. Ezzel szemben, a rendszernek egyre nagyobb mennyiségű és rugalmasan elérhető kapacitásra is szüksége van a mindenkori villamosenergia-igény kielégítése érdekében a megújuló erőművek időjárásfüggő természetéből és a változó fogyasztói igényekből kifolyólag. Ebben az akkumulátor-technológia fejlődése, az okos infrastruktúrák és intelligens hálózati irányítási rendszerek terén elért innovációk, valamint a hidrogéntárolásban rejlő lehetőségek kiaknázása mind megoldást jelenthetnek hosszú távon. A lényeg, hogy az EU elkötelezett a tiszta és megújuló energiaforrások növelése mellett, miközben stratégiájában figyelembe veszi az ellátásbiztonság, energiaegyenlőség és a szélesebb körű környezeti fenntarthatóság szempontjait.

7. Árampiaci hatások gyakorlati vizsgálata különböző időhorizontok függvényében

Az előző fejezetben az energiatrilemma tekintetében vizsgáltam az EU energiapolitikai és -piaci változásainak perspektívájából, feltérképezve, hogy adott belső vagy külső esemény és intézkedés hatására mely energiagazdálkodási dimenzió került inkább előtérbe mind jogszabályi, mind piaci szempontból. Ezek megerősítették azt a megállapítást, hogy az energetika egésze rendszerszemléletben működik, így a fenntartható energiagazdálkodás és az energiatrilemma szempontrendszerének értelmezése során tulajdonképpen nem lehetséges *ceteris paribus* vizsgálni. Továbbá, a villamosenergia-piac működési mechanizmusánál megvizsgáltam a különböző energiaforrások és -hordozók energiamixbeli változásának hatását a nagykereskedelmi villamos energia elszámolóárára, ahol szintén összefüggést véltem felfedezni az áramár alakító tényezők között, kiváltképp a megújuló áramtermelés és a gáztüzelésű erőművek ármeghatározó szerepében. E gondolatmenetet folytatva a következőkben olyan empirikus vizsgálatra fog sor kerülni, mely feltárja a nagykereskedelmi áramár alakulásának és az általam kiválasztott, a működési modellhez szorosan kapcsolódó befolyásoló tényezők statisztikailag alátámasztott kapcsolatrendszerét.

A kutatási módszertannál korábban már ismerttettem, hogy a nagykereskedelmi villamosenergia-árak (EP) mint eredményváltozó statisztikai vizsgálatához a kiválasztott potenciális magyarázóváltozók körét a villamosenergia-piac működéséből, valamint az áramárakat befolyásoló főbb tényezők meghatározásából következtettem. E kör azonban szűkülhet a modelltesztelések eredményeinek függvényében. Ehhez kapcsolódóan, még a konkrét statisztikai elemzések elvégzése előtt megbecsültem, hogy az eredmény- és a potenciális magyarázóváltozók között milyen erősségű és irányú asszociációs kapcsolat állhat fent (*14. táblázat*).

14. táblázat Az empirikus kutatásban résztvevő magyarázóváltozók becsült asszociációja az eredményváltozóval

Potenciális magyarázóváltozó	Mértékegység	Asszociáció becsült jellege*
Nettó áramtermelés (NEG)	TWh	+ 1
Megújulókból származó bruttó energiatermelés (RES-E)	%	- 3
ICE TTF határidős gázár (TTF)	EUR/MWh	+ 3
ICE Brent határidős olajár (BRENT)	USD/bbl	+ 1
ICE Newcastle határidős szénár (NEWC)	USD/t	+ 2
EU ETS szén-dioxid kvóta ár (EUA)	EUR/t	+ 2

Forrás: Saját összeállítás

Azt várnám, hogy a függő és valamennyi magyarázó változó között a kapcsolat pozitív irányú lesz, kivéve a megújuló energiaarány esetében a merit-order mechanizmus miatt. A megújuló energiaforrásokból származó termelés növekedése ceteris paribus jobbra tolja el az elméleti görbét, míg a megújulóenergia-kapacitás jelentős és hirtelen eltűnése a kínálatból, például az időjárás változásai miatt ellentétes hatást gyakorolna az árakra, hiszen a kiesést alternatív (legtöbb esetben gáztüzelésű) erőművek aktiválásával kell ellensúlyozni. Mindazonáltal hosszú távon a megújuló energiaforrások növekedése átlagosan csökkenti az EP-et. Továbbá, a változók közötti erősségek alapján azt feltételezem, hogy a RES-E és a TTF a legerősebb (ugyancsak a merit-order és a jelenlegi gyakorlat miatt), míg az EUA és a NEWC mérsékelt erősségű kapcsolatot mutat a függő változóval. A korábbi ábrák alapján sem a NEG, sem a BRENT nem befolyásolhatja jelentősen az EP-et. Előbbi esetében nem látszódik határozott tendencia éves szinten, míg általánosságban az olajtermékek a bruttó villamosenergia-termelésnek átlagosan csak mintegy 2,3%-áért voltak felelősek a 2007-2022 közötti időszakban.

A változók közötti asszociációs kapcsolat elméleti megértése segítséget fog nyújtani mind a korreláció- és regressziószámításnál, mind pedig az idősorelemzésnél. Továbbá, mindkét vizsgálathoz szükséges az alapadatokat megfelelően előkészíteni. A természetes alapú transzformációk, mint például a logaritmikus, a gyök- vagy a hatványtranszformációk alkalmazása a változókon több problémát (linearitás hiánya, variancia stabilizálása, szélső értékek kezelése, adatok normalizálása stb.) is segíthetnek megoldani, ezáltal javíthatják az elemzések eredményeinek minőségét. Emellett számos esetben érdemes lehet a regressziós együtthatókat rugalmassági tényezőkre is átalakítani, amely azt méri, hogy egy változó hogyan reagál egy másik változó egy százalékos változására. Ehhez természetes alapú logaritmus

transzformációt kell alkalmazni az adatsorokon, és a transzformált változókat felhasználni a modellekben. A 10-es alapú logaritmust használva, a logaritmikus skálán egy egységnyi növekedés a lineáris skálán az eredeti érték tízzel való megszorzásának felel meg.

A logaritmusos transzformáció alkalmazása a regressziós modellekben különösen hasznos lehet, mivel, ha minden változót logaritmusosan transzformálunk, akkor közvetlenül a változók rugalmasságait adjuk meg a regressziós együtthatókban. Ez a transzformáció egyébként az idősorelemzésben is egy gyakran alkalmazott technika, nemcsak a rugalmasságok értelmezésére, hanem az adatsorok varianciájának stabilizálására, a ferdeség csökkentésére és a kapcsolat linearizálására is, ezáltal javítva a modell általános pontosságát. Fontos azonban megjegyezni, hogy a logaritmikus transzformáció nem garantálja a stacionaritást. Ennélfogva, vizsgálataim során alapadatokkal és log-transzformált (illetve log-differenciált) adatsorokkal is dolgozni fogok, melyeket minden releváns számításnál és táblázatnál jelölni fogok.

Végezetül, ugyan a potenciális változók térbeli és időbeli paraméterei a kutatási módszertan során átfogóan ismertetésre kerültek már, de mivel mindkét vizsgálat eltérő időhorizontokra épülő modell-összehasonlításokról szól, így a pontos vizsgálati időintervallumok más megközelítésben ismét röviden bemutatásra kerülnek a következőkben. Előtte azonban szükségesnek és fontosnak tartom röviden áttekinteni a korábbi releváns empirikus kutatások eredményeit mindkét esetben.

7.1. A nagykereskedelmi villamosenergia-árak alakulásának statisztikai vizsgálata

Az energiahordozókkal kapcsolatos korábbi kutatások és tanulmányok elsősorban a fosszilis tüzelőanyagok ára és a villamosenergia-árak közötti kapcsolatra összpontosítottak. Asche et al. (2006) kointegrációs elemzést végzett az energiaárak és bizonyos időintervallumok közötti korreláció változásainak vizsgálatára a nyersolaj, a földgáz és a villamos energia havi nagykereskedelmi árainak felhasználásával. Arra jutottak, hogy egyrészt a tüzelőanyag-árak ingadozásai hatással vannak a villamosenergia-árakra, másrészt pedig mielőtt az Egyesült Királyság gázpiacának az európai kontinentális piaccal való fizikai összekapcsolása megtörtént volna, 1995 januárja és 1998 júniusa között már egy összekapcsolt energiapiacot azonosítottak be. Bencivenga et al. (2010) a nyersolaj-, földgáz- és villamosenergia-árak közötti kapcsolatot vizsgálta feltétel nélküli korrelációs elemzéssel rövid távon, valamint kointegrációs megközelítéssel a hosszú távú kapcsolat felméréséhez. Eredményük szintén megerősítette az ezen energiahordozók közötti integrált piacot létét. Mohammadi (2009) a három alap fosszilis

tüzelőanyag, valamint a villamos energia árainak a kapcsolatát vizsgálta hosszú és rövid távon az USA piacain az 1960-2007 közötti éves adatokra támaszkodva. A vizsgálata során nem talált egységes, villamos energiából, szénből, földgázból és nyersolajból álló energiapiacot, mivel az ő elemzése alapján az USA-ban az üzemanyagárak nem elsődleges befolyásoló tényezői a villamosenergia-árak alakulásának. Emery és Liu (2002) tanulmányában szintén kointegrációt vélt felfedezni a villamos energia és a földgáz határidős árai között. Mjelde és Bessler (2009) többváltozós idősoros elemzést alkalmazott a heti áradatakra, és kimutatta, hogy az amerikai villamosenergia-árak csúcsidőszakokban hatással vannak a földgázárakra, míg utóbbiak a nyersolaj árait is befolyásolják. Moutinho et al. (2011) az energiahordozók közötti hosszú és rövid távú, valamint a villamosenergia-árak és a nyersanyagárak közötti kapcsolatot vizsgálta. Az eredményeik szerint a villamosenergia-árát a földgáz áralakulása magyarázza. A közelmúlt geopolitikai turbulenciái miatt Zhou et al. (2023) a gáz- és villamosenergia-árak közötti kapcsolatot vizsgálta. Eredményeik értelmében a hosszú távú gáz- és villamosenergia-árak között kointegrációs kapcsolat áll fenn. Végül Uribe et al. (2022) 21 európai piacra vonatkozóan vizsgálta a földgázsokk közvetlen hatását a villamosenergia-árakra 2015. januárja és 2022. márciusa között. Kvantilis regresszioelemzésük arra engedett következtetni, hogy e hatás a piaci integráció szintjétől függ, valamint, hogy a scenárióik szerint a sebezhetőség olyan országok esetében jelentkezik főleg, amelyek energiamixében viszonylag alacsony a földgáz aránya.

Más tanulmányok a nagykereskedelmi villamosenergia-árakat meghatározó tényezőkkel is foglalkoznak, kiváltképp fókuszálva a megújuló energiaforrások szerepére e tekintetben. Hirth (2018) Németország és Svédország villamosenergia-piacát modellezte 2008 és 2015 között, hogy meghatározza mely tényezők – például az energiaárak, a megújuló energia, a villamosenergia-kereslet, a nettó áramimport stb. – járultak hozzá leginkább a másnapi árak változásához. Arra jutottak, hogy mindkét országban a megújuló energiaforrások bővülése volt a legjelentősebb hatással az árakra. Cevik és Ninomiya (2022) panel kvantilis regressziós megközelítést alkalmazott, hogy felmérje a megújuló energia (szél- és napenergia) hatását a nagykereskedelmi villamosenergia-árak szintjére és volatilitására 24 EU-tagállamban a 2014-2021 közötti időszakban. Az elemzések alapján megállapították, hogy a megújuló energia felhasználásának 1%-os növekedése a nagykereskedelmi villamosenergia-árak 0,6%-os csökkenéséhez vezet. Ballester és Furió (2015) kutatása a spanyol villamosenergia-piacot vette górcső alá a megújuló energiaforrások villamosenergia-termelésben betöltött aránya és a másnapi villamosenergia-árak közötti kapcsolat szempontjából. Az adatsorok alapján arra következtettek, hogy statisztikailag szignifikáns és negatív kapcsolat található a változók

között. Spanyolországból Németországra áttéve a fókuszot, Cludius et al. (2014) idősoros regresszioelemzést alkalmaztak a szél- és napenergia, valamint a villamosenergia-kapacitás mint független változók felhasználásával, hogy megbecsüljék a szél- és napenergia által termelt villamos energia merit-order hatását Németországban a 2008-2012 közötti időszakra vonatkozóan. A végső modell azt mutatta, hogy az azonnali piaci ár átlagos csökkenése 0,8 és 2,3 EUR/MWh között volt minden egyes további megújuló energiaegység növekményre vetítve, ceteris paribus. Rathmann (2007) szintén a németországi villamosenergia-árakat vizsgálta az EU ETS és a megújuló energiák támogatási rendszereinek szempontjából. Moreno et al. (2012) az EU-27 országaira kiterjedő, 1998 és 2009 közötti időszakra vonatkozó idősoron alapuló ökonometriai panelmodellt dolgozott ki, hogy feltárja többek között a lakossági villamosenergia-árak és a megújulóenergia-termelés teljes bruttó villamosenergia-termelésben való részesedése közötti kapcsolatot. Megállapították, hogy a lakossági villamosenergia-árak a megújulóenergia-termelés növekedésével együtt emelkednek, mivel ezt főként a megújuló energiaforrások állami támogatási rendszerei (kötelező átvételi tarifák, kvótakötelezettségek, beruházási támogatások stb.) ösztönzik, amelyeknek költségét általában végső soron a végfelhasználó fizeti meg. Sorokin et al. (2023) a nyersolaj ára és a megújulóenergia-termelés közötti kapcsolatot vizsgálta, más változók mellett. Különböző statisztikai megközelítések során arra a következtetésre jutottak, hogy a kőolajkitermelés változatlan szintje mellett a megújuló energiaforrásokból származó energiatermelés növekedése az olajárak emelkedéséhez vezet. Halkos és Tsirivis (2023) a nagykereskedelmi villamosenergia-árak helyett szintén a lakossági villamosenergia-árak fő mozgatórugóit vizsgálta 26 uniós országban a 2003-2019 közötti időszakra vonatkozóan. A panel adatokra épülő ökonometriai módszerük alapján a megújuló energiaforrások részarányának növekedését az áramárakra vetítve negatívnak és szignifikánsnak találták, egészen pontosan a két változó között négyzetes kapcsolatot figyeltek meg.

Az előbbieken bemutatott szakirodalmak hozzájárultak e kutatási témakör elgondolásainak és végső irányának kialakításához, szintézist nyújtva az empirikus kutatás lefolyásához. A továbbiakban részletezett empirikus kutatásom vizsgálati szempontjai és eredményei a Herczeg és Pintér (2024) megjelent cikkünkben származnak.

7.1.1. Vizsgálati szempontok és eredmények

Jelen empirikus kutatásban kétféle időintervallumot különböztetnek meg. Az első időszak 2015 január és 2020 december közötti időszakra vonatkozólag tartalmaz havi adatokat, így

összesen 72 megfigyelést veszek alapul a multiválságok felfutása előtti időszakban. Míg a már a multiválságokkal is terhelt teljes időszak esetében az adatkészlet 2015. januárjától 2023. augusztusáig terjedő időhorizontra vonatkozik, tehát immáron 104 megfigyelést tartalmaz.

A korreláció és regresszió elemzések elvégzése előtt valamennyi változót a korábbiakban leírtaknak megfelelően logaritmikus transzformációnak és differenciálásnak vettem alá, így a skálán az együtthatók közvetlenül értelmezhetők megközelítőleg arányos különbségekként, valamint elősegíthetik az idősorok stacioner állapotba való átranzformálását. Ezek után mind az eredeti, mind pedig a log-transzformált, és log-differenciált adatsorokon különböző stacionaritási tesztek végeztem el az idősoros adatok stacionaritási feltételezésének ellenőrzése érdekében. Ugyanakkor a tesztek csak a multiválságok felfutása előtti adatállományra (2015. január - 2020. december) vonatkozólag végeztem el, mivel feltételezhető, hogy a megfigyelt teljes időszak eredménye – amely csak mintegy két és fél évvel hosszabbítja meg a válság előtti időszakot – nem vezetne szignifikánsan eltérő következtetésekhez.

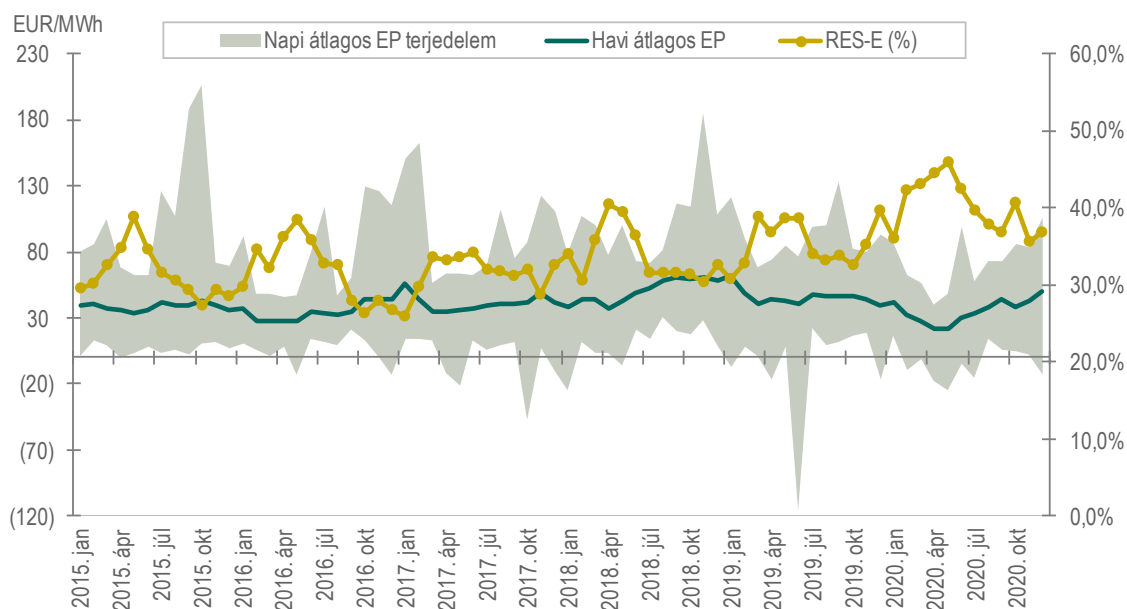
A Függelékben található *F9. táblázat* tartalmazza az ADF-, PP- és KPSS-tesztek eredményeit. Az energiahordozók és a CO₂-kvóta árak logaritmusai az I(0) szinten még nem voltak stacionáriusak, ezért ezekben az esetekben mindenképpen további transzformációra lett volna szükség. A NEG és RES változók azonban már stacionárius eredményeket mutattak differenciális nélkül is. Tehát a változók többségénél azok statisztikai tulajdonságainak stabilizálása érdekében differenciálásra volt szükség, ami azt jelentette, hogy egy adott idősorban az előző megfigyelés értékét kivontam az aktuális megfigyelés értékéből. Ezt a matematikai műveletet a konzisztens értelmezés céljából valamennyi esetben elvégeztem, amely két kivétellel azonos eredményt adott. A NEWC és az EUA tekintetében az ADF-tesztek szerint az adatsorok továbbra sem stacionáriusak, ugyanakkor mind a PP, mind a KPSS tesztek stacionaritást mutatnak. Továbbá Afriyie et al. (2020) is kiemelik, hogy az ADF teszt teljesítménye 100-nál kisebb megfigyelési méret esetén gyengébb, szemben a PP teszttel. Ennek eredményeként arra a következtetésre jutottam, hogy az összes idősor az első differenciálás után stacionáriussá vált.

7.1.1.1. A multiválságok felfutása előtti időszak elemzése (2015. január - 2020. december)

Első körben tehát a multiválságok felfutása előtti, 2015. januárjától 2020. decemberéig tartó időszak kerül elemzésre. A *61. ábra* szemlélteti az EP historikus havi átlagát és azt a sávot,

amelyben a napi átlagértékek mozogtak, valamint a havi átlagos RES-E %-ot, míg a Függelékben található *F10. táblázat* további leíró statisztikákat tartalmaz a változókra vonatkozóan.

61. ábra Havi átlagos nagykereskedelmi villamosenergia-árak és a megújuló energiaforrások (%) alakulása az EU-25-ben (2015. január - 2020. december)



Forrás: EMBER Climate (é.n.-b) és IEA (é.n.-c) alapján saját készítésű ábra

A havi átlagos nagykereskedelmi villamosenergia-árak ebben az időszakban 21,55 EUR/MWh és 61,44 EUR/MWh között mozogtak, illetve 40,97 EUR/MWh középpértékkel és 8,73 EUR/MWh szórással rendelkeztek. A legnagyobb napi kiugró értékeket 2015. októberében (+206,34 EUR/MWh) és 2019. júniusában (-114,94 EUR/MWh) Belgiumban regisztrálták. Utóbbi több tényező együttes fennállásának következménye volt, az EPEX Spot tőzsde eseti műszaki hibája, a nyári hónapok miatti bőséges napenergia-termelés, valamint a nyaralási szezonban általánosságban alacsonyabb villamosenergia-fogyasztás miatt az óránkénti és napi áramárak Európában egységesen negatív szintre süllyedtek (Agency for the Cooperation of Energy Regulators [ACER], 2020). Az EU-25 országai közül Belgiumban volt a legjelentősebb a csökkenés. Továbbá az EP 0,39-es kurtózisa és 0,36-os ferdesége a normális eloszláshoz képest laposabb és megközelítőleg szimmetrikus (enyhén jobbra ferde) eloszlást mutat. Ez azt sugallja, az idősorban vannak enyhén jobbra elhúzódnó értékek, de ez a ferdeség nem jelentős, és nincsenek jelentős kiugró értékek sem.

A RES-E tekintetében a vizsgált időszakban a havi átlagok az EU-25 országaiban 25,9% és 46,0% között mozogtak, 34,0%-os átlaggal. Az adatsorok szórásának kontextusba helyezéséhez a variációs együttható (*Coefficient of Variation, CV*) kiszámítása nyújt segítséget, mely egy olyan normalizált mérőszám, amely az átlaghoz viszonyított volatilitást fejezi ki. Az eredmények alapján az EUA esetében volt a legmagasabb ez az arány (62,7%), de ennek az is az oka, hogy a CO₂ kvótaárak jelentősen megemelkedtek a korábban ismertetett EU ETS III. fázisának második felétől, illetve még inkább a IV. fázis során, ahogy a rendelkezésre álló kvóták folyamatosan csökkennek (az EUA havi átlagos ára 2015-2017 között 6,42 EUR/t, míg 2018-2020 között 22,99 EUR/t volt).

A változók közötti kapcsolat statisztikai értékeléséhez először a Pearson-féle korrelációs együttható tesztet végeztem el (15. táblázat). Ebben, valamint ezen alfejezetben található összes többi statisztikai elemzésében már a potenciális regresszorok log-differenciált (DIFF_LN) változatait alkalmaztam.

**15. táblázat Pearson-féle korrelációs együtthatók értékei
(2015. február – 2020. december)**

	DIFF_LN_EP	DIFF_LN_NEG	DIFF_LN_RES-E	DIFF_LN_TTF	DIFF_LN_BRENT	DIFF_LN_NEWC	DIFF_LN_EUA
DIFF_LN_EP	1						
DIFF_LN_NEG	,351***	1					
DIFF_LN_RES-E	-,724***	-,261**	1				
DIFF_LN_TTF	,493***	,189	-,254**	1			
DIFF_LN_BRENT	,316***	,003	-,038	,250**	1		
DIFF_LN_NEWC	,247**	,209*	-,121	,342***	,151	1	
DIFF_LN_EUA	,410***	-,030	-,069	,182	,359***	,181	1

Megjegyzés: A korreláció szignifikáns 1%-os (***), 5%-os (**) és 10%-os (*) szignifikancia szint mellett.

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

A kapott teszteredmények szerint a regressziós modell minden lehetséges magyarázóváltozója statisztikailag szignifikáns legalább 5%-os szignifikancia szinten az EP-vel. Továbbá csak a RES-E mutat negatív korrelációt a függő változóval, ami összhangban van azzal a várakozásunkkal, hogy a RES-E növekedésével az EP várhatóan csökken. A kapcsolat erősségét tekintve csak a RES-E van a felső harmadban (0,724), míg a BRENT és a NEWC a leggyengébb kapcsolatokat mutatja (0,316 és 0,247). Összességében tehát egyetlen más független változó sem korrelál olyan erősen az EP-el, illetve egymással, mint a RES-E az EP-el. A független változók egymás között bizonyos esetekben különböző erősségű és irányú korrelációt mutatnak egymással, ami betekintést nyújthat a multikollinearitás jelenségébe, de

ez majd a regressziós modell varianciainflációs tényezőinek (*Variance Inflation Factor, VIF*) kiszámítása által jobban megvizsgálásra fog kerülni.

A kétváltozós korreláció nem veszi figyelembe a többi változó hatását a vizsgált változópárra, ami félrevezető következtetésekhez vezethet (fals korrelációk). A parciális korrelációk azonban egy vagy több további változó hatását képesek kontrollálni. A 16. táblázat tartalmazza a parciális korrelációs tesztek eredményét, ahol az EP minden esetben a változópárok egyike volt.

**16. táblázat Parciális korrelációs együtthatók értékei
(2015. február – 2020. december)**

		DIFF_LN_ EP			DIFF_LN_ EP
DIFF_LN_NEG	Szorosság mértéke	,297	DIFF_LN_BRENT	Szorosság mértéke	,243
	P-érték	,015		P-érték	,049
DIFF_LN_RES-E	Szorosság mértéke	-,756	DIFF_LN_NEWC	Szorosság mértéke	-,016
	P-érték	,000		P-érték	,897
DIFF_LN_TTF	Szorosság mértéke	,382	DIFF_LN_EUA	Szorosság mértéke	,471
	P-érték	0,002		P-érték	,000

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

A parciális korrelációs együtthatók a Pearson-féle korrelációtól némileg eltérő eredményeket mutatnak. A RES-E továbbra is a legerősebben korreláló változó (0,756), míg az EP és a NEWC közötti korreláció ebben az aspektusban nem bizonyult szignifikánsnak (mivel $p > \alpha$), ami azt jelenti, hogy a NEWC az összes többi kontrollált változó figyelembevétel után szinte nulla lineáris kapcsolatot mutat az EP-vel. Továbbá a BRENT is a nullhipotézis 5%-os szignifikancia szinten történő elutasításának határán volt, gyenge erősségű korrelációt mutatva az EP-vel (0,243).

A parciális korrelációs együtthatók meghatározása kulcsfontosságú a többszörös regressziós modell felépítésében, mivel ez segít izolálni minden lehetséges változó egyedi hozzájárulását az eredményváltozó alakulásához, miközben kontrollálja a többi változó hatását. Ezáltal egy megbízhatóbb és hatékonyabb regressziós modell hozható létre. Ezért van az, hogy a többszörös lineáris regressziós együtthatók és a parciális korrelációs együtthatók közvetlenül kapcsolódnak egymáshoz, és azonos szignifikanciával (p-értékkel) rendelkeznek, ha az eredeti regressziós modellben szereplő összes potenciális változót bevonták. Ha azonban a modell bemeneteként csak a szignifikáns változókat választjuk ki, akkor a kihagyott változók miatt a parciális korrelációs együtthatókat a megváltozott körülmények között újra ki kell számítani.

Mindent egybevéve, a korrelációs vizsgálatok alapján a következő független változókat választottam ki a regresszioelemzéshez: NEG, RES-E, TTF, BRENT és EUA.

Miután létrehoztam a kezdeti regressziós modellt ezekkel a regresszorokkal, tesztelésre kerültek az általános idősoros regressziós modell feltételezései. Ezek közül a változók stacionaritása adott, mivel a modellhez log-differenciált változókat használtam, amit a stacionaritási tesztek igazoltak. Ezután azt a függetlenségi feltételt ellenőriztem, hogy a reziduumok nem mutatnak-e autokorrelációt. Ebből a célból alkalmaztam a Durbin-Watson (DW) statisztikát, amelynek teszteredménye 0 és 4 között mozog; a 2 körüli érték arra utal, hogy nincs autokorreláció, míg a 2-nél lényegesen nagyobb vagy kisebb értékek rendre pozitív vagy negatív autokorrelációt jeleznek. A kezdeti regressziós modell alapján a DW-statisztika értéke 2,38 volt, ami azt jelentette, hogy a reziduumokban van valamilyen szintű autokorreláció. Ezt elfogadhatnám, ugyanakkor lehetőség van korrigálni az autokorrelációt olyan statisztikai technikával, mint a CO-eljárás, amely a reziduumok elsőrendű autokorrelációs együtthatóját (Rho) képes megbecsülni. Mivel ez egy iteratív módszer, így a folyamat többször finomítja az Rho becslését, amíg végül egy stabil megoldáshoz nem konvergál. Ez hasonló az AR(1) modellben szereplő Rho-hoz, amely az egymást követő megfigyelések közötti kapcsolatot méri. Miután a CO-eljárás lefutott, a kapott Rho együtthatót a regressziós modell kiigazítására használhatom. A korrigált regressziós modell paramétereit és eredményét a 17. táblázat foglalja össze.

**17. táblázat A CO-eljárás által korrigált regressziós modell összesítő táblája
(2015. február - 2020. december)**

					Rho (AR1)		Átlagos		
					Rho (AR1) érték	standard hiba	DW-stat	négyzetes hiba	
	Iterációk								
					0	-0,194	0,123	2,135	0,004
					3	-0,221	0,122	2,101	0,004
					90,0% konfidencia intervallum		95,0% konfidencia intervallum		
					Alsó határ	Felső határ	Alsó határ	Felső határ	
Tengelymetszet	Koefficiensek	Standard hiba	t-stat	P-érték					
DIFF_LN_NEG	-0,001	0,006	-0,088	0,930					
DIFF_LN_RES	0,267	0,125	2,138	0,036	0,059	0,476	0,018	0,517	
DIFF_LN_TTF	-0,956	0,101	-9,478	0,000	-1,124	-0,787	-1,157	-0,754	
DIFF_LN_BRENT	0,195	0,058	3,355	0,001	0,098	0,292	0,079	0,312	
DIFF_LN_EUA	0,180	0,071	2,543	0,013	0,062	0,298	0,039	0,321	
R	0,343	0,079	4,328	0,000	0,211	0,475	0,185	0,501	
R	0,889	F-stat	48,000						
R-négyzet	0,790	P-érték (F-stat)	0,000						
Korrigált R-négyzet	0,770	DW-stat	2,101						
A becslés standard hibája	0,064	Megfigyelések (N)	71						

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

A kezdeti regressziós modellhez képest a kiigazított modell javulást mutat a globális F-teszt és az általános illeszkedés jósága tekintetében, míg a DW-statisztika az eredeti 2,38-es értékről 2,10-re csökkent a módosított modellben.

A regressziós modellhez kapcsolódó következő feltételezések a linearitás és a változók közötti multikollinearitás hiánya volt. Az előbbi az illeszkedés jóságára vonatkozó statisztikák (R , R^2) és vizuálisan, például parciális regressziós ábrák segítségével értékelhető. A többszörös determinációs együttható magas értéke, valamint a szórásdiagrammok sem mutatnak nem-linearitást. Ami a multikollinearitást illeti, a VIF információt nyújt ennek jelenlétéről és súlyosságáról, amely tehát akkor fordul elő, ha a regressziós modellben a független változók erősen korrelálnak egymással. Az 1-es VIF-érték azt jelzi, hogy az adott független változó és a modellben szereplő többi független változó között nincs korreláció, míg az 1-5 közötti értékek általában mérsékelt korrelációra utalnak, így gyakran nem vezetnek félre a modell megítélését. Mivel a modellünk VIF-értékei 1 körül vannak, arra következtethetünk, hogy a modellben szereplő változók között nem fordul elő (jelentős) multikollinearitás.

Végezetül, a fennmaradt modellfeltételezések alapvetően a reziduumok viselkedésére vonatkoznak, nevezetesen a normalitás és a homoszkedaszticitás teljesülésére. Ezek a tulajdonságok elsősorban grafikusán vizsgálhatók. A regresszió standardizált reziduumának standard P-P (*Probability-Probability*) diagramja a regressziós modell reziduumainak normalitásának értékelésére szolgálhat, mivel összehasonlítja az adathalmaz kumulatív eloszlását az elméleti normális eloszlás kumulatív eloszlásával. Jelen esetben a P-P-diagram szorosan követett egy egyenes átlós vonalat, ami azt jelzi, hogy a reziduumok normális eloszlást követnek. A homoszkedaszticitás azt jelenti, hogy a maradékok varianciája állandó a független változók különböző értékei mentén. Ennek megállapítása céljából a modell diagnosztikai eszközeként szolgált szórásdiagram szerint a reziduumok nem tágnak szét vagy formálnak tölcser alakot, ahogy a várható értékek tengelye mentén mozognak. Következésképpen, nincs jele heteroszkedaszticitásnak.

Az összesítő eredmények szempontjából, a többszörös korrelációs együttható (R), mely a függő és a független változók halmaza közötti kapcsolat erősségét – a lineáris kapcsolat maximális mértékét – méri, úgy is tekinthető, mint a függő változó megfigyelt és előre jelzett értékei közötti korreláció nagyságának értéke. A 0,89 erős lineáris kapcsolatot jelent. Továbbá a 79,0%-os többszörös determinációs együttható (R^2), amely kifejezi, hogy a regresszorok együttesen milyen arányban magyarázzák az eredményváltozó varianciáját, szintén viszonylag magas értéknek számít (minél nagyobb a százalékos arány, annál jobban illeszkedik a modell). Azonban különböző paraméterekkel rendelkező modellek összehasonlításakor – ami a célunk –, a korrigált R^2 mutató a relevánsabb, mivel ez figyelembe veszi a modellekben szereplő regresszorok különböző számosságát is. Továbbá a modell standard hibája (0,064) azt az

átlagos hibát mutatja, amelyet a modell által becsült értékek használata okoz ahelyett, hogy az eredeti értékek kerülnének felhasználásra.

A regressziós modell varianciaanalízise (ANOVA) lehetővé teszi a modell általános szignifikanciájának vizsgálatát. Az F-próba egy F-statisztikát és egy p-értéket eredményez, ahol a nullhipotézis az, hogy az összes regressziós együttható egyenlő nullával (ami tehát azt jelenti, hogy a prediktorok nem magyarázzák a függő változó változékonyságát), ezzel szemben az alternatív hipotézis szerint legalább egy együttható különbözik nullától. Esetemben a $p = 0,000$ érték azt jelzi, hogy a korrigált regressziós modell jobban illeszkedik a tényadatokhoz, mint a regresszorokat nem tartalmazó modell, tehát a modell egésze statisztikailag szignifikánsnak minősül. Ebből azonban még derül ki, hogy mely modellbe bevont konkrét regresszorok szignifikánsak. Erre a parciális regressziók együtthatói szolgálnak magyarázatként. A független változók kiválasztásával összhangban az összes bevont regresszor statisztikailag szignifikáns 5%-os szignifikancia szinten.

A korábbiakban bemutatott együtthatók szintén behelyettesíthetők a regressziós egyenletbe. A $-0,001 \hat{\beta}_0$ és a $-0,221 \hat{\rho}$ mellett a β_0 korrigált becslése $-0,0005$ lesz. A többi paraméter (meredekség) egyikét sem kell újra számítani, azaz azokat közvetlenül a korrigált változóval végzett regresszióból vesszük. A behelyettesített regressziós egyenlet a következő:

$$\Delta \ln WHEP_t = -0.0005 + 0.267 \Delta \ln NEG_t - 0.956 \Delta \ln RES_t + 0.195 \Delta \ln TTF_t + 0.180 \Delta \ln BRENT_t + 0.343 \Delta \ln EUA_t - 0.221 \varepsilon_{t-1} + \omega_t \quad (11)$$

A *II. egyenlet* interpretálása során körültekintően kell eljárni a változók log-differenciált jellegük miatt. Ebben az esetben a logaritmizálás megfordítására van szükség, ami az exponenciális függvény alkalmazását jelenti.

A RES-E 1%-os növekedése következtében egyik időszokról a másikra ceteris paribus az EP átlagosan 0,95%-kal csökkent ugyanabban az időszakban. Másképp megfogalmazva ez az összefüggés azt sugallja, hogy a megújuló forrásokból származó bruttó villamosenergia-termelés százalékos növekedése két egymást követő időszak között általában ugyanekkora mértékben csökkenti a nagykereskedelmi villamosenergia-árakat azonos időszakban. A konfidencia intervallumok azt mutatják meg, hogy milyen tartományban várhatók a regressziós együtthatók értékei 90 és 95%-os megbízhatóság mellett. Utóbbi esetében a RES-E 1%-os növekedése egyik időszokról a másikra 95%-os megbízhatóság mellett az EP legalább 1,11%-os és legfeljebb 0,78%-os átlagos csökkenésével fog járni ugyanabban az időszakban, ceteris paribus. Ez az intervallum szélesedik, ha a megbízhatósági szint 90%-ra csökken ($-1,157$ és $-0,754$).

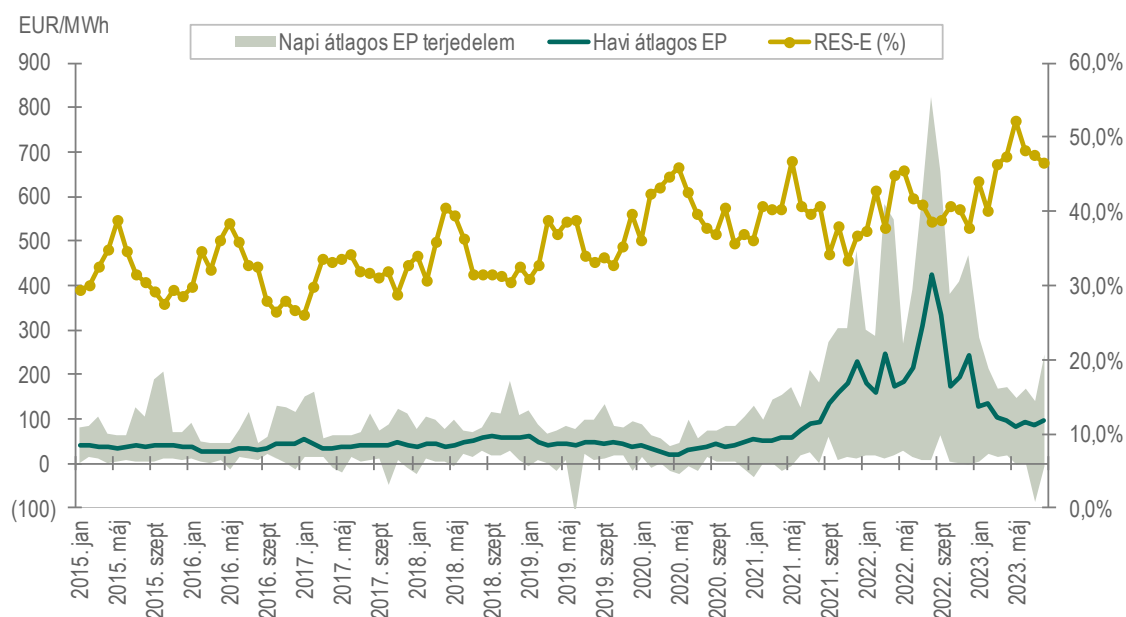
A RES-E-n kívül az összes többi magyarázóváltozó pozitívan járul hozzá az EP változásához, pl. a TTF 0,195-ös együtthatója azt jelenti, hogy a TTF 1%-os növekedése egyik időszakra a másikkal az EP körülbelül 0,19%-os átlagos növekedésével jár, más tényezők változatlansága mellett azonos időszakban vizsgálva.

Összességében tehát az együtthatók nagyságai jelzik az egyes magyarázóváltozók relatív fontosságát az eredményváltozó változásában. A korrigált modell alapján a RES-E egyik időszakra a másikkal bekövetkező változásai járulnak hozzá leginkább az EP változásaihoz ugyanabban az időszakban, míg a többi regresszor kisebb mértékben járul hozzá az EP változékonyságának magyarázatához.

7.1.1.2. A multiváltságokkal terhelt (teljes) időszak értékelése (2015. január - 2023. augusztus)

Az előző időszak elemzéséhez képest ebben a verzióban kibővítettem a vizsgált periódus hosszát további közel két és fél évnél idősoros adattal. Így a 62. ábra kibővíti a korábbi időintervallumot további 32 hónapnyi megfigyeléssel, 2023. augusztusáig bezárólag, míg a Függelékben található F11. táblázat további statisztikákat tartalmaz erre a szakaszra vonatkozólag.

62. ábra Havi átlagos nagykereskedelmi villamosenergia-árak és a megújuló energiaforrások (%) alakulása az EU-25-ben (2015. január - 2023. augusztus)



Forrás: EMBER Climate (é.n.-b) és IEA (é.n.-c) alapján saját készítésű ábra

A fenti ábra alapján látható, hogy a napi átlagos ársávok dominánsan 2021-től kezdődően váltak szélesebbé a növekvő volatilitás miatt, valamint a négy kiugró túske az energiaválság következtében kialakult szélsőséges napi átlagos EP-értékeket jelentett. A legmagasabb havi átlagos EP 2022. augusztusában volt megfigyelhető (425,20 EUR/MWh) az EU-25-ben. 2022. augusztus 17-én Litvániában és Lettorszáiban 823,29 EUR/MWh napi átlagárcsúcstapasztaltak, míg Északiorszáiban 681,36 EUR/MWh-t. A Litván Köztársaság energiaügyi miniszterének nyilatkozata szerint ennek hátterében főleg az állt, hogy a villamosenergia-piac üzemeltetője megtagadta egy litván városban lévő nagy teljesítményű generátor által termelt villamos energia átvételét (Delfi Lithuania, 2022). Azonban még aznap a balti régióban (a Nord Pool áramtőzsde keretében) az áramár további tényezők együttes hatására egy órán keresztül elérte a 4000 EUR/MWh maximális elszámolóárát (Nord Pool AS, 2022). A másik szélsőséges kiugró napi EP-átlagot 2023. július 2-án Hollandiában regisztrálták (-85,27 EUR/MWh), de az említett nap közepén Hollandiában, Németországban és Ausztriában a negatív árak egészen -500 EUR/MWh-ra (a minimális EU-s elszámolóárra) csökkentek közép-európai idő szerint 11 és 13 óra között elsősorban az alacsony kereslet és a megújulóknak magas penetrációja miatt (Oliveira, 2023).

Összességében a teljes időszak EP átlaga majdnem megduplázódott a korábbihoz képest, valamint a havi átlagszámok mintegy tízszer nagyobb tartományban szóródtak, mint a multiválságok felfutása előtti időszakban. Továbbá a variációs együttható is jelentősen megnőtt a korábbi 0,21-es értékről 0,95-re, ami azt jelenti, hogy az EP az átlagérték körül jelentősebb ingadozást mutat a teljes időszakban. Ez a nagyobb relatív ingadozásra vonatkozó következtetés a többi energiahordozó, illetve a CO₂ kvóta ára is érvényes. A multiválság hatása az adatsorok kurtózisának vizsgálatával is megerősíthető; ezek azt jelzik, hogy az EP, TTF, BRENT és NEWC eloszlásai csúcsosabbak, az adatok nagyobb része koncentrálódik a középérték körül, és viszonylag több az extrém érték, mint a normál eloszlás esetében.

Tehát a 61. ábra egyértelműen mutatja a korábbi trendek törését az EP alakulását illetően, de ez igaz a korábban bemutatott egyéb energiahordozó-árakra is. Eközben a havi RES-E a multiválságok felfutása előtti időszakhoz képest magasabb százalékos maximumot ért el, 2023. májusában meghaladta az 50%-os havi átlagot. A statisztikák összehasonlítása alapján a RES-E a teljes vizsgált időszakban érte el a magasabb maximális átlagértékeket (36,29% a korábbi 34,0%-os részarányhoz képest).

A változók közötti kapcsolat statisztikai értékelésére áttérve, a 18. táblázat tartalmazza a Pearson-féle korrelációs együtthatókat valamennyi változópárra a teljes vizsgált időszakra vonatkozóan. Ez alapján látszik, hogy a BRENT kivételével valamennyi potenciális

magyarázóváltozó szignifikánsan korrelál a EP-el 5%-os szignifikancia szinten. Ezen felül a TTF mutatta a legerősebb pozitív korrelációt a EP-el (0,739), míg a második a sorban a RES-E volt a 0,650-es erősségű negatív korrelációjával.

**18. táblázat Pearson-féle korrelációs együtthatók értékei
(2015. február - 2023. augusztus)**

	DIFF_LN_ EP	DIFF_LN_ NEG	DIFF_LN_ RES-E	DIFF_LN_ TTF	DIFF_LN_ BRENT	DIFF_LN_ NEWC	DIFF_LN_ EUA
DIFF_LN_EP	1						
DIFF_LN_NEG	0,251**	1					
DIFF_LN_RES-E	-0,650***	-0,236**	1				
DIFF_LN_TTF	0,739***	0,165*	-0,322***	1			
DIFF_LN_BRENT	0,172*	-0,020	-0,044	0,167*	1		
DIFF_LN_NEWC	0,286***	0,160	-0,061	0,432***	0,242**	1	
DIFF_LN_EUA	0,272***	-0,064*	-0,024	0,117	0,258***	-0,016	1

Megjegyzés: A korreláció szignifikáns 1%-os (***) , 5%-os (**) és 10%-os (*) szignifikancia szint mellett.

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

A Pearson-féle korrelációs együtthatók arra engednek következtetni, hogy a BRENT nem fog bekerülni a teljes vizsgált időszak végső regressziós modelljébe. Ezt azonban megint a parciális korrelációs együtthatók alapján fogom eldönteni. A parciális korrelációs számítások szerint csak a RES-E, a TTF és az EUA változók szignifikánsak (19. táblázat). Közülük is a TTF rendelkezik a legmagasabb parciális korrelációs értékkel (0,704), majd azt követi a RES-E (-0,662), illetve az EUA a maga 0,374-es pozitív értékével, így mindhárom változó mérsékelt vagy erős szignifikáns korrelációt mutat a EP-el a teljes vizsgált időszakban.

**19. táblázat Parciális korrelációs együtthatók értékei
(2015. február - 2023. augusztus)**

		DIFF_LN_ EP		DIFF_LN_ EP	
DIFF_LN_NEG	Szorosság mértéke	0,129	DIFF_LN_BRENT	Szorosság mértéke	0,015
	p-érték	0,206		p-érték	0,883
DIFF_LN_RES-E	Szorosság mértéke	-0,662	DIFF_LN_NEWC	Szorosság mértéke	0,019
	p-érték	0,000		p-érték	0,851
DIFF_LN_TTF	Szorosság mértéke	0,704	DIFF_LN_EUA	Szorosság mértéke	0,374
	p-érték	0,000		p-érték	0,000

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

Tehát a multiváltságokkal terhelt teljes időszakra vonatkozó regresszióelemzéshez a parciális korrelációs együtthatók értékei alapján a következő változók kerültek kiválasztásra: RES-E, TTF és EUA. Ezek után következett az idősoros regressziós modell valamennyi

alapfeltevéseinek tesztelése, mely elvégzése után arra a következtetésre jutottam, hogy minden szükséges feltételezés ebben a modellben is igazolásra került. A függetlenségi kritériumot illetően a DW-statisztika értékére 2,158 adódott, ami azt jelenti, hogy némiképp negatív autokorreláció van a modellben a reziduumok között. Emiatt a CO-eljárás jelen esetben is alkalmazásra került, hogy tovább növeljem a regressziós modell megbízhatóságát, illetve így módszertanban is összehasonlíthatóvá válik a két modell. A korrigált regressziós modell eredményét a 20. táblázat foglalja össze.

**20. táblázat A CO-eljárás által korrigált regressziós modell összesítő táblája
(2015. február - 2023. augusztus)**

	Koefficiensek	Standard hiba	t-stat	P-érték	Rho (AR1)		DW-stat	Átlagos négyzetes hiba
					Rho (AR1) érték	standard hiba		
					90,0% konfidencia intervallum			
					Alsó határ	Felső határ	Alsó határ	Felső határ
Iterációk								
0					-0,080	0,101	2,044	0,007
2					-0,086	0,101	2,034	0,007
Tengelymetszet	0,001	0,008	0,172	0,864				
DIFF_LN_NEG	-0,973	0,109	-8,960	0,000	-1,153	-0,792	-1,188	-0,757
DIFF_LN_TTF	0,549	0,049	11,132	0,000	0,467	0,631	0,451	0,647
DIFF_LN_EUA	0,364	0,090	4,065	0,000	0,215	0,513	0,186	0,542
R	0,882	F-stat	113,236					
R-négyzet	0,778	P-érték (F-stat)	0,000					
Korrigált R-négyzet	0,769	DW-stat	2,034					
A becslés standard hibája	0,086	Megfigyelések (N)	103					

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

A modell illeszkedésének jóságát mérő mutatók (R, R², korrigált R²), az ANOVA-teszt (F-teszt) és a parciális korrelációs együtthatók p-értékei mind azt jelzik, hogy a modell létezik és kellően megbízható, valamint a függő változó varianciájának jelentős részét (77,8%) képes megmagyarázni.

A CO-eljárással korrigált regressziós modell paramétereinek behelyettesítésével – és az eredeti modell tengelymetszéspontjának újraszámításával – a következő egyenletet kaptam:

$$\Delta \ln WHEP_t = 0.001 - 0.973 \Delta \ln RES_t + 0.549 \Delta \ln TTF_t + 0.364 \Delta \ln EUA_t - 0.086 \varepsilon_{t-1} + \omega_t \quad (12)$$

Következésképpen, a multiválságokkal is terhelt teljes vizsgált időszakra vonatkozó regressziós modell szerint a RES-E változó a legdominánsabb, mivel a függő változó két egymást követő időszak közötti változásának magyarázatához ez járult hozzá a legnagyobb mértékben. Precízebben, a teljes vizsgált időszakra vonatkozó modell becslése szerint a RES-E 1%-os növekedése egyik időszakra a másikkal ceteris paribus az EP átlagosan 0,96%-os csökkenésével jár azonos időszakban. A konfidenciaintervallumok tekintetében a modell 95%-os megbízhatóság mellett úgy becsüli, hogy a csökkenés átlagosan 1,153 és 0,792 közé fog esni. Más szóval, a RES-E 1%-os növekedése egyik időszakra a másikkal 95%-os megbízhatósági

szint mellett az EP-ben legalább 1,14%-os és legfeljebb 0,79%-os átlagos csökkenésével jár együtt ugyanabban az időszakban, ceteris paribus. Ez az intervallum szélesedik, ha a megbízhatósági szint 90%-ra csökken (rendre -1,188 és -0,757). Tehát a multiválságok felfutása előtti időszak modelljéhez hasonlóan a RES-E együttthatójának értéke azt jelzi, hogy a RES-E egyik időszakra a másikkra bekövetkező változásai járulnak hozzá leginkább az EP változásaihoz azonos időszakban, ceteris paribus.

Továbbá, a TTF és az EUA együttthatóinak értékei azt mutatják, hogy ezek 1%-os növekedései az egyik időszakra a másikkra az EP kb. 0,55%-os (TTF) és 0,36%-os (EUA) átlagos növekedésével jár együtt, más tényezők változatlansága mellett ugyanabban az időszakban.

7.1.2. Következtetések és hipotézis-ellenőrzések

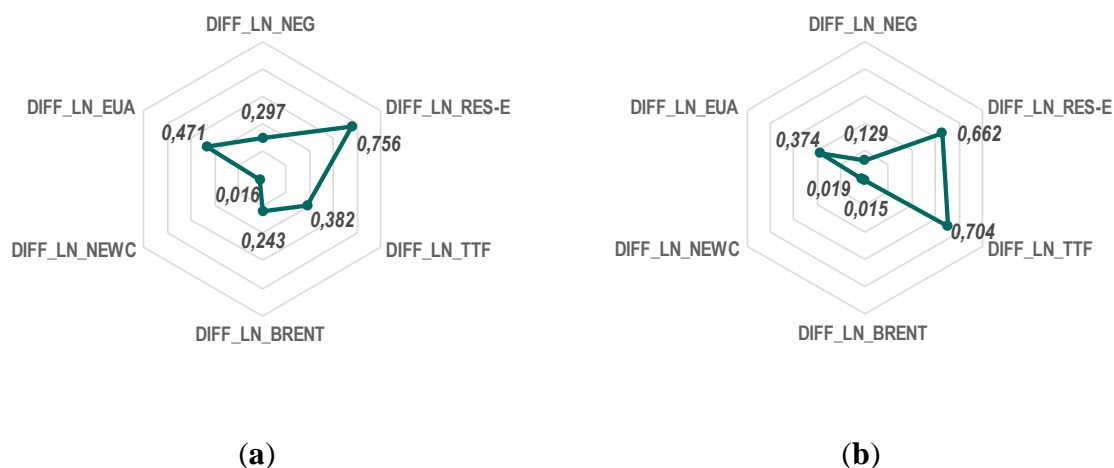
Ebben az alfejezetben bemutatott empirikus kutatásom kiinduló pontját a villamosenergia-piac feltérképezése és működésének megértése nyújtotta, mely során meghatároztam a villamosenergia-árak alakulását befolyásoló főbb tényezőket. E tényezők köre – a megújuló áramtermelés %-os aránya és a bruttó összárámtermelés mértéke az EU-25-ben, továbbá a fosszilis energiahordozók (szén, kőolaj, földgáz) tőzsdei árai, valamint a széndioxid kvóta ára – alapul szolgált arra vonatkozólag, hogy historikus energiaadatok felhasználásával statisztikai úton is bebizonyítsam ezen tényezők potenciálisan szignifikáns hatását a villamosenergia-árak alakulására. Mindezt két időszakban vizsgálva, a multiválságok felfutása előtti időszakon, valamint azok hatásait figyelembe vevő időhorizonton keresztül.

E kvantitatív elemzésekhez különböző korrelációs és regressziós számításokat végeztem a multiválságok felfutása előtti (2015. január - 2020. december), illetve a teljes vizsgált (2015. január - 2023. augusztus) időszakokra vonatkozóan. Mindkét időszakban a CO₂-eljárással korrigált többváltozós lineáris regressziós modellek bizonyultak megbízhatóbbnak, és az elemzések során az alapmodell minden alapfeltételezése ellenőrzésre került, akár grafikusán, akár analitikus módon. A korrigált R² lényegében azonos a modellek között, ami azt jelenti, hogy mindkét modell egyformán magyarázza az EP varianciáját.

A kétváltozós korrelációs együttthatók azt mutatták meg, hogy az összes potenciális regresszor 5%-os szignifikancia szinten szignifikánsan korrelál az EP-vel, függetlenül az alapul szolgáló időszaktól, kivéve a BRENT a teljes vizsgált időszakban. Ezen belül is a RES-E és a TTF mutatta a legerősebb korrelációs kapcsolatot mindkét esetben, bár a sorrendjük az időhorizont alapján megfordult. Továbbá a parciális korrelációs számítások feltárták az EP és

egy adott független változó közötti egyedi kapcsolatot, miközben kontrollálásra került a többi változó. A korábbi táblázatokban külön-külön látható parciális korrelációs együtthatók változását az egyes időszakok között a 63.a-b ábrák szemléltetik.

63. ábra A parciális korrelációs együtthatók erősségeinek összehasonlítása abszolút értékben a multiválság felfutása előtti (a) és a teljes vizsgált időszak (b) között



Forrás: Saját készítésű ábrák

A konkrét elemzések elvégzése előtt arra számítottam, hogy a RES-E és a TTF fogja a legerősebb korrelációt mutatni az EP-vel, de ellentétes irányban. Ez a RES-E esetében beigazolódott, míg a TTF azonban a multiválságok felfutása előtti időszak alatt csak közepes erősségű kapcsolatot jelzett. A NEG és a BRENT esetében azt feltételeztem, hogy a kapcsolat pozitív és gyenge lesz mindkét esetben, ami be is igazolódott. Végül a NEWC és az EUA tényezőknél pozitív és közepes erősségű kapcsolatokat vártam, ami az EUA esetében beigazolódott ugyan, de a NEWC gyenge és negatív korrelációt mutatott az EP-vel a multiválságok felfutása előtti időszakban, míg pozitív korrelációt a teljes vizsgált időszakban.

Ahogy a 63. ábra is szemlélteti, a két időszak összehasonlításakor a NEG, a RES-E, a BRENT és az EUA parciális korrelációs együtthatóinak erősségei csökkentek a multiválságokkal kiegészített teljes időszak idősora esetében, míg a TTF jelentősen nőtt, az NEWC pedig szinte megtartotta korábbi értékét ugyanezen időszak alatt. Továbbá megállapítható, hogy a RES-E korrelációs erőssége nem változott nagymértékben a vizsgált idősor kibővítése során (-0,756-ról -0,662), ugyanakkor a TTF a teljes vizsgált időszak során jelentősen erősebb korrelációs kapcsolatot mutatott az EP-vel (0,382-ről 0,704-re). A 63. ábra kibővített változatát a Függelékben található F12. táblázat tartalmazza.

A parciális korrelációs együtthatók összehasonlításainak értékelése után az első kapcsolódó hipotézisem beigazolódott. Ugyanis, a H5-ben azt állítottam, hogy a RES-E és az EP között vizsgált időszaktól függetlenül erős és negatív szignifikáns kapcsolat áll fenn. Elemzéseim alapján a RES-E parciális regressziós együtthatója $-0,756$ volt a multiváltságok felfutása előtti időszak alapján, míg a teljes vizsgált időszak szerint ugyan valamivel alacsonyabb, de szintén erős ($-0,662$) és szignifikáns kapcsolatot véltem felfedezni. Továbbá, mindkét esetben a 90 és 95%-os konfidenciaintervallumok is negatív értékeket eredményeztek, ami tovább erősíti azt a következtetést, hogy a RES-E és az EP között a kapcsolat negatív lesz. Következésképpen a H5 hipotézis pozitívan igazolható.

A másik kapcsolódó hipotézisem (H6) bizonyítása egy összetettebb értékelést kíván meg, mivel ez az EP-változások mértékére vonatkozott abban a kontextusban, ha a RES-E és a TTF tényezők egy egységgel nőnek ceteris paribus minden egyes modellezett időszakban. Pontosabban, azt állítottam, hogy a multiváltságok felfutása következtében a RES-E egy egységnyi növekedése kisebb mértékben fog hatni az EP alakulására, mint a multiváltságok felfutása előtti időszak esetében, míg ez az állítás a TTF-nél pont fordítva lesz igaz. Ezt végső soron a regressziós modellek paramétereiből tudom megállapítani, azonban érdemes a parciális korrelációs együtthatókkal együtt összehasonlítani az eredményeket.

A RES-E-nél az előző hipotézisvizsgálatnál láthattuk, hogy valamelyest csökkent a korreláció erőssége a multiváltságokkal terhelt időszak esetében. Ugyanakkor a regresszióelemzés során azt láthattuk, hogy a RES-E változása az EP változására minimálisan nagyobb hatással van a második időszak során, $0,95\%$ -ról $0,96\%$ -ra nőtt a β paraméter értéke. Tehát gyakorlatilag nem változott jelentősen a regressziós paraméter értéke. Ezzel szemben a TTF és az EP közötti parciális korreláció erőssége majdnem megduplázódott a két időszak között, $0,382$ -ről $0,704$ -re. Ezzel párhuzamosan, míg a TTF alakulásával kapcsolatban a multiváltságok felfutása előtti modell becslése szerint a TTF 1% -os növekedése egyik időszakra a másikra az EP kb. $0,19\%$ -os átlagos növekedésével jár, más tényezők változatlansága mellett ugyanabban az időszakban, addigra ez az érték $0,55\%$ -ra nőtt a teljes vizsgált időszakra vonatkozó modellben. Ez tehát azt jelenti, hogy a TTF egységnyi növekedése ceteris paribus, két egymást követő időszak között nagyobb mértékben járult hozzá az EP változásaihoz a multiváltságokkal terhelt teljes időszakban, mint azok felfutása előtti időkben. Ezt a trendet részben az a piaci mechanizmus magyarázza, hogy mivel a megújuló energiaforrások nem képesek jelenleg még teljeskörűen fedezni a teljes villamosenergia-igényt, a merit-order működési mechanizmusa szerint a kereslet és kínálat egyensúlyának érdekében a szükséges utolsó erőmű a sorban általában egy gáztüzelésű erőmű, amelynek magasabbak az

üzemeltetési költségei. Ennek következtében a villamos energia elszámoló ára is felfelé mozdul. Mivel az ilyen erőművek tüzelőanyaga a földgáz, multiváltságok idején a szélsőséges gázárak jelentősen megnövelték az EP-t is. Tehát a statisztikai eredmények arra engednek következtetni, hogy a H6 hipotézis csak részben igazolódott.

7.2. A nagykereskedelmi villamosenergia-árak előrejelzési modelljeinek összehasonlítása

A villamosenergia-piaccaal összefüggésben számos különböző kutató elemezte a villamosenergia-árak trendjeit és volatilitásait különböző körülmények és feltételek mentén. Ezért a villamosenergia-árak modellezésének és előrejelzésének az elmúlt évtizedekben egyre nagyobb szakirodalma lett (Weron, 2014, 2006; Ziel & Weron, 2018). A modelltípusok közül a népszerű statisztikai modellek közé tartoznak a többszörös lineáris regresszió (MLR), az autoregresszív modellek (AR, ARMA, ARIMA, SARIMA), autoregresszív feltételes heteroszkedaszticitású modellek (ARCH, GARCH), valamint az exogén változókkal kiegészített modellek (pl. ARX, ARMAX, ARIMAX, ARCHX és GARCHX) és más hibrid megoldások. A választott árelőrejelzési technikák a rendelkezésre álló idősor tulajdonságai és a kutatási célok alapján változnak (Weron, 2006; Zareipour, 2012).

Weron és Misiorek (2008) egy sor parametrikus és féLPARAMETRIKUS idősor-modellt elemzett ki, amelyeket különböző másnapi villamosenergia-árak előrejelzések céljából használtak. Arra a következtetésre jutottak, hogy a féLPARAMETRIKUS modellek általában jobb előrejelzési pontosságot eredményezhetnek. Egy másik vizsgálat során különböző idősoros regressziós modellezési megközelítéseket tekintettek át, és a szerzők azt találták, hogy a 26 megvizsgált kézirat mindössze 12%-a használt többváltozós elemzéseket, míg a többi egyváltozós elemzést, főleg egyváltozós ARCH- és GARCH-modellezést mutatott be (Higgs & Worthington, 2008). Ziel és Weron (2018) azt vizsgálta, hogy az egy- vagy a többváltozós villamosenergia-ár előrejelző modellek pontosabbak-e. Azt találták, hogy a többváltozós modellek nem teljesítenek következetesen jobban az egyváltozós modelleknél, míg a hibrid modellekkel pontosabb előrejelzéseket lehet elérni mindkettőnél. Raviv et al. (2015) a Nord Pool villamosenergia-piac óránkénti árait vizsgálta, és arra az eredményre jutott, hogy a paneladatokon alapuló többváltozós modellek (VAR, VAR-PCA és csökkentett rangú regressziós (RRR) modellek) pontosságban felülmúlták a napi átlagárakra vonatkozó egyváltozós modelleket (dinamikus és heterogén AR modellek). Emellett azt is állították, hogy az előrejelzési módszerek kombinálásával további javulás érhető el. Crespo Cuaresma et al.

(2004) összehasonlították a különböző AR egyváltozós modellek teljesítményét a villamos energia árának előrejelzésében az Európai Energia Tőzsde (EEX) óránkénti idősoros adatállománya alapján, és elsősorban azt találták, hogy a nap egyes óráinak modellezése pontosabb, mint a teljes idősoros időszak előrejelzése.

Az AR- és ARCH-modelleken kívül a kutatók más modelleket is használtak a villamosenergia-árak előrejelzésére és modellezésére. Ferreira et al. (2019) többszörös lineáris regressziós elemzést használt különböző magyarázóváltozók bevonásával a villamosenergia-árak előrejelzésére az ibériai villamosenergia-piacon. Ulgen és Poyrazoglu (2020) szintén MLR-modellt alkalmazott a törökországi másnapi piacon és arra jutottak, hogy a késleltetett villamosenergia-árak és a késleltetett mozgó átlagárak fontosak lehetnek az előrejelzésekben, miközben más regresszorokat is használtak a becslésben, például a földgáz-, kőolaj- és szénárakat. Saini et al. (2016) hibrid megközelítést használt a villamosenergia-árak előrejelzésére, kombinálva az MLR és az SVM modelleket a PSO technika végső beállításával, és azt találták, hogy ez a hibrid megközelítés jobb pontosságot mutathat más módszerekhez képest. McMenemy és Monforte (2000) számos modellezési technikát (MLR, exponenciális simítás, ARIMA és ANN modellek) alkalmazott a villamosenergia-árak előrejelzésére, és az empirikus eredmények azt mutatták, hogy a hagyományos módszerekről a komplexebb módszerekre való áttérés csökkentheti az előrejelzési hiba nagyságát.

A fent említett tanulmányok közül sokan használták az energiahordozók árát exogén változóként a többváltozós modellezéshez. A villamosenergia-termelés modellezésében azonban a megújuló energiaforrások részarányának szintje is fontos szerepet játszik. Hagfors et al. (2016) munkásságában a német villamosenergia-piacon alapuló kvantilis regressziós modell a szél- és napenergia EEX spot árakra gyakorolt hatására összpontosított. Ez a tanulmány is empirikus bizonyítékot talált arra, hogy a megújuló energiaforrások árcsökkentő hatással vannak a villamosenergia-árakra, így hasznosak lehetnek az előrejelző modellek felépítésében. Cevik és Ninomiya (2022) a 2014-2021 közötti időszakra vonatkozó havi megfigyeléseket használták fel az EU-tagállamokból álló paneladatokra vonatkozóan, és kvantilis regresszió segítségével megvizsgálták, hogy a kiválasztott változók, mint például a megújuló energiaforrásokból származó energiatermelés, a villamosenergia-kapacitás, a hőmérséklet és a nyersolaj ára hogyan befolyásolják a nagykereskedelmi villamosenergia-árak szintjét és volatilitását. Eredményeik szerint a megújuló energia részarányának minden 1%-pontos növekedése átlagosan 0,6%-os csökkenéssel jár együtt a nagykereskedelmi villamosenergia-árak tekintetében. Ugyanakkor arra is bizonyítékot találtak, hogy ez a

kapcsolat nem lineáris hatású, mivel minél nagyobb a megújuló energiaforrások aránya az energiamixen belül, annál nagyobb a villamosenergia-árakra gyakorolt hatás.

Rathmann (2007) a megújuló energiaforrások részarányának további alkalmazását elemezte az EU ETS összefüggésben, mivel a megújuló energiaforrások részarányának növelése nemcsak a villamosenergia-árakat, hanem a CO₂-kibocsátást is csökkentheti. Ennélfogva az EUA kvóták ára is csökken. A tanulmány becslése szerint az EU ETS első szakaszában (2005-2007) Németországban a megújuló áramtermelés egységnyi növekedésével mintegy 2,6 EUR/MWh-val csökkentek a kiskereskedelmi villamosenergia-árak. Gianfreda et al. (2019) a magas megújulóenergia-penetrációval rendelkező észak-olaszországi övezetre fókuszálva empirikus bizonyítékot talált arra, hogy az energiamixben bekövetkező változások befolyásolják a spot piacon a villamosenergia- és fosszilis energiák árait, kiszorítva a gázerőműveket merit-orderen keresztül az ellátási láncból. Paraschiv et al. (2014) szintén statisztikai bizonyítékot talált arra vonatkozólag, hogy a megújuló energiák növekvő részaránya az áramtermelésben csökkenti az EEX azonnali villamosenergia-piaci árakat és kitolja a merit-order görbét. Továbbá Lago et al. (2021) statisztikai és gépi tanulási módszereket hasonlítottak össze hat évre és öt piacra vonatkozóan a RES-E EP-re gyakorolt hatásának szempontjából. Az eredmények kiértékeléséhez MAE, MAPE és RMSE metrikák segítségével próba és teszt időszakokra osztották fel a megfigyelt idősort. Bár Woo et al. (2011) lineáris regressziós modellével megerősítette, hogy a szélenergia-termelés növekedése csökkenti a másnapi villamosenergia-árakat a texasi piacon, de a tanulmány azt is kiemelte, hogy ezzel párhuzamosan az árak szórása is növekedhet. Ezt Németország esetében is megerősítették, mivel egy GARCH-modellen és a 2006. január - 2012. január EEX spot árakon alapuló empirikus vizsgálat szerint a szélenergia-termelés csökkenti a villamosenergia-árszintet, ugyanakkor növeli annak volatilitását is (Ketterer, 2014). A megújuló energia és villamosenergia-árak kontextusában más releváns tanulmányok is léteznek (többek között Nicolosi és Fürsch (2009), Sáenz de Miera et al. (2008) és Sensfuß et al. (2008)), amelyek hozzájárulnak ahhoz a megállapításhoz, hogy az előrejelzési modellek készítésekor érdemes figyelembe venni a megújuló áramtermelést, mint exogén változót.

Az elmúlt évek multiváltságainak hatásai, amelyek jelentős hatással voltak az energiapiaci dinamikára és az előrejelzésekre, szintén befolyásolták az empirikus vizsgálataimmal kapcsolatos általános kutatási fókuszot (ahogy az az előző alfejezetben is látható volt). Több szerző foglalkozott az energiaárak tekintetében a COVID-19 pandémia előtti és utáni időszakok összehasonlításával (Alam et al. (2023), Amri Amamou és Aguir Bargaoui (2022), Khan et al. (2022) és Nyga-Łukaszewska és Aruga (2020)), de az energiaválság és a geopolitikai

feszültségek hatásaival is egyre több kutató foglalkozik energiapiaci vetületben (Bâra et al. (2023), Poggi et al. (2023) és Zakeri et al. (2023)).

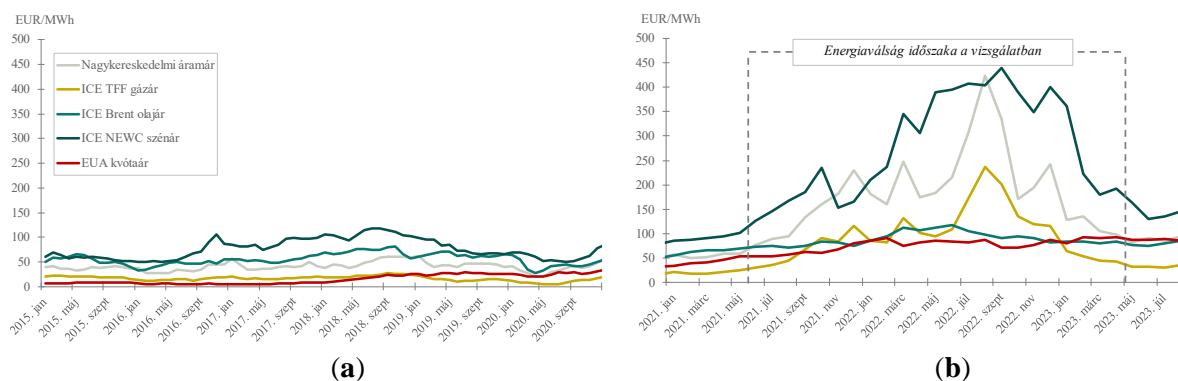
A továbbiakban részletezett empirikus kutatás vizsgálati szempontjait és eredményeit a megjelenés alatt álló Herczeg és Pintér (2024) cikkünkben foglaltuk össze.

7.2.1. Vizsgálati szempontok és eredmények

Ahogy a kutatási módszertan során már ismertetésre került, ebben az empirikus kutatásban kétféle előrejelzési módszertant fogok alkalmazni: egy- és többváltozós idősor-modellezést. Az előbbi szerint exponenciális simítás (ES) és autoregresszív integrált mozgóátlag (ARIMA) modelleket, míg utóbbi keretén belül exogén változókkal kiegészített ARIMA-t (ARIMAX), valamint többszörös lineáris regressziós (MLR) modelleket fogok megbecsülni. A modellek kiértékeléséhez az átlagos abszolút hiba (MAE), az átlagos abszolút százalékos hiba (MAPE) és az átlagos négyzetes hiba gyöke (RMSE) kerül felhasználásra.

Ami az időhorizontokat illeti, az általános közfelfogás szerint az energiaválság a teljes 2021-2023-as évekre volt hatással. E tekintetben a 64.a-b ábrák szemléltetik az energiahordozók és a CO₂-kvóta árainak alakulását 2015. január és 2023. augusztus között. Ez alapján az látszik, hogy az EU-ban a havi átlagos villamosenergia-árak 2021. júniusában léptek ki először jelentősen a korábbi átlagos tartományból (30-50 EUR/MWh sáv), és nagyjából 2023. júniusában tértek oda vissza. Ezért az energiaválság áramárakra gyakorolt hatását a 2021. június és 2023. május közötti időszakra leszűkítve határoztam meg ebben a kutatásban, amelyet a továbbiakban "Energiaválság alatti időszaknak" fogok nevezni.

64. ábra Havi átlagos energiahordozó és EUA kvótaárak a) 2015. január - 2020. december és b) 2021. január - 2023. augusztus között

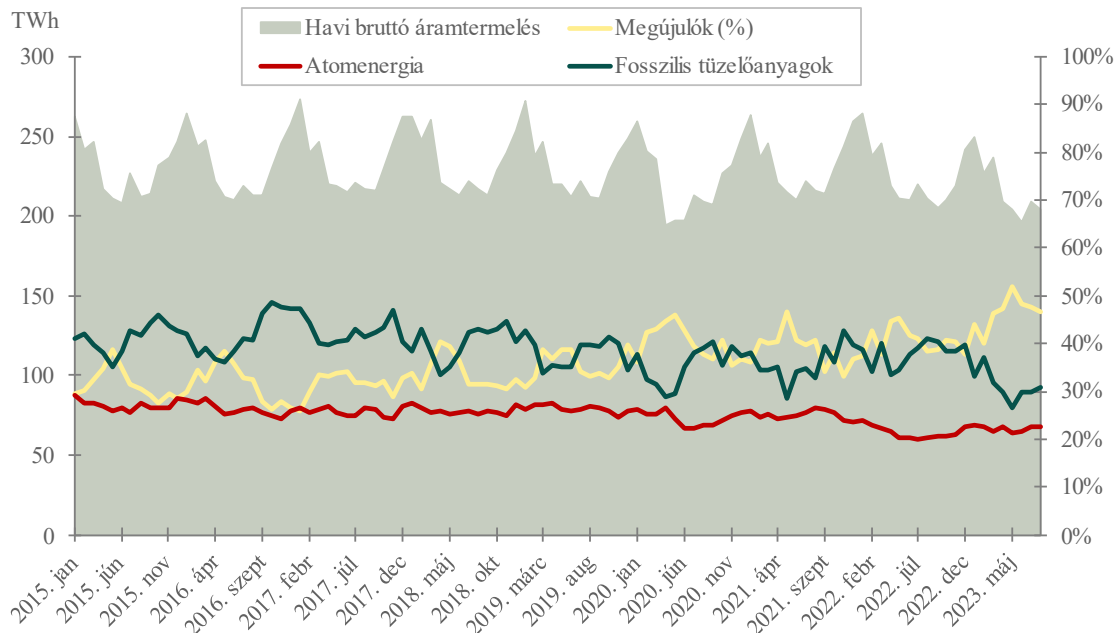


Forrás: EMBER Climate (é.n.-b), IEA (é.n.-c), Investing.com (é.n.) és Refinitiv Eikon (é.n.) alapján saját készítésű ábrák

Az összehasonlító elemzés céljából egy "Energiaválság előtti időszakot" is meghatároztam, amely hónapokban mérve ugyanolyan hosszúságú, mint az energiaválság alatti időszak. Az energiaválság előtti időszak tehát a 2019. júniusa és 2021. májusa közötti időszakot öleli fel, mely egy viszonylag stabil időszakot jelöl az energiaárak alakulásáról. Továbbá mindkét időszakhoz kapcsolódik próba és tesztidőszak. A próbaidőszak az energiaválság előtti időszak esetében a 2015. januárjától 2019. májusáig tart, míg a második modell esetében ezt a próba időszakot 2021. májusáig meghosszabbítottam. A 24 hónapos tesztidőszakok mindegyik próbaidőszakot követően kezdődnek.

Emellett a 65. ábra bemutatja ugyanezenre a teljes időszakra vonatkozólag az energiaellátás havi alakulását az EU-ban. A havi bruttó villamosenergia-termelés szezonális mintázatot mutat: az év közepén alacsonyabb a termelés, és az év vége körül tetőzik. Ez több tényezőnek tulajdonítható, például a szezonális keresletváltozásoknak (pl. fűtési igények és rövidebb nappali fény télen) vagy a vízerőművek termelési sajátosságainak (pl. nyári aszályok és tavaszi hóolvadás).

65. ábra Havi bruttó villamosenergia-termelés forrás típusa szerint az EU-ban (2015. január - 2023. augusztus)



Forrás: Eurostat (é.n.-e, é.n.-d) alapján saját készítésű ábra

Ennek megfelelően változik a villamosenergia-termelés fosszilis tüzelőanyagok iránti igénye is. A magasabb áramfelhasználás nagyobb termelési volumet igényel, amit jelenleg nem lehet kizárólag megújuló forrásokból fedezni, különösen télen nem, amikor a nap- és

vízenergia-termelés általában alacsonyabb. Ennek eredményeképpen a megújuló energiaforrásokból előállított villamos energia és a fosszilis tüzelőanyagok aránya között táguló és szűkülő rések láthatók, amelyek a nyár folyamán egy fordulópontot követően fordulnak meg. Az elmúlt évben az év közepén minden korábbinál jobban nőtt ez a különbség a megújuló energiaforrások javára.

Ezek alátámasztják a villamosenergia-árak előrejelzésében használni kívánt változóim kiválasztását. Látható az energiaárak összekapcsoltsága is, bár ennek mértéke a megfigyelt idősor, vagyis a gazdasági körülmények alapján változik. Továbbá, a megújuló energiák szerepe a merit-orderben, és így az árampiac elszámolóárának meghatározásában is hozzájárul az előrejelzési modell felállításához.

7.2.1.1. A kiválasztott módszerek alkalmazása a modellezett időszakok alatt

Az előzetes adatelemzés után először az egyváltozós modelleket értékelem, majd áttérek a többváltozós módszerekre. Az összehasonlítást a modellépítést követő szakaszban mutatom be.

A 21. táblázatban található leíró statisztikák az ismertetett próba és tesztidőszakokra, valamint a teljes adatállományára vonatkozólag tartalmaz információkat. Elsősorban a próba időszakokra, mivel a modellépítési folyamat ezeken alapul, valamint a kiértékelendő tesztidőszakokra fogok összpontosítani. Az energiaválság nagykereskedelmi villamosenergia-árakra gyakorolt hatását szemléltetik a két tesztidőszak átlag, maximum és szórás értékei. Az energiaválság előtti időszak modellezéséhez használt próba időszak hasonló jellemzőkkel bír, mint a tesztidőszak, bár a mérsékelten jobbra ferde és normális eloszlás a tesztidőszaknál balra ferde és platikurtikus eloszlásra változott. A második modell szerint a próba időszak jelentősen eltér az energiaválság utáni időszak tesztidőszakától. Előbbi erősen jobbra ferde eloszlást jelez, míg az 1,06-os kurtózis leptokurtikus eloszlásra utal, ami az áramárakban a szélsőértékek megjelenésének nagyobb valószínűségét jelenti. A Jarque-Bera-teszt további információt nyújt a normalitással kapcsolatban; ezek azt jelzik, hogy minden vizsgált idősor valószínűleg normális eloszlású, kivéve az energiaválság alatti időszakhoz kapcsolódó teljes és tesztidőszakok esetén, amelyek 5%-os szignifikancia-szinten jelentősen eltérnek a normális eloszlástól.

21. táblázat A nagykereskedelmi villamosenergia-árak statisztikai jellemzői különböző időhorizontok mellett

	Energiaválság előtti időszak			Energiaválság alatti időszak		
	Teljes időszak	Próba időszak	Teszt időszak	Teljes időszak	Próba időszak	Teszt időszak
Megfigyelés	77	53	24	101	77	24
Átlag	41,893	41,818	42,058	75,081	41,893	181,559
Minimum	21,551	27,137	21,551	21,551	21,551	77,051
Maximum	61,439	61,439	59,311	425,198	61,439	425,198
Szórás	9,197	8,706	10,395	72,933	9,197	85,612
Ferdeség (Pearson)	0,269	0,709	-0,343	2,464	0,269	1,114
Csúcsosság (Pearson)	-0,148	0,052	-0,481	6,352	-0,148	1,060
Jarque-Bera teszt	0,998	4,451	0,700	271,988**	0,998	6,085*
Ljung-Box teszt (szf=6)	123,905**	99,521**	37,484**	364,061**	123,905*	16,632*
ADF-teszt I(0)	-2,882	-3,499*		-2,096	-2,882	
ADF-teszt I(1)	-4,245**	-3,532*		-3,241	-4,245**	
PP-teszt I(0)	0,000	-0,296		-1,247	0,000	
PP-teszt I(1)	-7,782**	-7,071**		-9,600**	-7,782**	
KPSS-teszt I(0)	0,144	0,157*		0,378**	0,144	
KPSS-teszt I(1)	0,051	0,049		0,092	0,051	

*Megjegyzés: Szignifikáns 1%-os (**) és 5%-os (*) szinten.*

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

A Ljung-Box-féle fehérzaj-tesztek, amelyek egy idősor különböző késleltetéseiben való autokorrelációját vizsgálják, együttesen azt mutatják, hogy minden modellben az első hat késleltetés közül legalább az egyikben jelentős autokorreláció van, ami az adatok véletlenszerűségére vonatkozó nullhipotézis elutasítását eredményezi. Az autokorreláció sajátosságainak megértéséhez idősoraimban az ACF és PACF ábrákat az eredeti adatsorokon, valamint a log-transzformált és log-differenciált adatsorokon is ábrázoltam. A transzformációkra azért volt szükség, mert számos statisztikai modellezési technika és elemzés stacionaritást feltételez, azaz az idősor állandó átlaggal, varianciával és autokorrelációs szerkezettel kell, hogy rendelkezzen, ellenkező esetben a sorozatot transzformálni kell a stacionaritás eléréséhez. A próba időszakok ACF-diagramjai lassú csökkenést mutattak a nullához, ami nem stacionáris állapotra utal. Ennek eredményeképpen egységgyök (ADF és PP) és stacionaritási (KPSS) tesztek is elvégeztem. Az energiaválság előtti modellben a próba időszakra vonatkozó vegyes eredmény azt jelzi, hogy az idősor lehet, hogy stacionárius a tekintetben, hogy nincs egységgyök (ADF-teszt) nulladrendben, de lehet, hogy determinisztikus trenddel vagy egyéb nem-stacionaritás jellegzetességgel bír, amit a KPSS-teszt viszont kimutat. A PP teszt nem szignifikáns eredménye a teszt autokorrelációval és heteroszkedaszticitással szembeni robusztusságából adódhat, ami befolyásolja az érzékenységét. A log-differenciálást követő eredmények azonban konzisztensebbek, és arra

utalnak, hogy a transzformációk sikeresen stabilizálták az átlagot és a varianciát az idő múlásával, ami stacionárius idősorhoz vezetett. Az energiaválság alatti modellnél hasonlóan a nulladrendű KPSS nem szignifikáns eredménye nem feltétlenül mond ellent az ADF és PP teszteknek, mivel a KPSS a trend körüli stacionaritást vizsgálja, és a nem szignifikáns eredmény itt arra utal, hogy a sorozat nem rendelkezik determinisztikus trenddel. Mindazonáltal a log-differenciálás ez esetben is stacionáriussá tette az idősort. Egyébként az általam választott módszerek közül a SES és az MLR stacionárius adatokat igényel, míg az ARIMA és az ARIMAX a komponenseik (szint, trend és szezonális) explicit modellezésével képesek kezelni a nem stacionárius adatokat is. Az is lehetséges, hogy a természetes log-transzformáció önmagában is elegendő, hogy stacionáriussá tegye az idősorokat a modellezéshez. Amennyiben a log-transzformáció utáni adatok statisztikai tulajdonságai nem mutatnak erős trendeket vagy egységgyököket, az az ARIMA specifikációjánál úgy is megjelenhet, mint hogy nincs szükség differenciálásra.

Az első becsült modell az ES modell. A különböző paraméterekkel és beállításokkal történő modellezés és összehasonlítás után a normalizált BIC, az R^2 és a pontossági kritériumok alapján a természetes log-transzformált sorozatokon alapuló egyszerű szezonális ES-modell bizonyult a legjobban illeszkedőnek. A kapcsolódó modellstatisztikákat az alábbi táblázat tartalmazza (22. táblázat).

22. táblázat A legjobban illeszkedő ES modellek modellstatisztikái

	Energiaválság előtti időszak		Energiaválság alatti időszak	
	Próba időszak	Teszt időszak	Próba időszak	Teszt időszak
Megfigyelés	53	24	77	24
Alfa (szint)	0,700		0,999	
Beta (trend)	0,000		0,000	
MAE	2,974	11,767	3,154	109,201
MAPE	7,068	33,873	7,761	52,346
RMSE	3,783	13,475	4,035	136,729
R^2	0,808		0,805	
Normalizált BIC	2,849		2,929	
Ljung-Box Q (18)	44,163**		47,016**	

*Megjegyzés: Log-transzformált egyszerű szezonális exponenciális simítás szerint.
Szignifikáns 1%-os (**) és 5%-os (*) szinten.*

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

Az energiaválság előtti időszak modellezése szerint a próba időszak eredményei magasabb pontossági mérőszámokat mutattak, mint a tesztidőszak alapján láthatóak. Ha azonban az energiaválság előtti próba és tesztidőszakot együttesen vesszük alapul az energiaválság alatti modellnél, az azt követő tesztidőszak eredményei a várakozásoknak megfelelően sokkal rosszabban alakultak. A MAE és az RMSE körülbelül tízszer nagyobb, mint az első modell esetében. Ennek eredményeképpen az energiaválság előtti időszakot becslő modell hatékonyabb volt, mint az energiaválság alatti időszakot előrejelző modell.

A következő módszer az ARIMA volt, ahol a végső és optimalizált modell $(0,0,3)(0,0,0)$ paraméterekkel rendelkezett az energiaválság előtti időszakra, míg $(0,0,3)(1,1,0)$ paraméterekkel bírt az energiaválság alatti időszakra vonatkozólag, mindkettő esetében a log-transzformált adatsorok alapján. Az együtthatókat és az összefoglaló statisztikákat a 23. táblázat tartalmazza.

23. táblázat A legjobban illeszkedő ARIMA modellek modellstatisztikái

	Energiaválság előtti időszak		Energiaválság alatti időszak	
	Próba időszak	Teszt időszak	Próba időszak	Teszt időszak
Megfigyelés	53	24	65	24
Koefficiensek:				
Tengelymetszet	3,714**		-	
MA(1)	0,1871**		-1,059**	
MA(2)	0,494**		-0,716**	
MA(3)	0,411**		-0,641**	
SAR(1)	-		-0,663**	
SDIFF	-		1	
MAE	3,891	8,150	4,438	136,938
MAPE	9,215	22,885	10,862	68,973
RMSE	4,915	10,142	5,574	162,113
R ²	0,675		0,673	
Normalizált BIC	3,563		3,757	
Ljung-Box Q (18)	20,937		42,627**	

*Megjegyzés: Log-transzformált ARIMA(0,0,3)(0,0,0) és log-transzformált ARIMA(0,0,3)(1,1,0) modellek szerint. Szignifikáns 1%-os (**) és 5%-os (*) szinten.*

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

Az első modell egy nem szezonális ARIMA három MA-komponenssel, amely az előző három időszak reziduumaikat használja a sorozat tényleges értékeinek becsléséhez. A modell azt

sugallja, hogy a rövid távú, késleltetett sokkhatások befolyásolják a log-transzformált energiaárak előrejelzését anélkül, hogy figyelembe kellene venni a trendeket vagy a szezonális mintákat. Ugyanakkor, ennek a modellbeállításnak a tesztidőszakra való alkalmazása kissé rosszabb eredményt eredményezett. A két ARIMA modell paramétereiben bekövetkezett változás az energiaválság előtti és alatti időszak log-transzformált energiaárak mögöttes mintázatában bekövetkezett elmozdulásra utal. Konkrétan azt mutatja, hogy míg a mozgóátlagok által megragadott rövid távú hatások továbbra is relevánsak maradnak, a válság utáni időszakban a szezonális és a hozzá kapcsolódó trendek vagy minták figyelembevételére van szükség a modellépítés során. A szezonális komponens (1,1,0) azt jelzi, hogy van egy szezonális autoregresszív paramétere (SAR, P=1) és a szezonális differenciálás szintje 1 (SDIFF, D=1). Ez utóbbi azt jelenti, hogy a log-transzformált adatok szezonális nem-stacionaritást mutatnak a válság után, amit az adatok szezonális időszaki különbségének figyelembevételével kezeltem (elsőrendben differenciáltam). Mindazonáltal a tesztidőszakra vonatkozó előrejelzési képessége nagyfokú pontatlanságot mutat: a MAPE 69% és a MAE 137 EUR/MWh, ami még magasabb, mint az egyszerű szezonális ES esetében tapasztalt érték (52% és 109 EUR/MWh).

A többváltozós megközelítések közül először az ARIMAX modelleket becsültem meg (24. táblázat). A modellparaméterek együtthatói alapján csak a RES-E, a TTF és az EUA járulnak hozzá jelentősen az energiaválság előtti próba időszak modelljóságához és előrejelző képességéhez. Említendő, hogy az ARIMAX-ban az "I" komponens nem vonatkozik automatikusan az exogén változókra, de ezeknek a magyarázóváltozóknak is stacionáriusnak kell lenniük. Ezért az összes regresszor log-transzformációját és log-differenciálását követve azt találtuk, hogy a log-transzformált változók bevonása elegendő ahhoz, hogy az ARIMAX modell a legjobb modellilleszkedést érje el. Továbbá a RES-E és az EUA nulla időszakos késleltetéssel szerepel, ami a TTF esetében nulla és öt időszak. Az energiaválság alatti modell paramétereinek szerint a regresszorok köre a NEG és a NEWC paramétereivel bővült; így csak a BRENT nem járult hozzá szignifikánsan egyik modellhez sem. Ez utóbbi modellben az összes külső változó egy szezonális differenciálással szerepel, valamint a TTF és az EUA nulla késleltetéssel, a RES-E és a NEG nulla és egy késleltetéssel, míg a NEWC nulla késleltetéssel és két időszakos késleltetéssel, ami azt jelenti, hogy a közvetlen múltbeli értékét (szezonalitással kiigazítva) és a két időszakkal ezelőtti értékeket veszi figyelembe a modell az energiaválság alatti időszakot illetően.

24. táblázat A legjobban illeszkedő ARIMAX modellek modellstatisztikái

	Energiaválság előtti időszak		Energiaválság alatti időszak	
	Próba időszak	Teszt időszak	Próba időszak	Teszt időszak
Megfigyelés	48	24	63	24
Magyarázóváltozók:	RES-E, TTF, EUA		RES-E, TTF, EUA, NEG, NEWC	
Koefficiensek:				
Tengelymetszet	2,156**		1,517**	
MA(1)	-0,954**		-	
SAR(1)	-		-0,672**	
SDIFF	-		1	
MAE	1,999	11,143	1,333	33,375
MAPE	4,984	28,394	3,269	14,983
RMSE	2,399	12,893	1,760	46,338
R ²	0,927		0,967	
Normalizált BIC	2,368		1,877	
Ljung-Box Q (18)	31,514*		63,040**	

Megjegyzés: Log-transzformált ARIMA(0,0,1)(0,0,0) és ARIMA(0,0,0)(1,1,0) modellek szerint.

*Szignifikáns 1%-os (**) és 5%-os (*) szinten.*

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

Az exogén változók számától függetlenül az alapmodell-konfigurációk mindkét esetben megtartották a szezonális komponenseket. Az MA-komponensek azonban szinte teljesen lecsökkentek és log-transzformációt sem igényelt az energiaválság alatti időszak modellje. Mindazonáltal megállapítható, hogy a modellbővítések jobb pontosságot és modellilleszkedést eredményeztek a próbaidőszak tekintetében. Az energiaválság alatti időszakra vonatkozó előrejelzés is kevésbé pontatlan – sőt, a MAPE (%) még jobb is (15%) –, mint amit a korábbi módszereknél tapasztaltam.

Az eszköztáram utolsó módszertana az MLR-modell felhasználásához kapcsolódik. Kiindulásképpen, ha a kifejezetten idősoros adatokra épülő ARIMA(X) modelljeink nem javasoltak AR-komponenst, az azt jelenti, hogy az általam választott idősorok esetében a havi átlagos áramárak múltbeli értékei nem jelzik előre szignifikánsan a jövőbeli értékeket. Az ugyanakkor az előző alfejezetből is kiderült, hogy különböző tényezők befolyásolják az áramárakat, például a kereslet és a kínálat dinamikája, a tüzelőanyagok költségei, az időjárási viszonyok és így tovább. Ha e tényezők többségét az MLR-modell képes megfelelően megragadni, és ha a vizsgált adatok idősoros jellege nem erősen autoregresszív, akkor tehát a

késleltetett változókat nem feltétlenül kell bevonni az optimális modellbe. A legjobban illeszkedő modell kiválasztása megerősítette ezt az elméletet, mivel csak exogén változókat tartalmaz. Ennek összefoglalója a 25. táblázatban látható, további információk pedig a Függelék F12-13. táblázataiban érhetőek el.

25. táblázat A CO-eljárás által korrigált legjobban illeszkedő regressziós modellek modellstatisztikái

	Energiaválság előtti időszak		Energiaválság alatti időszak	
	Próba időszak	Teszt időszak	Próba időszak	Teszt időszak
Megfigyelés	52	24	76	24
Koefficiensek:				
Tengelymetszet	0,002		-0,001	
DIFF_LN_RES-E	-0,929**		-0,913**	
DIFF_LN_TTF	0,334**		0,254**	
DIFF_LN_EUA	0,250**		0,43**	
DIFF_LN_NEG	-		0,254*	
MAE	1,886	2,683	1,809	73,411
MAPE	4,588	7,394	4,476	33,784
RMSE	2,548	3,296	2,464	98,038
Módosított R ²	0,732		0,741	
F-statisztika	49,500**		56,75**	
VIF _{max}	1,258		1,127	
DW statisztika	2,151		2,034	

*Megjegyzés: Szignifikáns 1%-os (**) és 5%-os (*) szinten.*

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

Mindkét modellezett próbaidőszak a stacionaritással kapcsolatos felvetések miatt log-differenciált adatkészleteken alapul (DIFF_LN_..), és a Cochrane-Orcutt eljárás által történt meg a regressziós modellek reziduumaik autokorrelációjának korrekciója, amit a kezdeti DW-statisztikák (2,585 és 2,207) sugalltak. Az MLR modell alapfeltevéseit analitikus és grafikus módon is ellenőriztem.

Az energiaválság előtti modell szerint a legjobban illeszkedő MLR-ben a RES-E, a TTF és az EUA-t regresszorok kaptak helyet, míg az energiaválság alatti modell esetében e lista a NEG regresszorral tovább bővült. Mindkét esetben a RES-E járul hozzá a legnagyobb mértékben az eredményváltozó magyarázatához. Az első modell szerint a RES-E 1%-os növekedése egyik időszakra a másikra ceteris paribus a havi átlagos áramár átlagosan

0,91%-os csökkenésével jár ugyanabban az időszakban. Ami az előrejelzési pontosságokat illeti, az első modell próba és tesztidőszakainak becslései lényegesen jobbák, mint az előző módszerek által alkalmazott modelleknél volt megfigyelhető. Ez az MLR-specifikáció tehát figyelemre méltóan jól tudja modellezni a havi átlagos nagykereskedelmi villamosenergia-árakat. Nem képes azonban jó becslést adni az energiaválság alatti időszakra vonatkozólag, mivel az összes metrika jelentősen magasabb, mint ami a többi modell esetében volt látható.

7.2.2. Modell összehasonlítások és hipotézis-ellenőrzés

A 26. táblázat tartalmazza a korábban áttekintett legjobb illeszkedésű modellek MAE, MAPE és RMSE mérőszámait. Az összes alkalmazott módszer kiértékelése után több következtetést vonhatok le a módszertan, a megfigyelt idősorok és az értékelési kritériumok eredményei alapján.

26. táblázat Az ES, ARIMA, ARIMAX és MLR összehasonlítása az előrejelzési teljesítményben

Teszt időszakok	Módszer	Modell	MAE	MAPE	RMSE
Energiaválság előtti időszak modelljei	Egyváltozós	ES	11,767	33,873	13,475
	Egyváltozós	ARIMA	8,150	22,885	10,142
	Többváltozós	ARIMAX	11,143	28,394	12,893
	Többváltozós	MLR	2,683	7,394	3,296
Energiaválság alatti időszak modelljei	Egyváltozós	ES	109,201	52,346	136,729
	Egyváltozós	ARIMA	136,938	68,973	162,113
	Többváltozós	ARIMAX	33,375	14,983	46,338
	Többváltozós	MLR	73,411	33,784	98,038

Forrás: Saját összeállítás

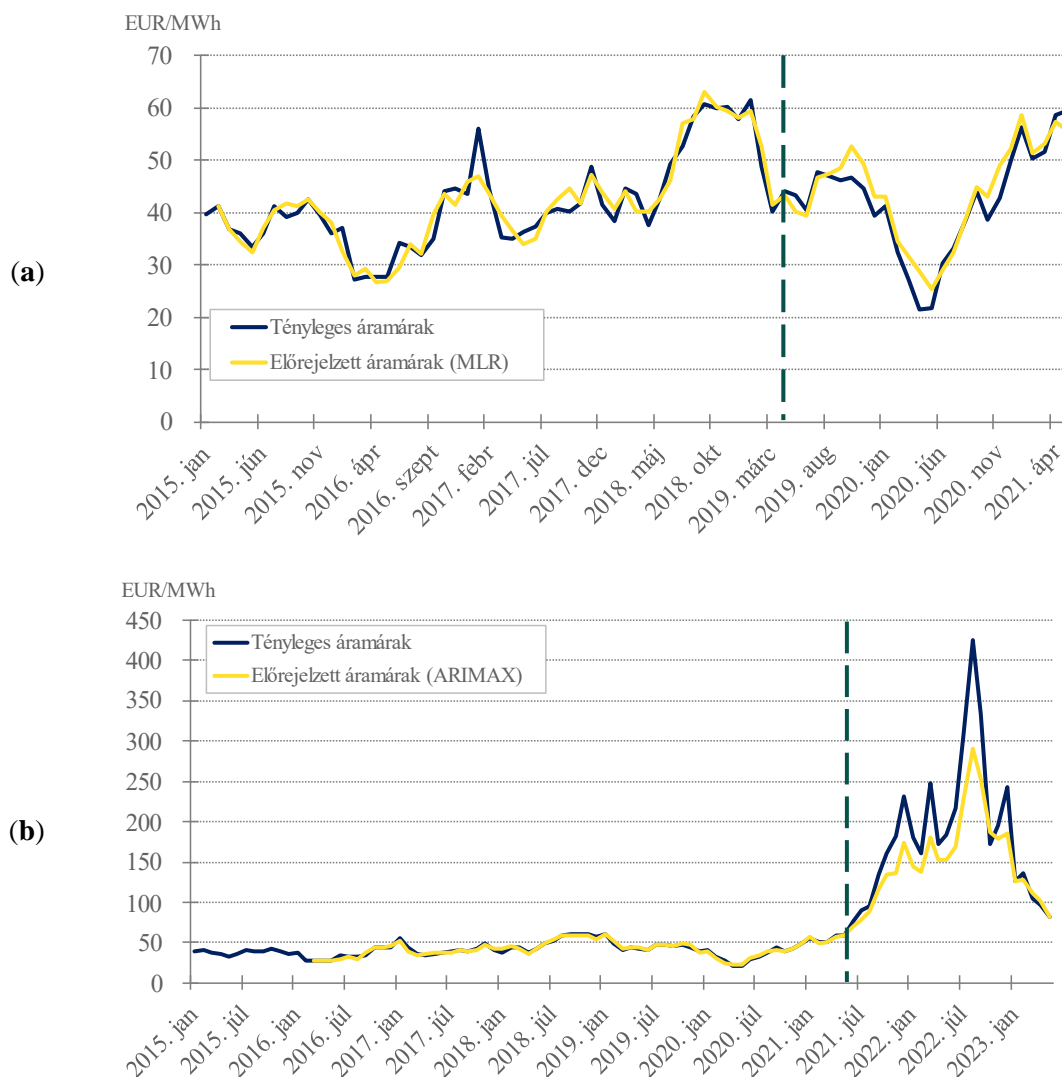
Az energiaválság előtti modellek esetében a többváltozós lineáris regressziós modell mindhárom értékelési metrika tekintetében a legjobb eredményre vezetett az egyváltozós modellekhez (ES és ARIMA) és a többváltozós ARIMAX modellhez képest. A jelentősen alacsonyabb értékek arra utalnak, hogy a külső változók használata pontosabb modellt eredményezett erre az időszakra. A rangsorban a második helyen az ARIMA áll, tehát az egyváltozós modellek esetében az ARIMA modell jobban alkalmas a havi áramárak idősoros tulajdonságainak megragadására ebben a kiválasztott időhorizonton belül. Az exponenciális simítás volt a legpontatlanabb az energiaválság előtti időszak modelljei közül.

Az energiaválság alatti időszakhoz kapcsolódó modellek esetében a többváltozós ARIMAX modell figyelemre méltó eredményt mutatott a többi modellhez képest, mivel a

MAE, MAPE és RMSE értékek szignifikánsan a legalacsonyabbak az összes közül. Ez arra utal, hogy a külső tényezők bevonása az ARIMA-modellezés mellett különösen hatékony a villamosenergia-árak energiaválság alatti időszak strukturális változásainak elemzésében. Az előrejelzési pontosság tekintetében az ARIMAX-ot az MLR követi, melynek pontossága csökken az energiaválság előtti időszakhoz képest, de még mindig jobban teljesít, mint az egyváltozós megközelítések használata ezen időhorizont modellezésére. Mind az ES, mind az ARIMA modellek pontossági metrikái lényegesen magasabbak az energiaválság alatt, mint az energiaválság előtt, ami arra utal, hogy nehezen tudják megbecsülni a havi áramárakat a megváltozott makroökonómiai környezetben.

Összességében az első vizsgált időszak, valamint a legjobban illeszkedő MLR-modellt tekintve a tényleges nagykereskedelmi áramárak megawattóránként 2,683 euróval, vagyis átlagosan 7,4%-kal tértek el a becsült áraktól. A második vizsgált időszak során a legpontosabb ARIMAX modellel történő értékelése azt eredményezi, hogy az eltérések 33,375 EUR/MWh-ra, illetve átlagosan 15,0%-ra nőttek. A modellek illeszkedését a *66.a-b ábrák* szemléltetik.

66. ábra A legjobban illeszkedő modellek pontosságának szemléltetése a) az energiaválság előtti időszakokra és b) az energiaválság alatti időszakokra vonatkozóan



Forrás: Saját készítésű ábrák

Összefoglalva, a többváltozós modellek használata általában jobb előrejelzési pontosságot eredményezett a havi átlagos nagykereskedelmi villamosenergia-árak tekintetében, különösen az energiaválságot követő változékony körülmények között. Ez arra enged következtetni, hogy az egyes idősorok összetettebb dinamikájának megragadása érdekében érdemes külső regresszorokat bevonni az előrejelzési modellekbe.

*„To meet our energy challenge requires the most important energy of all - human creativity.
That's the real prize.”*

- Daniel Yergin (2011), author of The Quest: Energy, Security and the Remaking of the Modern World

8. Összefoglalás

E doktori disszertáció megírásának célja egy olyan tudományos munka elkészítése volt, amely multidiszciplináris jelleggel vizsgálja a fenntartható energiaátmenet koncepcióját. Ez egy átfogó rendszerszeméletet kívánt meg, amely számos, a témával kapcsolatos területre kiterjedt. Mindezt olyan irányba elvívve, amelynek vizsgálata jelen globális és regionális kontextusban elsőrendű figyelmet igényel. Hiszen az EU energiapolitikája és -stratégiája korábban soha nem látott kihívások elé került a 2020-as multiválságok tekintetében. Az energiapolitikai válaszlépések háttérben meghúzódó okok és válaszok megértéséhez szintúgy elengedhetetlen a mélyreható és valamennyi társterületre kiterjedő vizsgálat lefolytatása.

Ennek fényében, kutatásom során három általános célkitűzést fogalmaztam meg, melyek összefüggenek és a további kutatási kérdéseim és hipotézisem alapját szolgáltatták:

- ❖ Feltérképezem a fenntartható energiagazdálkodás, az energiatrilemma és az energiaátmenet kapcsolatrendszerét, koncepcióinak evolúcióját, valamint ezek mérhetőségi lehetőségeit;
- ❖ Áttekintsem és kiértékeljem az előző pont keretén belül az Európai Unió mint egész elmúlt évtizedekbeli energiastratégiáját és -politikáját főleg a villamosenergia-piac kontextusában;
- ❖ Célom továbbá, hogy mindezen történeti és regulációs ismeretek energiapiaci hatásait empirikus úton, leíró és következtetési statisztikai módszerekkel is alátámasszam.

8.1. Kutatási eredmények

Az első kutatási kérdésem arra irányult, hogy megértsem, **mi a közös pont az energiatrilemma, az energiaátmenet és a fenntartható energiagazdálkodás között.**

Általánosságban a fenntarthatóság jelöli ki azokat a határokat, amelyen belül a fejlődés fenntartható módon megvalósulhat, míg a végcél a fenntarthatóság, melynek a megnyilvánulása számunkra gyakorlatilag nem más, mint a fenntartható élet és jóllét. A fenntarthatóság energetikai kontextusban hasonló elemekből áll, hiszen a fenntartható energiagazdálkodás azt a folyamatot jelöli meg, amelynek keretén belül eljuthatunk a fenntartható energiák hasznosításáig. Ennek a folyamatnak, mely a tágran értelmezhető gazdasági, társadalmi és

környezeti dimenziók mentén értékeli a folyamatok jellegét, a politikai döntéshozóknak ennél egy konkrétabb, jobban megfogható és mérhető értékelési rendszerre van szükségük a gyakorlatban. Erre nyújtott segítséget a WEC által kifejlesztett energiatrilemma koncepció, amely az energiaellátás, egyenlőség és környezeti fenntarthatóság szempontjából vizsgálja az országok helyzetét. Mindezt úgy, hogy korunk energiastratégiájának centrumában az energiaátmenet található meg, mely a történelem során immáron ismételten változást generál az energiarendszer felépítésében és alapvető működésében. Ehhez a kutatási résztémához kapcsolódóan két hipotézist fogalmaztam meg:

H1: Az energiatrilemma koncepcióban az ellátásbiztonság, az energia egyenlőség és környezeti fenntarthatóság egyformán hangsúlyos.

A WEC által kifejlesztett energiatrilemma koncepcióban e három szempont egyformán hangsúlyosan jelenik meg. Ez egyrészt megjelenik az energiatrilemma-index számszerűsítésénél is, ahol minden vetület 30-30-30%-os részarányt képvisel a végső indexben (a maradék 10% az országspecifikus kontextus). Másrészről pedig már korán felismerésre került, hogy valamennyi ország esetében egyensúlytalanság van e három szempontot illetően. Ez kompromisszumot (*trade-off*) sugall, azaz az energiapolitikai döntéshozóknak olyan döntéseket kell hozniuk adott országspecifikus kontextusban, amelyek egy vagy két vetületet erősítenek a harmadikkal szemben. A cél pedig – a WEC megfogalmazásában – hogy egyensúlyba kerüljön a három szempont minden egyes döntéshozás során.

Ez tehát szembe megy a fenntartható energiagazdálkodással, amely – az erős fenntarthatóság elvét követve – elsősorban a hosszú távú környezeti fenntarthatóságra összpontosít, amely szerint a természeti erőforrásokat és az ökoszisztémákat nem szabad maradéktalanul kizsákmányolni vagy helyettesíteni. Ha ez sikerül, csak akkor valósulhat meg a társadalmi és gazdasági fenntarthatóság is. Tehát ebben elméleti szinten nem jelenhet meg a kompromisszumkészség a környezeti fenntarthatósággal szemben.

Ezáltal a hipotézis igaznak bizonyult.

H2: Az energiaátmenetre támaszkodva megvalósulhat az energiatrilemma egyensúlya.

Már a WEC energiatrilemma koncepciójának kialakulása során is feltették a nagy kérdést, miszerint megvalósulhat-e az energia fenntarthatósági trilemmájának kompromisszummentes kiegyensúlyozása? E kérdés után rögtön a választ is megadták, mégpedig azt, hogy a jelenlegi ismeretek tükrében tökéletes egyensúly egyszerre mindhárom vetületben nem lehetséges. De a hangsúly már akkor is a „jelenlegi” jelzőn volt, ugyanis korunk energiaátmenete, amely már nem első az emberiség történelmében, elméletben elvezethet ehhez az egyensúlyhoz. Fontos

hangsúlyozni, hogy az energiaátment teljesítése nem elégséges, ugyanis a tiszta és megújuló energiaforrásokra való áttérés a fosszilis tüzelőanyagok használatáról – mely a környezeti fenntarthatóság fő céljának eredője – még nem feltétlenül eredményezi az energiatrilemma egyensúlyát. Egyik energiaforrás sem tekinthető teljes mértékben fenntarthatónak minden tekintetben, ha nem megfelelő módon használják fel őket. Így a végcél elérése érdekében, mely a fenntartható energia használata, annak egyben fenntarthatónak is kell lennie összességében gazdasági-társadalmi-környezeti vetületben is. Tehát fenntartható energiaátmenetnek kell teljesülnie a hosszú távú cél elérésének az érdekében.

Ezáltal a hipotézis csak részben bizonyult igaznak.

A második kutatási kérdésem arra keresett választ, hogy **párhuzamba hozható-e az energiatrilemma valamely dimenziójának előnybe részesítése a különböző uniós energiapolitikai döntésekkel.**

A vizsgálataim rávilágítottak arra, hogy nem lehetséges *ceteris paribus* megállapítani egy irányelvről vagy rendeletről, illetve geopolitikai eseményről, hogy az csak ellátási, gazdasági vagy környezeti szempontok szerint mérhető hatással bírt. Az energiapolitikai döntések következményeinek multipoláris jellege jól szemlélteti a rendszerszemlélet szükségességét az energiarendszerek komplexitása miatt. Mindazonáltal, a döntéshozók számára az energiatrilemma elméleti egyensúlyának keresése gyakran jár valamely dimenzió rövid- vagy középtávon prioritásként kezelésével, vagyis döntési kényszerűséggel. Ehhez a kutatási résztémámhoz az alábbi hipotézis tartozott:

H3: Az EU energiapolitikai irányainak fő fókusza 1951 és 2021 közötti években az energiaellátás biztonságától eltolódott a versenyképesség, majd pedig a környezeti szempontok felé.

Bár a rendszerszemlélet és összekapcsoltság kérdése vitathatatlan, mégis megkísérelhető az EU jelentősebb belső eseményeinek, valamint az EU energiastratégiáját érintő külső geopolitikai és geoökonómiai hatásoknak a rendszerezése aszerint, hogy adott kontextusban mely nézőpont volt az elsődleges fókuszban, minek a fejlesztése került előtérbe. A hangsúly a „fókusz”-on van, mivel közvetlenül és közvetetten más perspektívában is mérhető a változtatási hajlandóság. A vizsgálataim során arra a következtetésre jutottam, hogy míg az energiaellátás biztonságának kérdése egészen a 2000-es évek elejéig valamennyi áttekintett dokumentumban elsődlegesen megjelent, úgy az 1900-as évek végétől kezdve az ezredforduló első évtizedében az energiapiacok szerkezetének gazdaságossági szempontú átrendeződése volt látható – miközben a 2000-es évek második felétől az ellátásbiztonsági dilemma is felértékelődött.

Ennek fő indikátorai a 2006-os és 2009-es orosz-ukrán gázválságok voltak. Ezzel párhuzamosan, valamint a világviszonylatban teret nyelő klímakonferenciák és fenntartható fejlődési célkitűzések erősödésével a környezeti szempontok is előtérbe kerültek, melyek végül gyakorlatilag az EU teljes második évtizedbeli energiastratégiáját meghatározták. Tehát a megfigyelt teljes időhorizont alatt semelyik perspektíva nem került teljesen a háttérbe.

Ezáltal a hipotézis igaznak bizonyult.

A harmadik, és egyben utolsó feltáró jellegű kutatási kérdésem azt a kérdést feszegette, hogy **az EU-s klímasemlegesség hosszú távú célkitűzéseit mennyiben írják felül az ellátásbiztonság rövid- és középtávon megoldandó kihívásai? Vagy megfordítva a kérdést: az energiabiztonság iránti igény megpróbáltatást jelent-e a karbonsemlegességre való törekvésben?**

Geostratégiai szempontból az EU-nak folyamatosan figyelemmel kell kísérnie azokat a kihívásokat, amelyek az energiahordozók globális és regionális piacainak változásából adódnak. A COVID-19 pandémia, az orosz-ukrán háború, valamint e kettő alatt és által gerjesztett energiaválság olyan törést okozott az EU társadalmában és gazdaságában, amelyet nem tapasztalt meg még korábban. Ezek a multiválságok az EU elmúlt évtizedbeli energiapolitikáját is új megközelítésbe helyezték, a 2050-re történő karbonsemlegesség elérésének menetrendjének újratervezése a geopolitikai feszültségek következtében szükségessé vált. Ehhez a kutatási résztémámhoz az alábbi hipotézis tartozott:

H4: A közelmúltbeli geopolitikai feszültségek teljesen átrendezték a prioritási sorrendet, amely miatt az energiaátmenet fontossága a háttérbe került.

A 2020-as évekbeli multiválságok, kiváltképp az orosz-ukrán háború energiagazdasági következményei ismét előtérbe helyezték az energiaellátás biztonságának kérdését. A REPowerEU – mely az orosz-ukrán háború energetikai kihívásaira válaszol – rögzíti, hogy az EU a Zöld Megállapodás klímavédelmi célkitűzéseiről nem mond le, azt nem módosítja, nem tolja ki a határidőt. Ez lényegében azt jelenti, hogy az energiaátmenet továbbra is prioritást élvez, megerősítve ezzel a hosszú távú célkitűzést, a fenntartható energiák használatát. Sőt, a politikai döntéshozók éppen a tiszta és megújuló technológiákba való magasabb fokú befektetésben látják a megoldást, mely hozzájárul a folyamatosan épülő megújuló, elsősorban nap- és szélenergiák kapacitás kiépítéséhez. Ugyanakkor e geopolitikai konfliktus alaposan átrendezte az energiatrilemma szempontrendszerét. Az ellátásbiztonság kérdése rövid- és középtávon kiemelt figyelmet kap az orosz agresszió és az EU gázimport-függőségének összefüggésében, ezáltal az energiaellátást biztosító eszközök és intézkedések előtérbe

kerültek, így a 2050-es célkitűzés menetrendjének és eszközeinek felállításában elképzelhető a jelentős változás. Emiatt például a szénérőművek – melyek a környezeti fenntarthatóság egyik legnagyobb ellenségei – újra szerepet kaphatnak az ellátásbiztonságban, amíg nem sikerül megoldani a gázbeszállítók diverzifikációját – illetve amíg egyáltalán szükség van gáztüzelésre. Tehát az energiabiztonság növelése átmeneti jelleggel a környezeti fenntarthatóság rovására mehet. Mindent összevetve, a politikai döntéshozók ismét újratervezési és döntési kényszerűséggel szembesültek az energiatrilemmát illetően, hogy az EU minden áron leválhasson az orosz gázzal. Ez azonban hosszú távon az energiaátmenet felgyorsulását is magával hozhatja, aminek igazolása természetesen a jövő kérdése.

Ezáltal a hipotézis összességében nem bizonyult igaznak.

A kvantitatív kutatásaimhoz kapcsolódó első, egyébként a negyedik kutatási kérdés arra kereste a választ, hogy **mely energiahordozók piaci árai és egyéb tényezők befolyásolják statisztikailag szignifikánsan a nagykereskedelmi villamosenergia-árak alakulását a multiváltságok hatásai figyelembevételének függvényében.**

A villamosenergia-piac működési mechanizmusának áttekintése után azt a következtetést tudom levonni, hogy a nagykereskedelmi áramár alakulásának számos befolyásoló tényezője van, melyek közül keresleti oldalon közvetlenül az áramfogyasztási szükséglet a mérvadó, amelyet többek között az időjárási viszonyok (hőmérséklet), gazdasági aktivitás, ipari termelés, technológiai fejlettség, lakosság mérete és mindennapi szokásai határoznak meg. A kínálati oldalon pedig alapvetően a köztes és csúcsidőszakok termelési jellege szabhatja meg az árat. Így a merit-order mechanizmusán keresztül jelentős hatással kell, hogy legyen a megújuló energiaforrások aránya az össztermelésben a nagykereskedelmi áramárra, valamint annak az utolsó, marginális erőműnek a költsége (azaz az adott energiahordozónak az ára), amelyet bekapcsolni szükséges a fogyasztói igények maradéktalan kielégítése céljából. Továbbá, mivel az EU ETS EUA kvóta-árai szorosan kapcsolódnak a fosszilis energiahordozók áraihoz, így a CO₂-kvótaárakat is a nagykereskedelmi áramárat befolyásoló egyik tényezőnek tekintem. Ehhez a kutatási résztémához kapcsolódóan két hipotézist fogalmaztam meg:

H5: A megújuló energiák aránya a villamosenergia-termelésben minden esetben erős és ellentétes irányú szignifikáns kapcsolatot mutat a nagykereskedelmi villamosenergia-árakkal.

Kvantitatív elemzéseim alapján a megújuló áramtermelés arányának parciális regressziós együtthatója -0,756 volt a multiváltságok felfutása előtti idősor alapján, míg a teljes vizsgált időszak szerint ugyan valamivel alacsonyabb, de szintén erős (-0,662) és szignifikáns

kapcsolatot véltem felfedezni. Továbbá, mindkét esetben a 90 és 95%-os konfidenciaintervallumok is negatív értékeket eredményeztek, ami tovább erősíti azt a következtetést, hogy a megújuló áramtermelés aránya és a nagykereskedelmi villamosenergia-árak között a kapcsolat negatív lesz.

Ezáltal a hipotézis igaznak bizonyult.

H6: A nagykereskedelmi villamosenergia-árak várhatóan kevésbé csökkennek a multiválságokkal is terhelt időszakban, ha a megújuló energiákból előállított villamosenergia mértéke egy egységgel nő ceteris paribus a multiválságok felfutása előtti időszakhoz képest, míg a földgázárak viselkedése esetében ennek éppen ellenkezője igaz.

A regresszióelemzés során arra a következtetésre jutottam, hogy a multiválságok felfutása előtti időszakra vonatkozó modell becslése szerint a megújuló áramtermelés részarányának 1%-os növekedése egyik időszakra a másikkal ceteris paribus a nagykereskedelmi villamosenergia-árak átlagosan 0,95%-os csökkenésével jár azonos időszakban. Ennek értéke a kibővített idősor esetén 0,96%-ra nőtt meg. Tehát csökkenés nem volt mérhető. Ehhez képest míg a földgázárak esetén a multiválságok felfutása előtti modell becslése szerint a földgázárak 1%-os növekedése egyik időszakra a másikkal az áramár mintegy 0,19%-os átlagos növekedésével jár, más tényezők változatlansága mellett ugyanabban az időszakban, addigra ez az érték 0,55%-ra nőtt meg a teljes vizsgált időszakra vonatkozó modellben. Ez tehát azt jelenti, hogy a TTF egységnyi növekedése ceteris paribus, két egymást követő időszak között nagyobb mértékben járult hozzá az EP változásaihoz a multiválságokkal terhelt teljes időszakban, mint azok felfutása előtti időkben.

Ezáltal a hipotézis részben igaznak bizonyult.

Végezetül, a második kvantitatív, egyben az ötödik kutatási kérdésem azt firtatta, hogy **gyengültek-e a különféle hagyományos statisztikai modellek előrejelző képességei az energiaválság következtében.**

A nagykereskedelmi villamosenergia-árak előrejelzése kiemelkedően fontos az energiapiacok hatékony működése, a hálózatirányítás működési hatékonysága és a fogyasztók védelme szempontjából. Az árampiac jellemzői és valamennyi befolyásoló tényezője miatt azonban az áramárak közép- és hosszútávú előrejelzése kihívást jelent. Nem is beszélve egy olyan multiválságokkal terhelt időszak vizsgálatáról, mint amilyenben a közelmúltban volt részünk, és mely új próbatételeket és tanulságokat hozott a villamosenergia-árak előrejelzése tekintetében. A villamosenergia-árak modellezésének és előrejelzésének az elmúlt évtizedekben egyre nagyobb szakirodalma lett, ahol a választott árelőrejelzési technikák a

rendelkezésre álló idősor tulajdonságai és a kutatási célok alapján változhatnak. Ehhez az utolsó kutatási résztémámhoz az alábbi hipotézis tartozott:

H7: Az energiaválság időszakára vonatkozó statisztikai becslések pontatlanabbak, mint az azt megelőző idősokra végzett előrejelzések, ugyanakkor a többváltozós modellek az energiaválság előtti és alatti vizsgált időszakok esetében is pontosabbnak bizonyulnak az egyváltozós társaiknál.

Az összes alkalmazott módszer kiértékelése után azt a következtetést vontam le a módszertan, a megfigyelt idősorok és az értékelési kritériumok kontextusában, hogy a többváltozós modellek használata általában jobb előrejelzési pontosságot eredményezett a havi átlagos nagykereskedelmi villamosenergia-árak tekintetében, különösen az energiaválság időszaka alatti változékonny körülmények között. Ez arra enged következtetni, hogy az egyes idősorok összetettebb dinamikájának megragadása érdekében érdemes külső regresszorokat bevonni az előrejelzési modellekbe.

Ezáltal a hipotézis igaznak bizonyult.

8.2. A kutatás jövőbeli irányai

Tekintettel a téma aktualitására, a dolgozatban szereplő eredményekre építkezve folytatni fogom ezt a kutatási vonalat, hiszen nem túlzás azt kijelenteni, hogy ez az évtized geopolitikai perspektívából, valamint energetikai rendszerszemlélet szemüvegén keresztül nézve dinamikusnak fog bizonyulni. Ezért úgy gondolom, mindenképp hasznos lenne az elvégzett kutatást folytatni, továbbfejleszteni.

Tervezem a kutatási irányomat olyan irányba is elvinni, amelyre az eddigiek során még nem volt lehetőségem. Ide tartozik például az EU-n belüli országspecifikus vizsgálódások lehetősége, kiváltképp Magyarország, Spanyolország és Svédország energiapolitikájának és -stratégiájának feltérképezése és összehasonlítása.

Továbbá, a disszertációban feltárt statisztikai összefüggéseket is hasznos lenne tovább vizsgálni, fejleszteni. Ebbe beletartozik új módszertan alkalmazásának elsajátítása mind a kapcsolati rendszer összefüggéseit, mind pedig az előrejelző modelleket tekintve.

Végezetül, lehetőséget látok a kutatási témám különböző határterületein történő további vizsgálódásokra is. Ezek közül kiemelném a digitális transzformáció jelenségét és hatását a zöld gazdaságra.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom konzulensemnek, Dr. Pintér Évának, amiért folyamatosan tanácsokkal és iránymutatásokkal látott el a kutatásom és a doktori értekezésem készítése során, hozzájárulva a sikeres munkámhoz. Szintén köszönöm Dr. Gálosi-Kovács Bernadett korábbi társtémavezetőnek is, aki hozzájárult a kutatási témám alapjainak meghatározásához.

Szeretném kifejezni köszönetemet a Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Kar Földtudományok Doktori Iskola korábbi és jelenlegi vezetőjének, Dr. Dövényi Zoltánnak és Dr. Geresdi Istvánnak, hogy felvételt nyerhettem a Doktori Iskolába, valamint mindazon oktatóknak, akik hozzájárultak tudásom kiszélesítéséhez a geopolitika, természet- és társadalomtudományok terén.

Hálás vagyok az EY Magyarországnak is, különösképpen Horváth Csabának, hogy biztosították az időt és a támogatásukat a kutatói munkám elvégzéséhez és a dolgozatom megírásához.

Továbbá szeretném kifejezni köszönetemet és hálámat családomnak, akik végig egyengették utamat a legelső pillanattól kezdve. Édesanyámnak a sokrétű szerető támogatását, valamint nevelőapámnak, Dr. Erostyák Jánosnak a rengeteg szakmai megjegyzéseit, kiegészítéseit. Végezetül, de nem utolsó sorban köszönöm feleségemnek, akinek soha nem lankadó figyelme és érzelmi támogatása nélkül ez a dolgozat nem készülhetett volna el.

Irodalomjegyzék

- Afriyie, J. K., Twumasi-Ankrah, S., Gyamfi, K. B., Arthur, D., & Pels, W. A. (2020). Evaluating the Performance of Unit Root Tests in Single Time Series Processes. *Mathematics and Statistics*, 8(6), 656–664. <https://doi.org/10.13189/ms.2020.080605>
- Agency for the Cooperation of Energy Regulators. (2020). *Annual Report on the Results of Monitoring the Internal Electricity and Natural Gas Markets in 2019*. Ljubljana: ACER.
- Alam, M. S., Murshed, M., Manigandan, P., Pachiyappan, D., & Abduvaxitovna, S. Z. (2023). Forecasting oil, coal, and natural gas prices in the pre-and post-COVID scenarios: Contextual evidence from India using time series forecasting tools. *Resources Policy*, 81, 103342. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103342>
- Alapvető Jogok Biztosának Hivatala. (é.n.). *ENSZ Fenntartható Fejlődési Célok*. <https://www.ajbh.hu/-/ensz-fenntarthato-fejlodesi-celok-sustainable-development-goal-sdg->
- Amri Amamou, S., & Aguir Bargaoui, S. (2022). Energy markets responds to Covid-19 pandemic. *Resources Policy*, 76(102551), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102551>
- Arora-Jonsson, S. (2023). The sustainable development goals: A universalist promise for the future. *Futures*, 146(103087), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.103087>
- Asche, F., Osmundsen, P., & Sandsmark, M. (2006). The UK Market for Natural Gas, Oil and Electricity: Are the Prices Decoupled? *The Energy Journal*, 27(2), 27–40. <https://www.jstor.org/stable/23297017>
- Azam, A., Rafiq, M., Shafique, M., Ateeq, M., & Yuan, J. (2020). Causality Relationship Between Electricity Supply and Economic Growth: Evidence from Pakistan. *Energies*, 13(4), 837. <https://doi.org/10.3390/en13040837>
- Bahar, H., & Sauvage, J. (2013). Cross-Border Trade in Electricity and the Development of Renewables-Based Electric Power. *OECD Trade and Environment Working Papers* (Issue 2013/02). Paris. <https://doi.org/10.1787/5k4869cdwnzr-en>
- Baker, S. (2016). *Sustainable development (2nd ed.)*. London: Routledge.
- Ballester, C., & Furió, D. (2015). Effects of renewables on the stylized facts of electricity prices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1596–1609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.168>
- Bâra, A., Oprea, S. V., & Băroiu, A. C. (2023). Forecasting the Spot Market Electricity Price with a Long Short-Term Memory Model Architecture in a Disruptive Economic and Geopolitical Context. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 16(1), 1–22. <https://doi.org/10.1007/S44196-023-00309-3/TABLES/13>
- Bartholy, J., Breuer, H., Pieczka, I., Pongrácz, R., & Radics, K. (2013). *Megújuló energiaforrások*. Budapest: Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar.
- Bencivenga, C., Sargenti, G., & D'Ecclesia, R. L. (2010). Energy markets: crucial relationship between prices. *Mathematical and Statistical Methods for Actuarial Sciences and Finance* (pp. 23–32). Milan: Springer https://doi.org/10.1007/978-88-470-1481-7_3

- Berkeley Earth. (2024). *Global Temperature Report for 2023*. <https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2023/>
- Bhattacharyya, S. C. (2011). *Energy Economics*. London: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-268-1>
- Bihari, P. (2012). *Energetikai alapismeretek*. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék.
- Bioenergy Europe. (2022). *Statistical Report Bioelectricity 2022*. Brussels: Bioenergy Europe.
- Bodnár, I. (2019). *Villamosenergetika és biztonságtechnika*. Miskolc: Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézet.
- Bohn, P. (1992). Meg nem újuló természeti erőforrásaink megtekintése. *Gazdaság & Társadalom*, 3(1–2), 142–183. https://journal.uni-sopron.hu/index.php/gt/article/view/gt_03-1-2-1992_05_Bohn/gt_03-1-2-1992_05_Bohn
- Bolt, J., & Luiten van Zanden, J. (2020). Maddison style estimates of the evolution of the world economy. A new 2020 update *Maddison-Project Working Paper WP-15*. <https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/releases/maddison-project-database-2020>
- Bora, G., & Korompay, A. (2003). *A természeti erőforrások gazdaságtana és földrajza*. Budapest: Aula Kiadó.
- BP. (2021). *Statistical Review of World Energy 2021*. London: BP.
- Brosset, E., & Maljean-Dubois, S. (2020). The Paris Agreement, EU Climate Law and the Energy Union. In *Research Handbook on EU Environmental Law*, (pp. 412–427). Cheltenham: Edward Elgar Publishing. <https://shs.hal.science/halshs-02920660>
- Brown, A., Beiter, P., Heimiller, D., Davidson, C., Denholm, P., Melius, J., Lopez, A., Hetteringer, D., Mulcahy, D., & Porro, G. (2016). *Estimating Renewable Energy Economic Potential in the United States. Methodology and Initial Results*: Vol. NREL/TP-6A. Golden, CO. <https://doi.org/10.2172/1215323>
- Bukovics, I., Besenyei, M., Földi, L., & Rakonczai, É. (2014). *Felelős gazdálkodás. A fenntarthatóság gazdálkodási vonatkozásai*. Budapest: Nemzeti Közszerzői Egyetem.
- Caradonna, J. L. (2022). *Sustainability: A history*. New York, NY: Oxford University Press.
- Cevik, S., & Ninomiya, K. (2022). Chasing the Sun and Catching the Wind: Energy Transition and Electricity Prices in Europe. *IMF Working Papers* (Vol. 2022, Issue 220). Bretton Woods, NH. <https://doi.org/10.5089/9798400224362.001>
- Cini, M., & Pérez-Solórzano Borrágán, N. (2019). *European Union politics (6th ed.)*. Oxford: Oxford University Press.
- Climate Watch. (2022). *Historical Emissions*. Data Explorer. <https://www.climatewatchdata.org/data-explorer/historical-emissions?historical-emissions-data-sources=climate-watch&historical-emissions-gases=all-ghg&historical-emissions-regions=AllSelected&historical-emissions-sectors=total-including-lucf%20total-incl>
- Cludius, J., Hermann, H., Matthes, F. C., & Graichen, V. (2014). The merit order effect of wind and photovoltaic electricity generation in Germany 2008–2016: Estimation and

- distributional implications. *Energy Economics*, 44, 302–313. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.04.020>
- Consilium European Council. (2022). *Versailles Declaration*. Informal meeting of heads of state or government, 10-11 March 2022, Versailles. <https://www.consilium.europa.eu/en/meetings/european-council/2022/03/10-11/>
- Council of the European Union. (é.n.). *Timeline of the EU response to the Ukraine invasion*. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/eu-response-ukraine-invasion/timeline-eu-response-ukraine-invasion/>
- Council of the European Union. (2021). *Council adopts European Climate Law*. <https://www.consilium.europa.eu/hu/press/press-releases/2021/06/28/council-adopts-european-climate-law/>
- Council of the European Union. (2023). *Fit for 55*. <https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/green-deal/fit-for-55/>
- Crespo Cuaresma, J., Hlouskova, J., Kossmeier, S., & Obersteiner, M. (2004). Forecasting electricity spot-prices using linear univariate time-series models. *Applied Energy*, 77(1), 87–106. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(03\)00096-5](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(03)00096-5)
- Creti, A. (2019). *Economics of Electricity: Markets, Competition and Rules*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Daly, H. E. (1996). *Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development*. Boston, MA: Beacon Press.
- Davis, N. N., Badger, J., Hahmann, A. N., Hansen, B. O., Mortensen, N. G., Kelly, M., Larsén, X. G., Olsen, B. T., Floors, R., Lizcano, G., Casso, P., Lacave, O., Bosch, A., Bauwens, I., Knight, O. J., Potter van Loon, A., Fox, R., Parvanyan, T., Krohn Hansen, S. B., ... Drummond, R. (2023). The Global Wind Atlas: A High-Resolution Dataset of Climatologies and Associated Web-Based Application. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 104(8), E1507–E1525. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0075.1>
- de Freitas Netto, S. V., Sobral, M. F. F., Ribeiro, A. R. B., & Soares, G. R. da L. (2020). Concepts and forms of greenwashing: a systematic review. *Environmental Sciences Europe*, 32(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s12302-020-0300-3>
- Delfi Lithuania. (2022). *Minister: electricity price is high because of algorithm used at Nord Pool power market*. <https://www.delfi.lt/en/business/minister-electricity-price-is-high-because-of-algorithm-used-at-nord-pool-power-market-91002617>
- Deutsch, N., Fiáth, A., Virág, M., & Berényi, L. (2018). Nuclear power - additions to wholesale electricity prices and margin of safety. *WSEAS Transactions on Business and Economics*, 15, 197–212.
- Dinya, L. (2010). Biomassza-alapú energiatermelés és fenntartható energiagazdálkodás. *Magyar Tudomány*, 171(8), 912–925. http://www.epa.hu/00600/00691/00080/pdf/mtud_2010_08_912-925.pdf
- Domán, C. (2005). *Többváltozós Korreláció - és Regressziószámítás*. Miskolc: Miskolci Egyetem, Gazdaságtudományi Kar, Üzleti Statisztika és Előrejelzési Tanszék.
- Domonkos, E. (2013). Geopolitikai irányzatok fejlődése a nemzetközi kapcsolatokban. *Politikatudományi Szemle*, 22(3), 151–159.

- EMBER Climate. (é.n.-a). *Electricity Data Explorer*. <https://ember-climate.org/data/data-tools/data-explorer/>
- EMBER Climate. (é.n.-b). *European wholesale electricity price data*. <https://ember-climate.org/data-catalogue/european-wholesale-electricity-price-data/>
- Emery, G. W., & Liu, Q. (Wilson). (2002). An analysis of the relationship between electricity and natural-gas futures prices. *Journal of Futures Markets*, 22(2), 95–122. <https://doi.org/10.1002/fut.2209>
- Energy Institute. (2023). *Statistical Review of World Energy 2023*. London: Energy Institute.
- Energy-Charts. (é.n.). *Average spot market prices*. https://energy-charts.info/charts/price_average/chart.htm?l=en&c=DE
- ENTSO-E. (2023). *European Network of Transmission System Operators for Electricity*. https://www.entsoe.eu/assets/graphics/maps/ENTSOE_map.png
- Erostyák, J., & Litz, J. (2003). *A fizika alapjai*. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó Rt.
- EUR-Lex. (é.n.). *Az EU jogszabályainak összefoglalása. Fenntartható fejlődés*. <https://eur-lex.europa.eu/HU/legal-content/glossary/sustainable-development.html>
- European Commission. (é.n.). *Sanctions on energy*. https://eu-solidarity-ukraine.ec.europa.eu/eu-sanctions-against-russia-following-invasion-ukraine/sanctions-energy_hu
- European Commission. (2016). *The EU Emissions Trading System (EU ETS)*. https://climate.ec.europa.eu/document/download/5dee0b48-a38f-4d10-bf1a-14d0c1d6febd_en?filename=factsheet_ets_en.pdf
- European Commission. (2021). *Quarterly report on European electricity markets: Q1 2021* (Vol. 14, Issue 1). Brussels: European Commission. https://energy.ec.europa.eu/system/files/202107/quarterly_report_on_european_electricity_markets_q1_2021_final_0.pdf
- European Commission. (2023). *Clean Energy Technology Observatory: Hydropower and Pumped Hydropower Storage in the European Union - 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets*. Luxembourg: European Commission. <https://doi.org/10.2760/841176>
- European Environment Agency. (2010). *COP15: Outcomes and the way forward*. Luxembourg: European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/highlights/cop15-outcomes-and-the-way-forward>
- European Environment Agency. (2023). *The European biomass puzzle Challenges, opportunities and trade-offs around biomass production and use in the EU*. Luxembourg: European Environment Agency. <https://doi.org/10.2800/834565>
- European Geothermal Energy Council. (2023). *EGEC Geothermal Market Report*. Brussels: European Geothermal Energy Council.
- European Network of Transmission System Operators for Electricity. (2023). *ENTSO-E Market Report 2023*. Brussels: ENTSO-E.
- European Parliament. (é.n.). *Environment policy: General principles and basic framework*. Strasbourg: European Parliament. <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/71/environment-policy-general-principles-and-basic-framework>

- Eurostat. (é.n.-a). *Energy balances. Supply, transformation and consumption of electricity - monthly data [nrg_cb_em]*. Luxembourg: Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_cb_em/default/table?lang=en
- Eurostat. (é.n.-b). *Energy prices for households and industry. Electricity production capacities by main fuel groups and operator [nrg_inf_epc]*. Luxembourg: Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_inf_epc_custom_10629878/default/table?lang=en
- Eurostat. (é.n.-c). *Energy production by energy source. Energy intensity [nrg_ind_ei]*. Luxembourg: Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_ind_ei/default/table?lang=en&category=nrg.nrg_quant.nrg_quanta.nrg_ind
- Eurostat. (é.n.-d). *Energy production by energy source. Gross production of electricity and derived heat from combustible fuels by type of plant and operator [nrg_ind_pehcf]*. Luxembourg: Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_ind_pehcf/default/table
- Eurostat. (é.n.-e). *Energy production by energy source. Gross production of electricity and derived heat from non-combustible fuels by type of plant and operator [nrg_ind_pehnf]*. Luxembourg: Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_ind_pehnf/default/table
- Eurostat. (é.n.-f). *Gross domestic product (GDP) and employment. Population change - Demographic balance and crude rates at national level [demo_gind]*. Luxembourg: Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DEMO_GIND_custom_3012667/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=b5150729-70b7-4d06-aaa1-c17e70f2e809
- Eurostat. (é.n.-g). *Gross domestic product (GDP) at current market prices. GDP and main aggregates- international data cooperation annual data [naida_10_gdp]*. Luxembourg: Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/naida_10_gdp_custom_10631199/default/table?lang=en
- Eurostat. (é.n.-h). *Natural gas consumption by end-use. Electricity prices for household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards) [nrg_pc_204]*. Luxembourg: Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_204_custom_10630588/default/table?lang=en
- Eurostat. (é.n.-i). *Natural gas consumption by end-use. Imports of natural gas by partner country [nrg_ti_gas]*. Luxembourg: Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_ti_gas_custom_10625623/default/table?lang=en
- Eurostat. (é.n.-j). *Natural gas imports by partner country. Energy imports dependency [nrg_ind_id]*. Luxembourg: Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_ind_id_custom_10629558/default/table?lang=en
- Eurostat. (2023a). *EU Energy Balances*. Luxembourg: Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy_balances/enbal.html?geo=EU27_2020&unit=KTOE&language=EN&year=2022&fuel=fuelMainFuel&siec=TOTAL&details=0&chartOptions=0&stacking=normal&chartBal=&chart=&full=0&chartBalText=&order=DESC&siecs=&dataset=n

- Eurostat. (2023b). *EU27 gas consumption down by 9% in 2022 compared to 2021*. Luxembourg: Eurostat. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20231222-1>
- Evans, A., Strezov, V., & Evans, T. J. (2009). Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 1082–1088. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.008>
- Faragó, T. (2002). *Világtalálkozó a fenntartható fejlődésről: A találkozó programja, résztvevői, dokumentumai és értékelése*. Budapest: Fenntartható Fejlődés Bizottság.
- Ferreira, Â. P., Ramos, J. G., & Fernandes, P. O. (2019). A linear regression pattern for electricity price forecasting in the Iberian electricity market. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 93, 117–127. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20190522>
- Filipiak, B. Z., & Wyszowska, D. (2022). Determinants of Reducing Greenhouse Gas Emissions in European Union Countries. *Energies*, 15(24), 9561. <https://doi.org/10.3390/en15249561>
- Fleischer, T. (2007). *Fenntartható Fejlődés: Környezeti, Társadalmi és Gazdasági Tényezők*. In Magyarország globális környezete 2020-ig. Háttér tanulmányok a magyar külstratégiához (pp. 192–202). Budapest: MTA Világgazdasági Kutatóintézet – CEU Center for EU Enlargement Studies.
- Florence School of Regulation. (2020). *The Clean Energy for all Europeans Package*. <https://fsr.eui.eu/the-clean-energy-for-all-europeans-package/>
- Fouquet, R., & Pearson, P. J. G. (2012). Past and prospective energy transitions: Insights from history. *Energy Policy*, 50, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.014>
- Friedlingstein, P., O’Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Lujckx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., ... Zheng, B. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, 15(12), 5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>
- Friedlingstein, P., O’Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Lujckx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., ... Zheng, B. (2022). Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11), 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
- Friedrich-Ebert-Stiftung. (2023). *Energy without Russia: How Europe Has Reacted to the Supply Crisis after the Attack on Ukraine*. Bonn: Friedrich-Ebert-Stiftung. <https://www.fes.de/politik-fuer-europa/>
- Gapminder. (2022). *Population*. <https://www.gapminder.org/data/documentation/gd003/>
- Gianfreda, A., Parisio, L., & Pelagatti, M. (2019). The RES-Induced Switching Effect Across Fossil Fuels: An Analysis of Day-Ahead and Balancing Prices. *The Energy Journal*, 40(1_suppl), 1–22. <https://doi.org/10.5547/01956574.40.1.agia>
- Gibbs, D. C., Longhurst, J., & Braithwaite, C. (1998). “Struggling with sustainability”: weak and strong interpretations of sustainable development within local authority policy. *Environment and Planning*, 30, 1351–1365.

- Gladwin, T. N., Kennelly, J. J., & Krause, T.-S. (1995). Shifting Paradigms for Sustainable Development: Implications for Management Theory and Research. *The Academy of Management Review*, 20(4), 874. <https://doi.org/10.2307/258959>
- Glassner, M. I., & de Blij, H. J. (1989). *Systematic Political Geography (4th ed.)*. New York, NY: Wiley.
- Global Energy Network Institute. (2017). *Renewable Energy Resources in Europe*. <http://www.geni.org/globalenergy/library/renewable-energy-resources/index.shtml>
- Global Wind Atlas. (n.d.). *Welcome to the Global Wind Atlas*. <https://globalwindatlas.info/en/>
- Global Wind Energy Council. (2023). *Global Offshore Wind Report 2023*. Brussels: Global Wind Energy Council.
- Goldemberg, J. (2012). *Energy. What everyone needs to know*. Oxford: Oxford University Press.
- Goswami, D. Y., & Kreith, F. (2017). *Energy Conversion (2nd ed.)*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Gunnarsdottir, I., Davidsdottir, B., Worrell, E., & Sigurgeirsdottir, S. (2021). Sustainable energy development: History of the concept and emerging themes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141(110770), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110770>
- Gyulai, I. (2012). *A fenntartható fejlődés*. Miskolc: Ökológiai Intézet a Fenntartható Fejlődésért Alapítvány.
- Haffner, T. (2019). *Az Unió és Magyar Energiapolitika Helyzete és Kihívásai*. Szeged: Egyesület Közép-Európa Kutatására.
- Hafner, M., & Luciani, G. (2022). *The Palgrave Handbook of International Energy Economics* (M. Hafner & G. Luciani, Eds.; 1st ed.). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-86884-0>
- Hagfors, L. I., Paraschiv, F., Molnar, P., & Westgaard, S. (2016). Using quantile regression to analyze the effect of renewables on EEX price formation. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 1, 1–32. <https://doi.org/10.1051/rees/2016036>
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., & Tatham, R. L. (2009). *Multivariate Data Analysis (7th ed.)*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- Halkos, G. E., & Tzirivis, A. S. (2023). Electricity Prices in the European Union Region: The Role of Renewable Energy Sources, Key Economic Factors and Market Liberalization. *Energies*, 16(6), 2540. <https://doi.org/10.3390/en16062540>
- Hall, C. A. S., Balogh, S., & Murphy, D. J. R. (2009). What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? *Energies*, 2(1), 25–47. <https://doi.org/10.3390/en20100025>
- Hall, C. A. S., Lambert, J. G., & Balogh, S. B. (2014). EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy*, 64, 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>
- Harrell, F. E. (2015). *Regression Modeling Strategies: With Applications to Linear Models, Logistic Regression, and Survival Analysis (2nd ed.)*. Cham: Springer International Publishing.

- Hediger, W. (2006). Weak and Strong Sustainability, Environmental Conservation and Economic Growth. *Natural Resource Modeling*, 19(3), 359–394. <https://doi.org/10.1111/j.1939-7445.2006.tb00185.x>
- Heij, C., Boer, P. de, Franses, P. H., Kloek, T., & Dijk, H. K. van. (2004). *Econometric Methods with Applications in Business and Economics*. Oxford: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199268016.001.0001>
- Herczeg, B., & Pintér, É. (2024). The Nexus between Wholesale Electricity Prices and the Share of Electricity Production from Renewables: An Analysis with and without the Impact of Time of Distress. *Energies*, 17(4), 857. <https://doi.org/10.3390/en17040857>
- Herczeg, B., Pintér, É., & Bagó, P. (2023). How green and digital transformation shapes industries. *Vezetéstudomány / Budapest Management Review*, 54(5), 51–63. <https://doi.org/10.14267/VEZTUD.2023.05.05>
- Higgs, H., & Worthington, A. C. (2008). Modelling Spot Prices in Deregulated Wholesale Electricity Markets: A Selected Empirical Review. *SSRN Electronic Journal*, 17(1–2), 1–25. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1290909>
- Hill, I. (2023). *Russia's invasion of Ukraine: Why and why now?* <https://www.lowyinstitute.org/the-interpreter/russia-s-invasion-ukraine-why-why-now>
- Hirth, L. (2018). What Caused the Drop in European Electricity Prices? A Factor Decomposition Analysis. *The Energy Journal*, 39(1), 143–158. <https://doi.org/10.5547/01956574.39.1.lhir>
- Horváth, J. (2001). *Az európai integráció története napról napra 1945-2000*. Budapest: Osiris Kiadó.
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting. Principles and Practice (2nd ed.)*. Melbourne: OTexts.
- Iberdrola. (é.n.). *What is clean energy?* <https://www.iberdrola.com/sustainability/clean-energy>
- InterAcademy Partnership. (2000). *Statement on Transition to Sustainability*. Trieste: InterAcademy Partnership.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Annex III: Technology-specific cost and performance parameters*. In *Climate change 2014: Mitigation of climate change: Working group III contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1367–1436). Cambridge: Cambridge University Press.
- International Atomic Energy Agency. (2000). *The Annual Report for 1999*. Vol. GC(44)/4. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency. (2002). *Indicators for sustainable energy development*. Vol. 02–01570. Vienna: International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/sites/default/files/indicators.pdf>
- International Atomic Energy Agency. (2005). *Energy Indicators for Sustainable Development: Guidelines and Methodologies*. Vienna: International Atomic Energy Agency. <http://www.iaea.org/Publications/index.html>
- International Atomic Energy Agency. (2007). *Energy Indicators for Sustainable Development: Country Studies on Brazil, Cuba, Lithuania Mexico, Russian Federation, Slovakia and Thailand*. Vienna: International Atomic Energy Agency.

- International Energy Agency. (é.n.-a). *About history*. Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/about/history>
- International Energy Agency. (é.n.-b). *Global Energy Crisis*. Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/topics/global-energy-crisis>
- International Energy Agency. (é.n.-c). *Monthly Electricity Statistics*. Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/monthly-electricity-statistics>
- International Energy Agency. (2004). *Energy Statistics Manual*. Paris: International Energy Agency.
- International Energy Agency. (2013). *Electricity Feed-In Law of 1991 (“Stromeinspeisungsgesetz”)*. Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/policies/3477-electricity-feed-in-law-of-1991-stromeinspeisungsgesetz>
- International Energy Agency. (2019). *Energy Transitions Indicators*. Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/articles/energy-transitions-indicators>
- International Energy Agency. (2020a). *European Union 2020 Energy Policy Review*. Paris: International Energy Agency. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/ec7cc7e5-f638-431b-ab6e-86f62aa5752b/European Union 2020 Energy Policy Review.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/ec7cc7e5-f638-431b-ab6e-86f62aa5752b/European%20Union%202020%20Energy%20Policy%20Review.pdf)
- International Energy Agency. (2020b). *Green stimulus after the 2008 crisis*. Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/articles/green-stimulus-after-the-2008-crisis>
- International Energy Agency. (2021a). *Hydropower Special Market Report*. Paris: International Energy Agency. https://iea.blob.core.windows.net/assets/4d2d4365-08c6-4171-9ea2-8549fabd1c8d/HydropowerSpecialMarketReport_corr.pdf
- International Energy Agency. (2021b). *What is behind soaring energy prices and what happens next?* Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/commentaries/what-is-behind-soaring-energy-prices-and-what-happens-next>
- International Energy Agency. (2022a). *Renewables 2022*. Paris: International Energy Agency. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ada7af90-e280-46c4-a577-df2e4fb44254/Renewables2022.pdf>
- International Energy Agency. (2022b). *World Energy Outlook 2022*. Paris: International Energy Agency.
- International Energy Agency. (2023). *Electricity Market Report 2023*. Paris: International Energy Agency. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/255e9cba-da84-4681-8c1f-458ca1a3d9ca/ElectricityMarketReport2023.pdf>
- International Energy Agency. (2024). *RePowerEU Plan: Joint European action on gas supply security*. Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/policies/15688-repowereu-plan-joint-european-action-on-gas-supply-security>
- International Energy Agency, International Renewable Energy Agency, United Nations Statistics Division, World Bank, & World Health Organization. (2023). *Tracking SDG7: The Energy Progress Report*. Washington, DC.
- International Renewable Energy Agency, & International Geothermal Association. (2023). *Global geothermal market and technology assessment*. Abu Dhabi, The Hague.
- Investing.com. (é.n.). *Commodities*. <https://www.investing.com/>

- Jeronen, E. (2013). *Sustainability and Sustainable Development*. In Encyclopedia of Corporate Social Responsibility (pp. 2370–2378). Berlin: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28036-8_662
- Jones, M. W., Peters, G. P., Gasser, T., Andrew, R. M., Schwingshackl, C., Gütschow, J., Houghton, R. A., Friedlingstein, P., Pongratz, J., & Le Quéré, C. (2023). National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850. *Scientific Data*, 10(1), 155. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02041-1>
- Juhász, Á., Láng, I., Nagy, Z., Dohi, I., Szépszó, G., Horányi, A., Blaskavics, G., & Mika, J. (2009). *Megújuló energiák*. Budapest: Sprinter Kiadó.
- Kaposi, Z. (2007). *Európai uniós alapismeretek*. Pécs: PTE Közgazdaságtudományi Kar.
- Karátson, D., & Száraz, M. G. (1997). *Pannon Enciklopédia - Magyarország földje*. Budapest: KERTEK 2000 Könyvkiadó. <https://www.arcanum.com/hu/online-kiadvanyok/pannon-pannon-enciklopedia-1/magyarország-foldje-1D58/>
- Kelly, M. J. (2016). Lessons from technology development for energy and sustainability. *MRS Energy & Sustainability*, 3(2), 1–13. <https://doi.org/10.1557/mre.2016.3>
- Kengyel, Á. (2016). *Az Európai Unió Közös Politikái*. Budapest: Akadémiai Kiadó.
- Kengyel, Á. (2020). *Európai uniós politikák*. Budapest: Akadémiai Kiadó. <https://doi.org/10.1556/9789634545422>
- Kerekes, S. (2007). *A környezetgazdaságtan alapjai*. Budapest: Aula Kiadó.
- Kerékgyártó, G., L. Balogh, I., Sugár, A., & Szarvas, B. (2009). *Statisztikai módszerek és alkalmazásuk a gazdasági és társadalmi elemzésekben*. Budapest: Aula Kiadó.
- Ketterer, J. C. (2014). The impact of wind power generation on the electricity price in Germany. *Energy Economics*, 44, 270–280. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.04.003>
- Khalfan, A., Nilsson Lewis, A., Aguilar, C., Persson, J., Lawson, M., Dabi, N., Jayoussi, S., & Acharya, S. (2023). *Climate Equality: A planet for the 99%*. Oxford. <https://doi.org/10.21201/2023.000001>
- Khan, K., Su, C.-W., & Zhu, M. N. (2022). Examining the behaviour of energy prices to COVID-19 uncertainty: A quantile on quantile approach. *Energy*, 239(122430), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122430>
- Knoll, I., & Lakatos, P. (2014). *Közszolgálat és Fenntarthatóság*. Budapest: Nemzeti Közszolgálati Egyetem.
- Kriechbaum, L., Scheiber, G., & Kienberger, T. (2018). Grid-based multi-energy systems: modelling, assessment, open source modelling frameworks and challenges. *Energy, Sustainability and Society*, 8(1), 35. <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0176-x>
- Kujbus, A., & Talamon, A. (2024). Preparing Geothermal Energy Profiles in the Pannonian Basin in Hungary. *49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 1–10.
- Lago, J., Marcjasz, G., De Schutter, B., & Weron, R. (2021). Forecasting day-ahead electricity prices: A review of state-of-the-art algorithms, best practices and an open-access benchmark. *Applied Energy*, 293(116983), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116983>

- Lawson, B. (n.d.). *Electricity Generating and Distribution Efficiency*. The Electropaedia. https://www.mpoweruk.com/energy_efficiency.htm
- Leal-Arcas, R., Grasso, C., & Alemany Ríos, J. (2016). *Energy Security, Trade and the EU*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing.
- Mádai, F. (2011). *Ásványvagyon gazdálkodás*. Miskolc: Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar.
- Magyar Villamos Művek. (é.n.). *Mire elég 1 kWh?* <https://www.mvmnext.hu/aram/pages/aloldal.jsp?id=819>
- Marin, C. (2021). *Gas pipelines and LNG carriers*. <https://mondediplo.com/maps/gas-pipelines>
- McMenamin, J. S., & Monforte, F. A. (2000). *Statistical Approaches to Electricity Price Forecasting*. In *Pricing in Competitive Electricity Markets* (pp. 249–263). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4529-3_15
- Mero CR. (é.n.). *The oil pipeline network in Europe*. <https://mero.cz/en/operation/the-oil-pipeline-network-in-europe/>
- Mező, F. (2006). A geopolitika formaváltozásai. *Politikatudományi Szemle*, 15(4), 75–107.
- Miller, C. A., Richter, J., & O’Leary, J. (2015). Socio-energy systems design: A policy framework for energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 6, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.11.004>
- Mjelde, J. W., & Bessler, D. A. (2009). Market integration among electricity markets and their major fuel source markets. *Energy Economics*, 31(3), 482–491. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2009.02.002>
- Mohammadi, H. (2009). Electricity prices and fuel costs: Long-run relations and short-run dynamics. *Energy Economics*, 31(3), 503–509. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2009.02.001>
- Molnár, S. (2021). *Energetikai alapismeretek*. Budapest: Magyar Mérnöki Kamara.
- Moreno, B., López, A. J., & García-Álvarez, M. T. (2012). The electricity prices in the European Union. The role of renewable energies and regulatory electric market reforms. *Energy*, 48(1), 307–313. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.059>
- Moutinho, V., Vieira, J., & Carrizo Moreira, A. (2011). The crucial relationship among energy commodity prices: Evidence from the Spanish electricity market. *Energy Policy*, 39(10), 5898–5908. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.043>
- Munasinghe, M. (2004). *Sustainable Development: Basic Concepts and Application to Energy*. In *Encyclopedia of Energy* (pp. 789–808). Boston, MA: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00441-1>
- Munkácsy, B. (2018). *Energiaföldrajz és energiatervezés*. Budapest: Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Földrajztudományi Központ.
- Nagy, L. J. (2005). *Az európai integráció politikai története (Harmadik kötet)*. Szeged: JATEPress.
- National Geographic. (2023). *Russia and Ukraine: The tangled history that connects and divides them*. <https://www.nationalgeographic.com/history/article/russia-and-ukraine-the-tangled-history-that-connects-and-divides-them>

- Neusser, K. (2016). *Time Series Econometrics*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32862-1>
- Nicholson, M. (2013). *Nuclear Has One of the Smallest Footprint*. <https://thebreakthrough.org/issues/energy/nuclear-has-one-of-the-smallest-footprints>
- Nicolosi, M., & Fürsch, M. (2009). The Impact of an increasing share of RES-E on the Conventional Power Market — The Example of Germany. *Zeitschrift Für Energiewirtschaft*, 33(3), 246–254. <https://doi.org/10.1007/s12398-009-0030-0>
- Nord Pool AS. (2022). *Summary of Max Price situation in Estonia, Latvia & Lithuania for delivery date 17th August*. <https://www.nordpoolgroup.com/en/message-center-container/newsroom/exchange-message-list/2022/q3/summary-of-max-price-situation-in-estonia-latvia--lithuania-for-delivery-date--17th-august/>
- Norouzi, N. (2020). *Energy Analysis Framework: An introduction to the Energy systems*. Beau Bassin-Rose Hill: LAP LAMBERT Academic Publishing. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21376.58888>
- Nuclear Energy Agency, & International Atomic Energy Agency. (2023). *Uranium 2022: Resources, Production and Demand*. https://read.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/uranium-2022_2c4e111b-en#page1
- Nyga-Łukaszewska, H., & Aruga, K. (2020). Energy Prices and COVID-Immunity: The Case of Crude Oil and Natural Gas Prices in the US and Japan. *Energies*, 13(23), 6300. <https://doi.org/10.3390/en13236300>
- Oliveira, T. (2023). *Understanding the recent surge of zero and negative prices in Europe*. Synertics. <https://www.synertics.io/blog/56/understanding-the-recent-surge-of-zero-and-negative-prices-in-europe>
- Országos Fenntartható Fejlődés Hivatal. (2014). *UNESCO: Oktatás a fenntartható fejlődés szolgálatában*. Budapest: Oktatókutató és Fejlesztő Intézet.
- Paraschiv, F., Erni, D., & Pietsch, R. (2014). The impact of renewable energies on EEX day-ahead electricity prices. *Energy Policy*, 73, 196–210. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.05.004>
- Parris, T. M., & Kates, R. W. (2003). Characterizing and Measuring Sustainable Development. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 559–586. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105551>
- Pátzay, G. (2011). *Atomenergetika és nukleáris technológia*. Budapest: Typotex Kiadó.
- Pintér, J., & Rappai, G. (eds). (2007). *Statisztika (Statistics)*. Pécs: PTE Közgazdaságtudományi Kar.
- Poggi, A., Di Persio, L., & Ehrhardt, M. (2023). Electricity Price Forecasting via Statistical and Deep Learning Approaches: The German Case. *AppliedMath*, 3(2), 316–342. <https://doi.org/10.3390/appliedmath3020018>
- Prandecki, K. (2014). Theoretical Aspects of Sustainable Energy. *Energy and Environmental Engineering*, 2(4), 83–90. <https://doi.org/10.13189/eee.2014.020401>
- Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2019). Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustainability Science*, 14(3), 681–695. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0627-5>

- Rathmann, M. (2007). Do support systems for RES-E reduce EU-ETS-driven electricity prices? *Energy Policy*, 35(1), 342–349. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.11.029>
- Raviv, E., Bouwman, K. E., & van Dijk, D. (2015). Forecasting day-ahead electricity prices: Utilizing hourly prices. *Energy Economics*, 50, 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.05.014>
- Ray, G. F. (1976). *Impact of the Oil Crisis on the Energy Situation in Western Europe*. In *The Economics of the Oil Crisis* (pp. 94–130). London: Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1007/978-1-349-02810-8_6
- Refinitiv Eikon. (é.n.). *Eikon Energy Commodities*. <https://www.lseg.com/en/data-analytics>
- Ripudaman, M. (2013). *Fossil Energy: Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (R. Malhotra, Ed.). New York, NY: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5722-0>
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2023). *Energy. Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/energy>
- Sáenz de Miera, G., del Río González, P., & Vizcaíno, I. (2008). Analysing the impact of renewable electricity support schemes on power prices: The case of wind electricity in Spain. *Energy Policy*, 36(9), 3345–3359. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.04.022>
- Saini, D., Saxena, A., & Bansal, R. C. (2016). Electricity price forecasting by linear regression and SVM. *2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICRAIE.2016.7939509>
- Sarpong, S. (2021). *Geopolitics of Natural Resources*. In D. Crowther & S. Seifi (Eds.), *The Palgrave Handbook of Corporate Social Responsibility* (pp. 1–21). Cham: Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22438-7_15-1
- Sashalmi, Á. (2021). A geopolitikai elemzés a nemzetközi hatalmi viszonyok vizsgálatának szolgálatában. *Külügyi Szemle*, 20(3), 282–290. https://doi.org/10.47707/Kulugyi_Szemle.2021.3.10
- Sensfuß, F., Ragwitz, M., & Genoese, M. (2008). The merit-order effect: A detailed analysis of the price effect of renewable electricity generation on spot market prices in Germany. *Energy Policy*, 36(8), 3086–3094. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.03.035>
- Sloan, G. (2017). *Geopolitics, geography and strategic history. Geopolitical Theory*. Abingdon: Routledge.
- Smil, V. (2016). *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Smil, V. (2017a). *Energy: A Beginner's Guide (2nd ed.)*. Oxford: Oneworld Publications.
- Smil, V. (2017b). *Energy Transitions: Global and National Perspectives (2nd ed.)*. Westport: Praeger.
- Smil, V. (2018). *Energy and Civilization*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Solargis. (2021). *Solar resource maps & GIS data*. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/europe>
- SolarPower Europe. (2023). *EU Market Outlook for Solar Power 2023-2027*. https://api.solarpowereurope.org/uploads/Solar_Power_Europe_EU_Market_Outlook_2023_v03_deca570a83.pdf

- Sorokin, L., Balashova, S., Gomonov, K., & Belyaeva, K. (2023). Exploring the Relationship between Crude Oil Prices and Renewable Energy Production: Evidence from the USA. *Energies*, 16(11), 4306. <https://doi.org/10.3390/en16114306>
- Sovacool, B. K. (2016). How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 13, 202–215. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.020>
- Sustainable Energy for All. (é.n.). *Our work*. <https://www.seforall.org/our-work>
- Swain, R. B. (2018). *A Critical Analysis of the Sustainable Development Goals*. In World Sustainability Series (pp. 341–355). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63007-6_20/COVER
- Szilágyi, I. (2018). *Geopolitika (Második, bővített kiadás)*. Budapest: Pallas Athéné Könyvkiadó.
- Szlávik, J. (2013). *Fenntartható gazdálkodás*. Budapest: Wolters Kluwer Hungary.
- Tester, J. W. (2012). *Sustainable energy: Choosing among options (2nd ed.)*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Tietenberg, T. H., & Lewis, L. (2012). *Environmental & Natural Resource Economics (9th ed.)*. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Education.
- Timmons, D., Harris, J. M., & Roach, B. (2014). *The Economics of Renewable Energy*. Medford: Global Development And Environment Institute, Tufts University. <http://ase.tufts.edu/gdae>
- Tol, R. (2023). Navigating the Energy Trilemma during Geopolitical and Environmental Crises (1372; *ADB Working Paper*). Tokyo. <https://doi.org/10.56506/EBHD4081>
- Tóthné Szalontai, A., Csík, Z., & Ádám, P. (2018). *Fizika 11*. Eger: Eszterházy Károly Egyetem, Oktatókutató és Fejlesztő Intézet.
- Ulgen, T., & Poyrazoglu, G. (2020). Predictor Analysis for Electricity Price Forecasting by Multiple Linear Regression. *2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 618–622. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM48782.2020.9161866>
- United Nations. (1992). *Agenda 21: Programme of action for sustainable development*. Rio de Janeiro. <http://www.un.org/esa/sustdev/agenda21.html>
- United Nations. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development* (Issue A/RES/70/1).
- United Nations. (2018). *Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development* (Issue A/RES/71/313). New York, NY.
- United Nations. (2019). *SDG Summit 2019*. <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgsummit>
- United Nations. (2022). *World Population Prospects 2022*. <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>
- United Nations. (2023a). *SDG Summit 2023*. <https://www.un.org/en/conferences/SDGSummit2023>
- United Nations. (2023b). *The Sustainable Development Goals report 2023: Special edition*. New York, NY. <https://doi.org/https://doi.org/10.25546/102924>

- United Nations Development Programme. (2000). *World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability*. New York, NY: United Nations.
- United Nations Educational Scientific and Cultural Organization. (2012). *Education for sustainable development: sourcebook*. In *Education for sustainable development in action: learning & training tools*, 4 [21]. Paris: United Nations Educational Scientific and Cultural Organization.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (é.n.-a). *The Paris Agreement*. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (é.n.-b). *What is the Kyoto Protocol?* https://unfccc.int/kyoto_protocol
- Uribe, J. M., Mosquera-López, S., & Arenas, O. J. (2022). Assessing the relationship between electricity and natural gas prices in European markets in times of distress. *Energy Policy*, 166(113018), 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113018>
- U.S. Energy Information Administration. (é.n.-a). *Electric Power Monthly*. Washington, D.C: U.S. Energy Information Administration. https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_6_07_a
- U.S. Energy Information Administration. (é.n.-b). *International Energy Data*. Washington, D.C: U.S. Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/international/data/world>
- Vajda, G. (2001). *Energiapolitika*. Budapest: Magyar Tudományos Akadémia.
- Vajda, G. (2004). *Energiellátás ma és holnap*. Budapest: MTA Társadalomkutató Központ.
- Vajda, G. (2009). *Energia és társadalom*. Budapest: MTA Társadalomkutató Központ.
- Vidakis, I., Baltos, G., & Balodis, J. (2017). Geopolitics of energy versus geoenergy of politics. *Social Sciences Bulletin*, 2(25), 38–55.
- Wallner, A., & Stein, P. (2012). *Uranium Mining in and for Europe*. <https://wua-wien.at/images/stories/publikationen/uranium-mining.pdf>
- Washington, H. (2015). *Demystifying Sustainability. Towards Real Solutions*. London: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315748641>
- Weise, Z., & Mathiesen, K. (2022). *Under bombing, Ukraine's climate scientists withdraw from global meeting*. <https://www.politico.eu/article/bomb-ukraine-climate-scientists-withdraw-global-ipcc-meeting/>
- Weißbach, D., Ruprecht, G., Huke, A., Czernski, K., Gottlieb, S., & Hussein, A. (2013). Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants. *Energy*, 52, 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.029>
- Weron, R. (2014). Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future. *International Journal of Forecasting*, 30(4), 1030–1081. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2014.08.008>
- Weron, R., & Misiorek, A. (2008). Forecasting spot electricity prices: A comparison of parametric and semiparametric time series models. *International Journal of Forecasting*, 24(4), 744–763. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2008.08.004>

- Weron, Rafał. (2006). *Modeling and forecasting electricity loads and prices: a statistical approach*. Chichester: John Wiley & Sons.
- WindEurope. (2024). *Wind energy in Europe. 2023 Statistics and the outlook for 2024-2030*. Brussels: WindEurope.
- Woo, C. K., Horowitz, I., Moore, J., & Pacheco, A. (2011). The impact of wind generation on the electricity spot-market price level and variance: The Texas experience. *Energy Policy*, 39(7), 3939–3944. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.084>
- World Bank. (2023). *World Development Indicators*. <https://datacatalog.worldbank.org/search/dataset/0037712/World-Development-Indicators>
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford: Oxford University Press.
- World Energy Council. (é.n.-a). *Energy Trilemma Index Tool*. London: World Energy Council. <https://trilemma.worldenergy.org/#!/energy-index>
- World Energy Council. (é.n.-b). *Our History*. London: World Energy Council. <https://www.worldenergy.org/centenary/our-history>
- World Energy Council. (2008). *Assessment of Energy Policy and Practices*. London: World Energy Council. https://www.worldenergy.ch/file/Publikationen/Aktuell/Assessment_Energy_Policy_Practices.pdf
- World Energy Council. (2009). *World Energy and Climate Policy: 2009 Assessment*. London: World Energy Council. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/PUB_wec_2009_assessment_of_energy_and_climate_policies_2009_WEC.pdf
- World Energy Council. (2010). *Pursuing Sustainability: 2010 Assessment of Country Energy and Climate Policies*. London: World Energy Council. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/PUB_wec_2010_assessment_of_energy_and_climate_policies_2010_WEC.pdf
- World Energy Council. (2011). *Policies for the future. 2011 Assessment of country energy and climate policies*. London: World Energy Council. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/PUB_wec_2011_assessment_of_energy_and_climate_policies_2011_WEC.pdf
- World Energy Council. (2013). *World Energy Trilemma. 2013 Energy Sustainability Index*. London: World Energy Council. <https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/09/2013-Time-to-get-real-the-case-for-sustainable-energy-investment.pdf>
- World Energy Council. (2014). *2014 Energy Trilemma Index. Benchmarking the sustainability of national energy systems*. London: World Energy Council. <https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2014/11/20141105-Index-report.pdf>
- World Energy Council. (2016). *World Energy Trilemma Index 2016. Benchmarking the Sustainability of National Energy System*. London: World Energy Council. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Full-report_Energy-Trilemma-Index-2016.pdf

- World Energy Council. (2022). *World Energy Trilemma Index 2022*. London: World Energy Council. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World_Energy_Trilemma_Index_2022.pdf?v=1669839605
- World Health Organization. (é.n.). *WHO COVID-19 dashboard*. Geneva: World Health Organization. <https://data.who.int/dashboards/covid19/cases?n=c>
- World Meteorological Organization. (2024). *State of the Global Climate 2023*. Geneva: World Meteorological Organization. <https://library.wmo.int/idurl/4/68835>
- World Nuclear Association. (2021). *Cosmic Origins of Uranium*. London: World Nuclear Association. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/the-cosmic-origins-of-uranium.aspx>
- World Nuclear Association. (2024). *Nuclear Power in the European Union*. London: World Nuclear Association. <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/european-union.aspx>
- Worldometer. (é.n.). *World Population: Past, Present, and Future*. <https://www.worldometers.info/world-population/>
- Yergin, D. (2011). *The Quest: Energy, Security, and the Remaking of the Modern World*. New York, NY: Penguin Press.
- Yergin, D. (2020). *The New Map: Energy, Climate, and the Clash of Nations*. New York, NY: Penguin Press.
- Zachmann, G., Hirth, L., Heussaff, C., Schlecht, I., Mühlenpfordt, J., & Eicke, A. (2023). *The design of the European electricity market. Current proposals and ways ahead*. Luxembourg: European Parliament. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2023/740094/IPOL_STU\(2023\)740094_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2023/740094/IPOL_STU(2023)740094_EN.pdf)
- Zakeri, B., Staffell, I., Dodds, P. E., Grubb, M., Ekins, P., Jääskeläinen, J., Cross, S., Helin, K., & Castagneto Gisse, G. (2023). The role of natural gas in setting electricity prices in Europe. *Energy Reports*, 10, 2778–2792. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.069>
- Zakeri, B., Staffell, I., Dodds, P., Grubb, M., Ekins, P., Jääskeläinen, J., Cross, S., Helin, K., & Castagneto-Gisse, G. (2022). Energy Transitions in Europe – Role of Natural Gas in Electricity Prices. In *SSRN Electronic Journal* (Navigating the Energy-Climate Crises). London. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4170906>
- Zareipour, H. (2012). Short-Term Electricity Market Prices: A Review of Characteristics and Forecasting Methods. In A. Sorokin, S. Rebennack, P. M. Pardalos, N. A. Iliadis, & M. V. F. Pereira (Eds.), *Handbook of Networks in Power Systems I. Energy Systems* (pp. 89–121). Berlin: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23193-3_4
- Zhong, H., Tan, Z., He, Y., Xie, L., & Kang, C. (2020). Implications of COVID-19 for the electricity industry: A comprehensive review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 6(3), 489–495. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.02500>
- Zhou, S., Gan, W., Liu, A., Jiang, X., Shen, C., Wang, Y., Yang, L., & Lin, Z. (2023). Natural Gas–Electricity Price Linkage Analysis Method Based on Benefit–Cost and Attention–VECM Model. *Energies*, 16(10), 4155. <https://doi.org/10.3390/en16104155>
- Ziel, F., & Weron, R. (2018). Day-ahead electricity price forecasting with high-dimensional structures: Univariate vs. multivariate modeling frameworks. *Energy Economics*, 70, 396–420. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.12.016>

Zlinszky, J., & Balogh, D. (2016). *Világunk átalakítása. A fenntartható fejlődés 2030-ig megvalósítandó programja*. Budapest: Pázmány Press.

Felhasznált jogszabályok és rendeletek jegyzéke:

- COM(68) 1040 final. *First guidelines for a Community energy policy. Memorandum presented by the Commission to the Council. COM (68) 1040 final, 18 December 1968. Bulletin of the European Communities, Supplement to No. 12/1968.* European Communities. <http://aei.pitt.edu/5134/1/5134.pdf>
- COM(96) 576 final. *Energy for the Future: Renewable Sources of Energy. Green Paper for a Community Strategy.* European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=celex%3A51996DC0576>
- COM(97) 599 final. *Energy for the Future: Renewable Sources of Energy. White Paper for a Community Strategy and Action Plan.* European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:51997DC0599>
- COM(2000) 769 final. *Green Paper. Towards a European strategy for the security of energy supply.* European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/green-paper-on-the-security-of-energy-supply.html>
- COM(2006) 105 final. *Green Paper. A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy.* European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/green-paper-a-european-strategy-for-sustainable-competitive-and-secure-energy.html>
- COM(2006) 848 final. *Renewable Energy Road Map. Renewable energies in the 21st century: building a more sustainable future.* European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52006DC0848>
- COM(2007) 1 final. *An Energy Policy for Europe.* European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX%3A32007R0001>
- COM(2008) 30 final. *20 20 by 2020 - Europe's climate change opportunity.* European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52008DC0030>
- COM(2010) 639 final. *Energy 2020. A strategy for competitive, sustainable and secure energy.* European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52010DC0639>
- COM(2010) 2020 final. *Europe 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth.* European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/HU/legal-content/summary/europe-2020-the-european-union-strategy-for-growth-and-employment.html>
- COM(2015) 80 final. *Energy Union Package. A Framework Strategy for a Resilient Energy Union with a Forward-Looking Climate Change Policy.* European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2015%3A80%3AFIN>
- COM(2019) 640 final. *The European Green Deal.* European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>

- COM(2020) 562 final. *Stepping up Europe's 2030 climate ambition. Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people.* European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0562>
- COM(2022) 230 final. *REPowerEU Plan.* European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN>
- Decision No. 1254/96/EC. *Decision No. 1254/96/EC of the European Parliament and of the Council of 5 June 1996 laying down a series of guidelines for trans-European energy networks.* L161, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dec/1996/1254/oj>
- Directive 96/92/EC. *Directive 96/92/EC of the European Parliament and of the Council of 19 December 1996 concerning common rules for the internal market in electricity.* L27, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/1996/92/oj>
- Directive 98/30/EC. *Directive 98/30/EC of the European Parliament and of the Council of 22 June 1998 concerning common rules for the internal market in natural gas.* L204, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/1998/30/oj>
- Directive 2001/77/EC. *Directive 2001/77/EC of the European Parliament and of the Council of 27 September 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market.* L283, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2001/77/oj>
- Directive 2002/91/EC. *Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings.* L1, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2002/91/oj>
- Directive 2003/30/EC. *Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the Council of 8 May 2003 on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport.* L123, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2003/30/oj>
- Directive 2003/54/EC. *Directive 2003/54/EC of the European Parliament and of the Council of 26 June 2003 concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 96/92/EC - Statements made with regard to decommissioning and waste management activities.* L176, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2003/54/oj>
- Directive 2003/55/EC. *Directive 2003/55/EC of the European Parliament and of the Council of 26 June 2003 concerning common rules for the internal market in natural gas and repealing Directive 98/30/EC.* L176, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2003/55/oj>
- Directive 2003/87/EC. *Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC.* L275, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2003/87/oj>
- Directive 2009/28/EC. *Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and*

- amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.* L140, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/28/oj>
- Directive 2009/72/EC. *Directive 2009/72/EC of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 2003/54/EC.* L211, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/72/oj>
- Directive 2009/73/EC. *Directive 2009/73/EC of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in natural gas and repealing Directive 2003/55/EC.* L211, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/73/oj>
- Directive 2018/844. *Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency.* L156, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj>
- Directive 2018/2002. *Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency.* L328, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2002/oj>
- Directive 2018/2011. *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources.* L328, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>
- Directive 2019/944. *Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU.* L158, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj>
- Directive 2023/2413. *Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652.* L36, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>
- Directive 2023/1791. *Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955.* L231, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj>
- Document C:1997:340. *Treaty of Amsterdam amending the Treaty on European Union, the Treaties establishing the European Communities and certain related acts.* C340, European Union. <http://data.europa.eu/eli/treaty/ams/sign>
- Document L:1987:169. *Single European Act.* L169, European Communities. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AL%3A1987%3A169%3ATOC>
- EUCO 169/14. *2030 Climate and Energy Policy Framework.* European Council. <https://www.consilium.europa.eu/media/24561/145397.pdf>

- Regulation 2018/1999. *Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the Governance of the Energy Union and Climate Action, amending Regulations (EC) No 663/2009 and (EC) No 715/2009 of the European Parliament and of the Council, Directives 94/22/EC, 98/70/EC, 2009/31/EC, 2009/73/EC, 2010/31/EU, 2012/27/EU and 2013/30/EU of the European Parliament and of the Council, Council Directives 2009/119/EC and (EU) 2015/652 and repealing Regulation (EU) No 525/2013 of the European Parliament and of the Council.* L328, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/1999/oj>
- Regulation 2019/941. *Regulation (EU) 2019/941 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on risk-preparedness in the electricity sector and repealing Directive 2005/89/EC.* L158, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/941/oj>
- Regulation 2019/942. *Regulation (EU) 2019/942 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 establishing a European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators.* L158, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/942/oj>
- Regulation 2019/943. *Regulation (EU) 2019/943 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the internal market for electricity.* L158, European Parliament, Council of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/943/oj>

Ábrák jegyzéke

1. ábra A kutatásom gondolatmenete és a dolgozat felépítése	7
2. ábra Az energetika rendszerszemlélete.....	10
3. ábra Az energiarendszerünk alapvető működése.....	16
4. ábra Az energiaellátási rendszer elméleti alkotóelemei	17
5. ábra A természeti erőforrások fenntarthatóság szerinti megbontása	18
6. ábra A fosszilis energiahordozók elsődleges és másodlagos fajtái	21
7. ábra Néhány tüzelőanyag fajlagos energiasűrűsége	24
8. ábra A bioenergiahordozók formái és forrásaik	28
9. ábra Különböző energiaforrások és -hordozók szerinti EROI-értékek energiatárolással vagy anélkül	34
10. ábra A világ primer energiafelhasználása* 1980 és 2022 között	38
11. ábra A teljes villamosenergia-termelés aránya a primerenergia-fogyasztásban 1985 és 2022 között.....	39
12. ábra Természeti erőforrások, mint geostratégiai tényezők	42
13. ábra Geoenergia a hatalom és fölény koncepciójának háromszögében	43
14. ábra Az ásványvagyon klasszifikációja	45
15. ábra Széntartalékok a világban (2020. év végi állapot szerint)	47
16. ábra Kőolajtartalékok a világban (2020. év végi állapot szerint)	48
17. ábra Földgáztartalékok a világban (2020. év végi állapot szerint)	49
18. ábra Urántartalékok* a világban (2021. év végi állapot szerint).....	51
19. ábra Horizontális besugárzáson alapuló napenergia potenciál Európában.....	53
20. ábra A szélenergia potenciál Európában	54
21. ábra Elméleti vízenergia potenciál Európában	56
22. ábra Geotermikus potenciál Európában.....	57
23. ábra Különböző közüzemi méretű generátorok átlagos kapacitásfaktorai az áramtermelésben.....	58
24. ábra Az EU-27 energiamérlege 2022-ben	60
25. ábra A villamosenergia-hálózat rendszere.....	61
26. ábra Európa legnagyobb villamosenergia-forrása országonként 2022-ben.....	63
27. ábra A merit-order mechanizmusát szemléltető mintapélda	68
28. ábra Az üvegházhatás vázlatos folyamata	71

29. <i>ábra</i> A Föld átlaghőmérsékletének alakulása 1850 és 2023 között különböző kutatócsoportok becslései alapján	72
30. <i>ábra</i> A globális CO ₂ -kibocsátás* részaránya egyes országok szerint 1850 és 2022 között	73
31. <i>ábra</i> A főbb szektorok szerinti globális CO ₂ -kibocsátás	75
32. <i>ábra</i> A CO ₂ -kibocsátás tüzelőanyag vagy iparági típus szerint	76
33. <i>ábra</i> A kutatás célkitűzései, kutatási kérdései és hipotézisei közötti összefüggések.....	81
34. <i>ábra</i> Az előrejelzési modellekhez kapcsolódó időhorizont koncepció a pontos időszakok megjelölésével	92
35. <i>ábra</i> A fenntartható fejlődés Brundtland-jelentés szerinti megközelítése	104
36. <i>ábra</i> A fenntarthatóság pilléreinek gyenge és erős fenntarthatóság szerinti ábrázolása..	106
37. <i>ábra</i> Az ENSZ által kitűzött 17 Fenntartható Fejlődési Cél	108
38. <i>ábra</i> A világ országainak 2023. júniusi összesített SDG indexpontjai	110
39. <i>ábra</i> A fenntarthatóság dimenzióinak beágyazottsága.....	113
40. <i>ábra</i> Az energia potenciálok típusai.....	116
41. <i>ábra</i> Az elsődleges megújuló, fenntartható és tiszta energiák közötti átfedések energiatermelés szempontjából	117
42. <i>ábra</i> Az IAEA illusztrációja az energiarendszer fenntarthatósági dimenziói közötti összefüggésekről	119
43. <i>ábra</i> Az SDG-7 teljesítése felé tett globális szintű előrehaladás helyzete.....	121
44. <i>ábra</i> A WEC 2011-es jelentése szerinti energia fenntarthatósági trilemma	123
45. <i>ábra</i> A fenntartható energiagazdálkodás három dimenziójának kapcsolódási pontjai az energiatrilemma vetületeivel	129
46. <i>ábra</i> A harmadik energiaátmenet gazdasági-társadalmi-környezeti hatása.....	132
47. <i>ábra</i> A fenntarthatóság általános és energetikai megközelítése.....	136
48. <i>ábra</i> A szén-dioxid kvóta árának alakulása az egyes fázisok függvényében	147
49. <i>ábra</i> Az EU energiatrilemmájának megítélésében résztvevő főbb külső és belső tényezők (1951-2021).....	156
50. <i>ábra</i> Havi villamosenergia-fogyasztás az EU-ban.....	158
51. <i>ábra</i> Havi átlagos tőzsdei villamos energia, kőolaj, földgáz és kőszén árak (2011. január – 2023. szeptember)	159
52. <i>ábra</i> Az EU tagállamok Oroszországból származó gázimport aránya a teljes importmennyiség %-os arányában, 2021-ben*	163

53. <i>ábra</i> Éves bruttó villamosenergia-termelés (TWh) és megoszlása energiaforrásonként (%) az EU-ban	169
54. <i>ábra</i> Megújuló energiákból származó bruttó villamosenergia termelés (TWh) és energiaforrások szerinti megoszlása (%).....	171
55. <i>ábra</i> Nettó maximális villamosenergia-kapacitás az EU-ban	172
56. <i>ábra</i> A bruttó villamosenergia-termelésben résztvevő fosszilis tüzelőanyagok főbb típusok szerinti megoszlása (%).....	173
57. <i>ábra</i> Energiafüggőség aránya 1990-2022 között	176
58. <i>ábra</i> Lakossági átlagos villamosenergia-árak* az EU-ban 2023 első felében.....	177
59. <i>ábra</i> Az EU energiaintenzitásának és GDP-jének* alakulása 2000-2022 között	178
60. <i>ábra</i> Az EU CO ₂ -kibocsátása a fosszilis tüzelőanyagok tekintetében.....	179
61. <i>ábra</i> Havi átlagos nagykereskedelmi villamosenergia-árak és a megújuló energiaforrások (%) alakulása az EU-25-ben (2015. január - 2020. december)	187
62. <i>ábra</i> Havi átlagos nagykereskedelmi villamosenergia-árak és a megújuló energiaforrások (%) alakulása az EU-25-ben (2015. január - 2023. augusztus).....	193
63. <i>ábra</i> A parciális korrelációs együtthatók erősségeinek összehasonlítása abszolút értékben a multiválság felfutása előtti (a) és a teljes vizsgált időszak (b) között.....	198
64. <i>ábra</i> Havi átlagos energiahordozó és EUA kvótaárak a) 2015. január - 2020. december és b) 2021. január - 2023. augusztus között	203
65. <i>ábra</i> Havi bruttó villamosenergia-termelés forrás típusa szerint az EU-ban (2015. január - 2023. augusztus).....	204
66. <i>ábra</i> A legjobban illeszkedő modellek pontosságának szemléltetése a) az energiaválság előtti időszakra és b) az energiaválság alatti időszakokra vonatkozóan	214

Táblázatok jegyzéke

1. táblázat	Az energiaformák alapvető klasszifikációja.....	13
2. táblázat	A fosszilis energiahordozók használatában rejlő előnyök és hátrányok	25
3. táblázat	A megújuló energiaforrások és -hordozók használatában rejlő előnyök és hátrányok	30
4. táblázat	Elsődleges energiaforrások és -hordozók átlagos teljesítménysűrűségei (a teljes térbeli viszonyok függvényében)	32
5. táblázat	Elsődleges energiaforrások és -hordozók fajlagos területigényei	33
6. táblázat	A nukleáris fűtőelemek használatában rejlő előnyök és hátrányok	37
7. táblázat	A villamosenergia-termelés hatékonysága különböző technológiák használata mellett.....	62
8. táblázat	Egyes országokénti (régiókénti) fosszilis tüzelőanyag fogyasztás (TWh).....	74
9. táblázat	Az empirikus vizsgálatokban használt változók köre	90
10. táblázat	A fenntartható fejlődés taxonómiája	111
11. táblázat	A 7. fenntartható fejlődési célkitűzés (SDG-7) tartalma és indikátorai	120
12. táblázat	A 2022-es WETI szerinti fő indikátorkészlet.....	125
13. táblázat	A 2022-es WETI szerinti TOP10 ország.....	126
14. táblázat	Az empirikus kutatásban résztvevő magyarázóváltozók becsült asszociációja az eredményváltozóval	182
15. táblázat	Pearson-féle korrelációs együtthatók értékei (2015. február – 2020. december)	188
16. táblázat	Parciális korrelációs együtthatók értékei (2015. február – 2020. december)....	189
17. táblázat	A CO ₂ -eljárás által korrigált regressziós modell összesítő táblája (2015. február - 2020. december).....	190
18. táblázat	Pearson-féle korrelációs együtthatók értékei (2015. február - 2023. augusztus)195	
19. táblázat	Parciális korrelációs együtthatók értékei (2015. február - 2023. augusztus)	195
20. táblázat	A CO ₂ -eljárás által korrigált regressziós modell összesítő táblája (2015. február - 2023. augusztus).....	196
21. táblázat	A nagykereskedelmi villamosenergia-árak statisztikai jellemzői különböző időhorizontok mellett	206
22. táblázat	A legjobban illeszkedő ES modellek modellstatisztikái	207
23. táblázat	A legjobban illeszkedő ARIMA modellek modellstatisztikái.....	208

24. táblázat	A legjobban illeszkedő ARIMAX modellek modellstatisztikái.....	210
25. táblázat	A CO-eljárás által korrigált legjobban illeszkedő regressziós modellek modellstatisztikái.....	211
26. táblázat	Az ES, ARIMA, ARIMAX és MLR összehasonlítása az előrejelzési teljesítményben.....	212

Rövidítések jegyzéke

Rövidítés	Teljes név (angol megnevezés)
ACER	Energiaszabályozók Európai Unió Együttműködési Ügynöksége (<i>European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators</i>)
COP	Részes Felek Konferenciája (<i>Conference of the Parties</i>)
CSD	ENSZ Fenntartható Fejlődés Bizottsága (<i>UN Commission on Sustainable Development</i>)
EC / EB	Európai Bizottság (<i>European Commission</i>)
ECSC / ESZAK	Európai Szén- és Acélközösség (<i>European Coal and Steel Community</i>)
EEA	Európai Környezetvédelmi Ügynökség (<i>European Environment Agency</i>)
EEC / EGK	Európai Gazdasági Közösség (<i>European Economic Community</i>)
EEX	Európai Energia Tőzsde (<i>European Energy Exchange</i>)
EIA	Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériumának Energiaügyi Információs Hivatala (<i>U.S. Energy Information Administration</i>)
ENTSO-E	Villamosenergia-piaci Átvitelirendszer-üzemeltetők Európai Hálózata (<i>European Network of Transmission System Operators for Electricity</i>)
EU ETS	Európai Unió kibocsátáskereskedelmi rendszer (<i>EU Emission Trading System</i>)
EU/Unió	Európai Unió (<i>European Union</i>)
Euratom	Európai Atomenergia-közösség (<i>European Atomic Energy Community</i>)
Eurostat	Európai Statisztikai Hivatal (<i>European Statistical Office</i>)
HLPF	ENSZ Magas Szintű Politikai Fóruma (<i>UN High-Level Political Forum on Sustainable Development</i>)
IAEA	Nemzetközi Atomenergia -Ügynökség (<i>International Atomic Energy Agency</i>)
IAP	Világ Tudományos Akadémiája (<i>InterAcademy Partnership</i>)
IBM	International Business Machines
ICE	Intercontinental Exchange
IEA	Nemzetközi Energiaügynökség (<i>International Energy Agency</i>)
IPCC	ENSZ Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (<i>UN Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
IRENA	Nemzetközi Megújuló Energia Ügynökség (<i>International Renewable Energy Agency</i>)
NASA	Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal (<i>National Aeronautics and Space Administration</i>)
NATO	Észak-atlanti Szerződés Szervezet (<i>North Atlantic Treaty Organisation</i>)
NEA	Nukleáris Energia Ügynökség (<i>Nuclear Energy Agency</i>)
OECD	Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet (<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>)
OPEC	Kőolaj-exportáló Országok Szervezete (<i>Organization of the Petroleum Exporting Countries</i>)
SE4ALL	Fenntartható Energia Mindenkinél (<i>Sustainable Energy for All</i>)
TEN-E	Transzeurópai Energiahálózatok (<i>Trans-European Networks for Energy</i>)
UN / ENSZ	Egyesült Nemzetek Szervezete (<i>United Nations</i>)
UNCED	ENSZ Környezetvédelmi és Fejlesztési Konferencia (<i>UN Conference on Environment and Development</i>)
UNCSD	ENSZ Fenntartható Fejlődési Konferencia (<i>UN Conference on Sustainable Development</i>)
UNDESA	ENSZ Gazdasági és Szociális Ügyek Főosztálya (<i>UN Department of Economic and Social Affairs</i>)
UNDP	ENSZ Fejlesztési Programja (<i>United Nations Development Programme</i>)
UNEP	ENSZ Környezetvédelmi Programja (<i>United Nations Environment Programme</i>)

UNESCO	ENSZ Nevelésügyi, Tudományos és Kulturális Szervezete (<i>UN Educational, Scientific and Cultural Organization</i>)
UNFCCC	ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezmény (<i>UN Framework Convention on Climate Change</i>)
UNSC	ENSZ Statisztikai Bizottsága (<i>UN Statistical Commission</i>)
USA	Amerikai Egyesült Államok (<i>United States of America</i>)
WCED	Környezet és Fejlődés Világbizottság (<i>World Commission on Environment and Development</i>)
WEC	Világ Energia Tanácsa (<i>World Energy Council</i>)
WMO	Meteorológiai Világszervezet (<i>World Meteorological Organization</i>)
WNA	World Nuclear Association
WSSD	Fenntartható Fejlődési Világsúcstalálkozó (<i>World Summit on Sustainable Development</i>)

Rövidítés	Teljes név (angol megnevezés)
°C	celsius fok
A	amper
ACF	autokorrelációs függvény (<i>auto-correlation function</i>)
ADF	Augmented Dickey-Fuller teszt
ANN	mesterséges neurális hálózat (<i>artificial neural network</i>)
ANOVA	varianciaanalízis (<i>analysis of variance</i>)
AR	autoregresszív (<i>autoregressive</i>)
ARCH	autoregresszív feltételes heteroszkedaszticitású (<i>autoregressive conditional heteroskedasticity</i>)
ARIMA	autoregresszív integrált mozgóátlag-folyamat (<i>autoregressive integrated moving average</i>)
ARMA	autoregresszív és mozgóátlag folyamat (<i>autoregressive moving average</i>)
ARX	exogén változókkal bővített autoregressziós modell (<i>AR with exogenous</i>)
bb1	birodalmi hordó (<i>barrel</i>)
BIC	Bayes-féle információs kritérium (<i>Bayesian information criterion</i>)
BRENT	ICE Brent határidős olajár
CH4	metán
CNG	sűrített földgáz (<i>compressed natural gas</i>)
CO	Cochrane-Orcutt-eljárás
CO₂	szén-dioxid
COVID-19	SARS-CoV-2 típusú koronavírus világjárvány
CV	variációs együttható (<i>coefficient of variation</i>)
CSP	koncentrált napenergia (<i>concentrated solar power</i>)
DC	egyenáram (<i>direct current</i>)
DF	Dickey-Fuller teszt
DSO	elosztóhálózati rendszerüzemeltető (<i>distribution system operator</i>)
DW	Durbin-Watson teszt
é.n.	évszám nélkül
EISD	Fenntartható Fejlődés Energetikai Indikátorai (<i>Energy Indicators for Sustainable Development</i>)
EP	nagykereskedelmi villamosenergia-ár (<i>electricity price</i>)
EPPI	Energy Policy and Practices Index
EROI	Energetikai Megtérülési Mutató (<i>Energy Return on Investment</i>)
ES	exponenciális simítás (exponential smoothing)
ESCI	Energy Sustainability Country Index
ETI	Energy Trilemma Index

EUA	Európai Unió kibocsátási egységek (<i>EU Allowances</i>)
EUR	euró
FiP	piaci áron felüli prémium (<i>feed-in-premium</i>)
FiT	kötelező átvételi tarifa (<i>feed-in-tariff</i>)
GARCH	általánosított autoregresszív feltételes heteroszkedaszticitású (<i>generalized autoregressive conditional heteroskedasticity</i>)
GDP	bruttó hazai termék (<i>gross domestic product</i>)
GWh	gigawattóra
HMKE	háztartási méretű kiserőművek
Hz	hertz
i.e.	időszámításunk előtt
ISD	Fenntartható Fejlődés Indikátorai (<i>Indicators of Sustainable Development</i>)
ISED	Fenntartható Energiafejlesztés Indikátorai (<i>Indicators for Sustainable Energy Development</i>)
J	joule
K+F	kutatás-fejlesztés
kg	kilogram
KPSS	Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin teszt
kW	kilowatt
kWh	kilowattóra
LE	lóerő
LNG	cseppfolyósított földgáz (<i>liquefied natural gas</i>)
LNN	folyékony neurális hálózat (<i>liquid neural network</i>)
m	méter / millió
m²	négyzetméter
m³	köbméter
MA	mozgóátlag (<i>moving average</i>)
MAE	átlagos abszolút hiba (<i>mean absolute error</i>)
MAPE	átlagos abszolút százalékos hiba (<i>mean absolute percentage error</i>)
MDG	Millenniumi Fejlesztési Célok (<i>Millennium Development Goals</i>)
MJ	megajoule
MLR	többváltozós lineáris regresszió (<i>multiple linear regression</i>)
mrd	milliárd
MWh	megawattóra
N	newton
N₂O	dinitrogén-oxid
NDC	Nemzetileg Meghatározott Hozzájárulások (<i>Nationally Determined Contributions</i>)
NEG	nettó villamosenergia-termelés (<i>net electricity generation</i>)
NEWC	ICE Newcastle határidős szénár
OLS	legkisebb négyzetek (<i>ordinary least squares</i>)
PACF	részleges autokorrelációs függvény (<i>partial auto-correlation function</i>)
pl.	például
PMX	X mikrométernél kisebb részecskék (<i>particles with a diameter of X micrometres or less</i>)
PP	Phillips-Perron teszt
PPA	áramvásárlási megállapodás (<i>power purchase agreement</i>)
PV	fotovillamos (<i>photovoltaic</i>)
R/P	tartalék-termelés arány (<i>reserves-to-production ratio</i>)
RED	Megújulóenergia-irányelv (<i>Renewable Energy Directive</i>)

RES-E	megújulókból származó bruttó energiatermelés (<i>gross electricity production from renewables</i>)
RMSE	átlagos négyzetes hiba gyöke (<i>root mean square error</i>)
SAR	szezonális autoregresszív (<i>seasonal autoregressive</i>)
SARIMA	szezonális ARIMA (<i>seasonal ARIMA</i>)
SD	fenntartható fejlődés (<i>sustainable development</i>)
SDG	Fenntartható Fejlődési Célok (<i>Sustainable Development Goals</i>)
SDIFF	szezonális differenciálás (<i>seasonal differentiation</i>)
SED	fenntartható energiafejlesztés (<i>sustainable energy development</i>)
SEM	fenntartható energiagazdálkodás (<i>sustainable energy management</i>)
SES	egyszerű exponenciális simítás (<i>simple exponential smoothing</i>)
SI	Nemzetközi Mértékegységrendszer (<i>Système International d'Unités</i>)
SO₂	kén-dioxid
t	tonna
TSO	átviteli rendszerirányító (<i>transmission system operator</i>)
TTF	ICE TTF határidős gázár
TWh	terrawattóra
USD	amerikai dollár
ÜHG	üvegházhatású gázok
V	volt
VAR	vektor-autoregressziós (<i>vector autoregression</i>)
VIF	variánciainflációs tényező (<i>variance inflation factor</i>)
W	watt
WETI	World Energy Trilemma Index

Függelék

F1. táblázat Az energia témaköréhez kapcsolódó főbb mértékegységek és átváltások

Fizikai mennyiség [angol megnevezés]	Jel	Mértékegység
Erő [Force]	<i>F</i>	Newton (N)
Munka [Work]	<i>W</i>	Joule (J)
Energia [Energy]	<i>E</i>	Joule (J)
Hőmennyiség [Quantity of Heat]	<i>Q</i>	Joule (J)
Teljesítmény [Power]	<i>P</i>	Watt (W)
Csúcsteljesítmény [Peak Power]	<i>P peak</i>	Watt peak (Wp)
Elektromos töltés [Electric Charge]	<i>q</i>	Coulomb (C)
Áramerősség [Electric Current]	<i>I</i>	Amper (A)
Feszültség [Electric Potential Difference]	<i>U</i>	Volt (V)
Elektromos ellenállás [Electric Resistance]	<i>R</i>	Ohm (Ω)
Frekvencia [Frequency]	<i>f</i>	Hertz (Hz)
Mértékegység-átváltások		
1 J = 1 Nm = 1 kg·m ² /s ²		
1 J = 2,7778·10 ⁻⁴ Wh = 2,7778·10 ⁻⁷ kWh		
1 GJ = 10 ³ MJ = 10 ⁶ kJ = 10 ⁹ J		
1 W = 1 J/s = 1 VA		
1 kWh = 3,6 MJ		
1 HP = 735,5 W = 0,7355 kW [lóerő]		
1 kW = 1,36 HP		
1 BTU = 1055 J = 0,293 Wh [brit hőegység]		
1 toe = 41,868 GJ = 11,63 MWh = 7,33 boe [tonna olajegyenérték]		
1 boe = 0,136 toe [hordó olajegyenérték]		
1 kcal = 1000 cal = 4,184 kJ		
1 m ³ benzin = 0,86 toe		

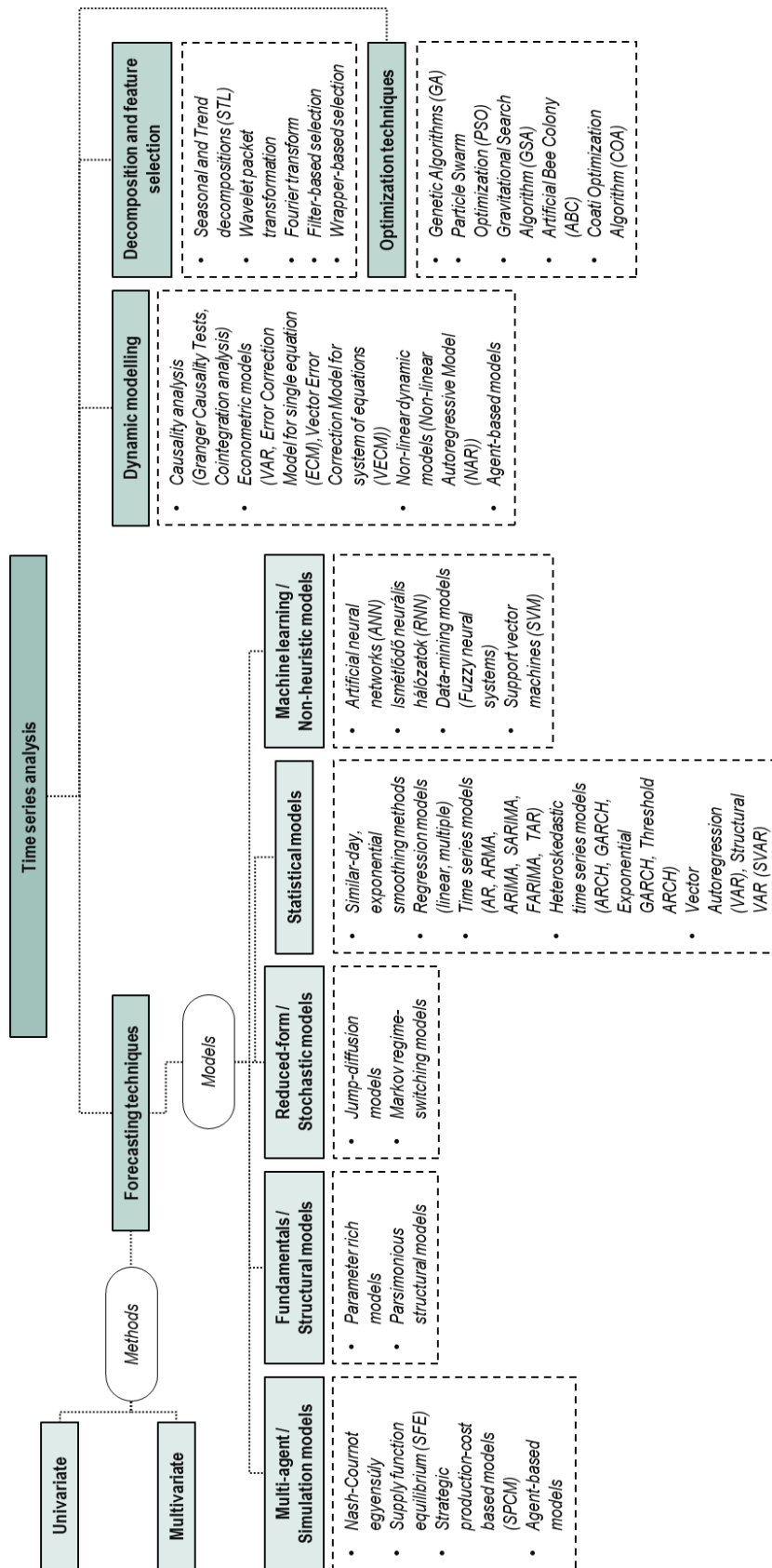
Forrás: Saját összeállítás

F5. ábra ENTSO-E hálózat 2023-ban



Forrás: ENTSO-E (2023)

F6. ábra Idősorelemzési technikák rendszerezése



Forrás: Neusser (2016), Weron (2014) és Weron és Misiorek (2008) alapján saját összeállítás

F7. táblázat Az EISD mutatóinak listája

Sub-theme	Indicator
Economic (16)	
Overall Use	Energy use per capita
Overall Productivity	Energy use per unit of GDP
Supply Efficiency	Efficiency of energy conversion and distribution
Production	Reserves-to-production ratio Industrial energy intensities Agricultural energy intensities
End Use	Service/ commercial energy intensities Household energy intensities Transport energy intensities Fuel shares in energy and electricity
Diversification (Fuel Mix)	Non-carbon energy share in energy and electricity Renewable energy share in energy and electricity
Prices	End-use energy prices by fuel and by sector
Imports	Net energy import dependency
Strategic Fuel Stocks	Stocks of critical fuels per corresponding fuel consumption
Social (4)	
Accessibility	Share of households (or population) without electricity or commercial energy, or heavily dependent on non-commercial energy
Affordability	Share of household income spent on fuel and electricity
Disparities	Household energy use for each income group and corresponding fuel mix
Safety	Accident fatalities per energy produced by fuel chain
Environmental (10)	
Climate Change	GHG emissions from energy production and use per capita and per unit of GDP
Air Quality	Ambient concentrations of air pollutants in urban areas Air pollutant emissions from energy systems
Water Quality	Contaminant discharges in liquid effluents from energy systems including oil discharges
Soil Quality	Soil area where acidification exceeds critical load
Forest	Rate of deforestation attributed to energy use
Solid Waste Generation Management	Ratio of solid waste generation to units of energy produced
	Ratio of solid waste properly disposed of to total generated solid waste
	Ratio of solid radioactive waste to units of energy produced Ratio of solid radioactive waste awaiting disposal to total generated solid radioactive waste

Forrás: IAEA (2005) alapján saját összeállítás

F8. táblázat 2024. júliusáig kihirdetett, Oroszország elleni, energetikát érintő EU-s szankciók

Az orosz olajbevételek megcélzása

Az EU megtiltotta a tengeren szállított nyersolaj és a finomított kőolajtermékek behozatalát Oroszországból. Az olajbehozatalra vonatkozó tilalom jelentős hatást gyakorol Oroszországra. Az ország teljes olajkivitelének mintegy fele az EU-ba irányul. Az EU 2021-ben összesen 71 milliárd euró értékben importált olajat (nyersolajat 48 milliárd euró és finomított kőolajtermékeket 23 milliárd euró értékben) Oroszországból. Mivel Oroszország költségvetése

jelentős mértékben támaszkodik ezekre az olajbevételekre, az országra számottevő strukturális hatást gyakorol, ha elveszíti ezt a kiemelkedően jövedelmező piacot.

A G7+ nemzetközi árplafon-koalíciójával egyeztetett árplafonok tovább csökkentették Oroszország olajból származó bevételeit, és hozzájárultak a globális energiapiacok stabilizálásához is. Az uniós gazdasági szereplőknek tilos például az árplafont meghaladó áron vásárolt orosz olajjal kapcsolatban szállítási vagy biztosítási szolgáltatásokat nyújtaniuk. Jelenleg három árplafon van érvényben, amelyek az alábbi termékek kivitelére vonatkoznak:

- tengeren szállított orosz nyersolaj (hordónként 60 amerikai dollárban rögzített maximális ár);
- a nyersolaj árához képest felárral értékesített kőolajtermékek, például a dízelolaj, a kerozin és a benzin (hordónként 100 amerikai dollárban rögzített ár);
- a nyersolaj árához képest diszkonttal értékesített kőolajtermékek, például a fűtőolaj és a nafta (hordónként 45 amerikai dollár);
- emellett a G7+ országok árplafon-koalíciója – annak érdekében, hogy fellépjen az ún. „árnyékflottával” szemben, melyet Oroszország az árplafonok megkerülésére használ – nemrég intézkedéseket vezetett be, hogy szorosan figyelemmel kísérje a tartályhajók harmadik országokba történő értékesítését.

Egyéb energiaügyi intézkedések

- Behozatali tilalom az orosz szén valamennyi formájára;
- Tilos cseppfolyósított szénhidrogéngázt importálni, ha az értéke meghaladja az évi 1 milliárd eurót (a már megkötött szerződésekre legfeljebb 12 hónapos mentesség vonatkozik);
- Tilos a jövőben beruházni olyan, kivitelezés alatt álló oroszországi projektekbe, amelyek cseppfolyósított földgázt (LNG) állítanak elő, és tilos az ilyen projektekhez termékeket exportálni;
- Tilos uniós kikötőkben orosz cseppfolyósított földgázt átrakodni;
- Tilos orosz cseppfolyósított földgázt olyan terminálokba importálni, amelyek nem kapcsolódnak az uniós földgázvezeték-hálózathoz;
- Az EU nem eszközölhet új beruházásokat az orosz bányászati ágazatban egyes nyersanyagok bányászatának kivételével;
- Egyes finomítási technológiák kivételének tilalma, ami megnehezíti és költségesebbé teszi Oroszország számára az olajfinomítói korszerűsítését;

- Az orosz energiaágazatba irányuló új beruházások széles körű tilalma, korlátozott kivételekkel a polgári célú nukleáris energia és bizonyos energiatermékek EU-ba történő visszaszállítása tekintetében;
- A tagállami gáztárolási kapacitások orosz állampolgárok és szervezetek általi lekötésének tilalma;
- Az Oroszországból csővezetéken szállított olaj behozatalára vonatkozó lehetőség megszüntetése Németország és Lengyelország számára.

Forrás: EC (é.n.) alapján saját összeállítás

F9. táblázat Stacionárius vizsgáldások a kiválasztott változókon

Variable	Transformation	ADF test	PP test	KPSS test	Conclusion
WHEP	Original	0.22	0.26	0.02	The series is non-stationary
	Natural logarithm	0.27	0.23	0.03	The series is non-stationary
	Log-differentiated	<0.01	<0.01	>0.10	The series is stationary
NEG	Original	<0.01	<0.01	>0.10	The series is stationary
	Natural logarithm	<0.01	<0.01	>0.10	The series is stationary
	Log-differentiated	<0.01	<0.01	>0.10	The series is stationary
RES	Original	<0.01	0.02	>0.10	The series is stationary
	Natural logarithm	<0.01	<0.01	>0.10	The series is stationary
	Log-differentiated	<0.01	<0.01	>0.10	The series is stationary
TTF	Original	0.27	0.56	0.02	The series is non-stationary
	Natural logarithm	0.29	0.47	0.02	The series is non-stationary
	Log-differentiated	<0.01	<0.01	>0.10	The series is stationary
BRENT	Original	0.61	0.59	<0.01	The series is non-stationary
	Natural logarithm	0.57	0.50	<0.01	The series is non-stationary
	Log-differentiated	<0.01	<0.01	>0.10	The series is stationary
NEWC	Original	0.71	0.84	<0.01	The series is non-stationary
	Natural logarithm	0.61	0.83	<0.01	The series is non-stationary
	Log-differentiated	0.42	<0.01	>0.10	The series is trend stationary
EUA	Original	0.63	0.80	<0.01	The series is non-stationary
	Natural logarithm	0.59	0.85	<0.01	The series is non-stationary
	Log-differentiated	0.29	<0.01	>0.10	The series is trend stationary

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

**F10. táblázat Az eredeti változók statisztikai karakterisztikái
(2015. január – 2020. december)**

	WHEP	NEG	RES	TTF	BRENT	NEWC	EUA
Mean	40.97	230.08	0.34	16.32	55.41	76.37	14.70
Minimum	21.55	194.31	0.26	4.94	26.63	49.40	4.31
Maximum	61.44	273.26	0.46	27.95	80.63	117.78	31.39
Range	39.89	78.95	0.20	23.01	54.00	68.37	27.08
Std. dev.	8.73	19.18	0.04	4.93	12.13	20.42	9.22
Coeff. var.	0.21	0.08	0.13	0.30	0.22	0.27	0.63
Skewness	0.36	0.41	0.54	-0.22	-0.08	0.41	0.34
Kurtosis	0.39	-0.70	-0.09	-0.04	-0.43	-1.10	-1.65
Observations	72	72	72	72	72	72	72

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

**F11. táblázat Az eredeti változók statisztikai karakterisztikái
(2015. január – 2020. december)**

	WHEP	NEG	RES	TTF	BRENT	NEWC	EUA
Mean	75.56	228.58	0.36	35.15	64.15	124.40	32.51
Minimum	21.55	194.31	0.26	4.94	26.63	49.40	4.31
Maximum	425.20	273.26	0.52	235.96	117.50	439.43	92.61
Range	403.65	78.95	0.26	231.02	90.87	390.02	88.29
Std. dev.	71.92	19.09	0.06	41.84	18.55	98.51	29.51
Coeff. var.	0.95	0.08	0.15	1.19	0.29	0.79	0.91
Skewness	2.51	0.47	0.41	2.66	0.60	1.96	0.91
Kurtosis	6.92	-0.71	-0.35	7.55	0.32	2.84	-0.67
Observations	104	104	104	104	104	104	104

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

F12. táblázat A parciális korrelációs együtthatók összehasonlítása a két vizsgált időszak között

		Feb 2015 - Dec 2020	Δ	Feb 2015 - Aug 2023	Expected relationship
DIFF_LN_NEG	Correlation	0.297		0.129	+1
	Sign. (2-tailed)	0.015	↓	0.206	
DIFF_LN_RES	Correlation	-0.756		-0.662	-3
	Sign. (2-tailed)	0.000	↓	0.000	
DIFF_LN_TTF	Correlation	0.382		0.704	+3
	Sign. (2-tailed)	0.002	↑	0.000	
DIFF_LN_BRENT	Correlation	0.243		0.015	+1
	Sign. (2-tailed)	0.049	↓	0.883	
DIFF_LN_NEWC	Correlation	-0.016		0.019	+2
	Sign. (2-tailed)	0.897	↑	0.851	
DIFF_LN_EUA	Correlation	0.471		0.374	+2
	Sign. (2-tailed)	0.000	↓	0.000	

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

F13. táblázat A CO-eljárás által korrigált regressziós modell összesítő táblája (energiaválság előtti időszak)

Iterations	Rho (AR1) Value	Rho (AR1) Std. Error	Mean sqr. errors			
3	-0.330	0.138	0.004			
					95.0% Conf. Interval for B	
	Coefficient	Std. Error	t-stat	p-value	Lower Bound	Upper Bound
Intercept	0.002	0.007	0.339	0.736		
RES-E	-0.929	0.114	-8.126	0.000	-1.159	-0.699
TTF	0.334	0.103	3.258	0.002	0.128	0.540
EUA	0.250	0.088	2.848	0.007	0.074	0.426
R		0.868	F-stat		49.500**	
R-squared		0.754	VIF _{max}		1.258	
Adjusted R square		0.732	Durbin-Watson stat		2.151	
Std. error of estimate		0.065	N		52	

*Megjegyzés: Természetes alapú log-transzformált modellek szerint.
Szignifikáns 1%-os (**) és 5%-os (*) szinten.*

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével

**F14. táblázat A CO-eljárás által korrigált regressziós modell összesítő táblája
(energiaválság alatti időszak)**

Iterations	Rho (AR1) Value	Rho (AR1) Std. Error	Mean sqr. errors			
2	-0.111	0.119	0.004			
	Coefficient	Std. Error	t-stat	p-value	95.0% Conf. Interval for B	
					Lower Bound	Upper Bound
Intercept	-0.001	0.007	-0.150	0.881		
RES-E	-0.913	0.099	-9.247	0.000	-1.110	-0.716
TTF	0.254	0.057	4.435	0.000	0.140	0.368
EUA	0.430	0.077	5.573	0.000	0.277	0.583
NEP	0.254	0.123	2.069	0.042	0.009	0.499
R		0.871	F-stat		56.750**	
R-squared		0.758	VIF _{max}		1.127	
Adjusted R square		0.741	Durbin-Watson stat		2.034	
Std. error of estimate		0.065	N		76	

*Megjegyzés: Természetes alapú log-transzformált modellek szerint.
Szignifikáns 1%-os (**) és 5%-os (*) szinten.*

Forrás: Saját összeállítás SPSS szoftver segítségével