

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Természettudományi Kar
Földtudományok Doktori Iskola



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

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

HERCZEG BALÁZS

PÉCS, 2024

A DOKTORI ISKOLA NEVE, CÍME

Pécsi Tudományegyetem,
Földtudományok Doktori Iskola
7624 Pécs, Ifjúság útja 6.

A DOKTORI ISKOLA VEZETŐJE

Prof. Dr. Geresdi István,
egyetemi tanár
PTE TTK Földrajzi és Földtudományi Intézet
Földtani és Meteorológiai Tanszék

A DOKTORI PROGRAM NEVE

Geopolitika, politikai földrajz és geoökonómia
közép-európai perspektívából

A DOKTORI PROGRAM VEZETŐJE

Prof. Dr. Pap Norbert
egyetemi tanár
PTE TTK Földrajzi és Földtudományi Intézet
Politikai Földrajzi, Fejlődési és Regionális
Tanulmányok Tanszéke

TÉMAVEZETŐ

Dr. Pintér Éva
habilitált egyetemi docens
Budapesti Corvinus Egyetem, Vállalkozás és
Innováció Intézet

„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, author of *The New Map: Energy, Climate, and the Clash of Nations*

I. 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 legsodálatosabb fejlődését hozta és ezek az előrelépések szinte mindegyike közvetlenül az új energiaformákban rejlő lehetőségek kiaknázására vezethetők vissza. 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 előretekintő 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 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 explicite 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 rendszerszemléletet 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 döbönt rá igazán. A természeti-környezeti szempontok figyelembevételének térnyerése ezért adja a fenntarthatóság alapját, úgyszólván elengedhetetlen feltételét.

A fenntarthatóság energetikai kontextusban a fenntartható energiaátmenetre épül. Bár 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

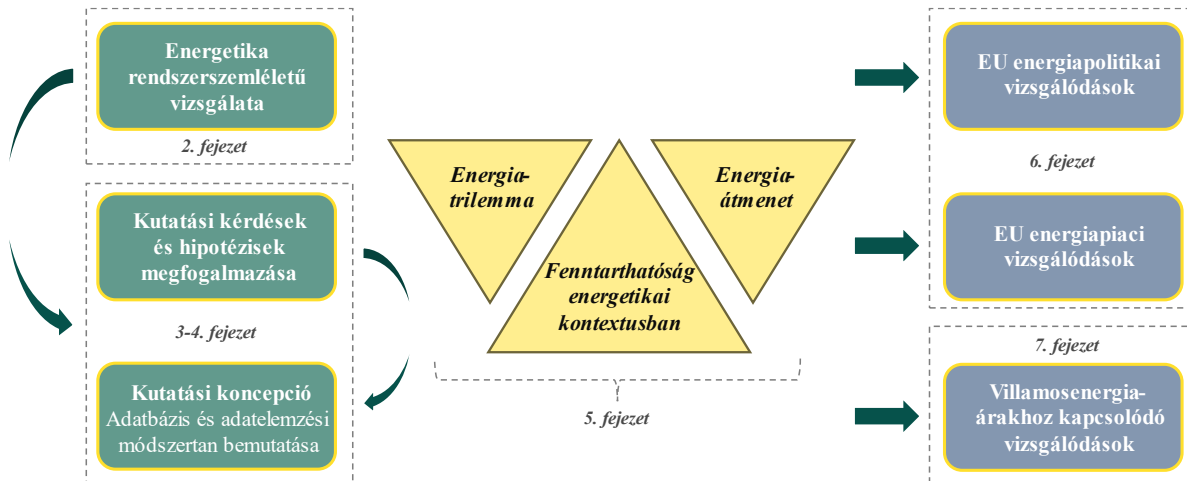
energiafüggetlenség és a rendszerstabilitás megteremthetőségéig bezárólag. Ez az energiaátmenet, mely tehát alapvetően a fosszilis tüzelőanyagokról való áttérést jelenti a tiszta és megújuló energiaforrásokra, döntően meghatározza bolygónk élhetőségét a következő generációk számára. Ennél fontosabb célkitűzést 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.

Tehát ahogy a téma, úgy a dolgozatom felépítése is rendszerszemléletet követel meg (1. ábra).

1. ábra A kutatásom gondolatmenete és a dolgozat felépítése



Forrás: Saját készítésű ábra

II. Kutatási célkitűzések, kérdések és hipotézisek

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

Célkitűzés (CK1): *Feltérképezem a fenntartható energiagazdálkodás, az energiatrilémma és az energiátmenet 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 irodalomgyűjtemények 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.

Célkitűzés (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 energiátmenet 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.

Célkitűzés (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 a dolgozatban a tradicionális leíró jellegű statisztikai elemzésre; az empirikus kutatásaim kiterjednek többváltozós következtetési statisztikai technikák használatára is, melyek kapcsolati összefüggéseket hivatottak feltárni, avagy időszerelemzést 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 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?**
 - **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 időszakra végzett előrejelzések, ugyanakkor a többváltozós modellek az energiaválság előtti és alatti vizsgált időszakok esetében is pontosabbnak bizonyulnak az egyváltozós társaiknál.

III. Kutatás módszertana

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 fogalmazhatnék, 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 multiválságok

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, amellyel, 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 célokom tehát az EU-n belüli lokális, azaz országspecifikus energetikai vizsgálat, 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; célokom az objektív megközelítésen alapuló elemzés.

A vizsgált téma jellegéből adódóan alapvetően **szekunder adatgyűjtésre** 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:

- ❖ A **kvalitatív** jellegű kutatásom, amelybe közvetlenül az energetikai fenntarthatóság, 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, WEC, EB, 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 képző, 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 időszerelemzéseket is.

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.

IV. Eredmények összefoglalása

Az első kutatási kérdésem arra irányult, hogy megértssem, **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 tágon 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). Másrészt 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 energiaátmenet 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 fókuszbán, minek a fejlesztése került előtérbe. A hangsúly a „fókuszt”-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 nyerő 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 még 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 investálásban látják a megoldást, mely hozzájárul a folyamatosan épülő megújuló, elsősorban nap- és szélerőmű 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 szénművek – 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 gáztól. 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 multiválságok 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 áramárát 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 multiválságok 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 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 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 árelőjelzési 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 idősakra 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 változékony 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.

A témakörben megjelent és közlésre benyújtott tudományos folyóiratcikkek jegyzéke:

1. **HERCZEG, B. & PINTÉR, É.** (2024): A fenntartható fejlődés átfogó elemzése: Történelmi perspektívák, keretrendszerek és indexek. *Tér-Gazdaság-Ember (bírálat alatt)* [MTA IX. GJO / RTB: "B" kategória]
2. **HERCZEG, B. & PINTÉR, É.** (2024): A természeti erőforrások egyenlőtlen regionális eloszlása – Fókuszban az EU Villamosenergia-termelési lehetőségei és korlátai. *Gazdaság és Társadalom (bírálat alatt)* [MTA IX GJO/GDMB: "D" kategória]
3. **HERCZEG, B. & PINTÉR, É.** (2024): A globális éghajlatváltozás jelensége és következményei regionális és szektorális aspektusban. *Economica (bírálat alatt)*
4. **HERCZEG, B. & PINTÉR, É.** (2024): A fenntarthatóság koncepciója energetikai szemléletben – Fókuszban az energiatrilemma és -átmenet, valamint a kapcsolódó innovációs potenciál. *Vezetéstudomány / Budapest Management Review (közlésre elfogadva)*
[MTA IX GJO/GMB: "A" kategória]
5. **HERCZEG, B., CSISZÁRIK-KOCSIR, Á. & PINTÉR, É.** (2024): Assessing the accuracy of electricity price forecasting models before and after the impact of energy crisis using univariate and multivariate methods. *Acta Polytechnica Hungarica (közlésre elfogadva)*
[WoS: SCIE; SCJR: Q2]

6. **HERCZEG, B.** & PINTÉR, É. (2024): Energiapiaci trendek a közelmúltbeli események tükrében. Fókuszban a villamos energia és a megújulók. *Jelenkori társadalmi és gazdasági folyamatok (közlésre elfogadva)*

[MTA IX GJO/DOÁB: "D" kategória]

7. **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, pp. 1–25. <https://doi.org/10.3390/en17040857>

[WoS: SCIE; SCJR: Q1]

8. **HERCZEG, B.**, PINTÉR, É. & Bagó, P. (2023): How green and digital transformation shapes industries: Twin transition to a green and digital future. *Vezetéstudomány / Budapest Management Review* 54(5), pp. 51–63. <https://doi.org/10.14267/VEZTUD.2023.05.05>

[MTA IX GJO/GDMB: "A" kategória]

A témakörben megjelent konferencia közlemények jegyzéke:

1. **HERCZEG, B.** & PINTÉR, É. (2024): Energy Trilemma and the EU's Energy Economy: Empirical Evidence of Moving Toward the Sustainable Energy Transition. *10th International Scientific Conference on Knowledge Based Sustainable Development* (ERAZ 2024 conference, 6 June 2024, Lisbon, Portugal). ISBN 978-86-80194-85-1
2. **HERCZEG, B.** & PINTÉR, É. (2024): A fenntartható energiagazdálkodás trilemmája multiválságok idején. *XXVII. Tavaszi Szél Konferencia* (TSZK 2024 konferencia, 2024. május 3-5, Óbudai Egyetem, Budapest) ISBN 978-615-6457-52-3
3. **HERCZEG, B.** & PINTÉR, É. (2024): A villamosenergia-árakat meghatározó tényezők értékelése eltérő makrogazdasági időtávlatokban. *XII. Interdiszciplináris Doktorandusz Konferencia* (IDK 2024 konferencia, 2024. április 5-6, PTE BTK, Pécs) ISBN 978-963-626-245-7
4. **HERCZEG, B.** & PINTÉR, É. (2024): Evaluating the relationship between electricity and selected energy prices for modeling purposes. *8th International Scientific Conference on Economics & Management* (EMAN 2024 conference, 21 March 2024, Rome, Italy). ISBN 978-86-80194-82-0
5. PINTÉR, É. & **HERCZEG, B.** (2023): Digitális transzformáció és fenntarthatóság iparági kitekintései. *XV. Pécsi Pénzügyi Napok / I. Pénzügy és Számvitel Nemzetközi Tudományos Konferencia / Fenntarthatóság és Ellenállóképesség* (PPN2023 konferencia, 2023. június 5-6, PTE KTK, Pécs) ISBN 978-963-626-141-2