

A GREEN DEAL MEGVALÓSÍTHATÓSÁGÁNAK KRITIKAI ELEMZÉSE: A MAKROGAZDASÁGI REBOUND-HATÁS ÉS A DECOUPLING EMPIRIKUS VIZSGÁLATA AZ EU–27 TAGÁLLAMAIBAN

Zombory Anita¹

ABSZTRAKT

A jelenlegi környezeti kihívások, különösen a klímaváltozás, a biológiai sokféleség csökkenése és az erőforrás-kimerülés, egyre világosabban jelzik, hogy a gazdasági növekedésen alapuló modellek fenntarthatatlanok. E kihívások fényében egyre sürgetőbbé válik a gazdaságpolitikai gondolkodás paradigmaváltása. A fenntartható fejlődés elméletében központi szerepet betöltő decoupling, azaz a gazdasági növekedés és a környezeti terhelés szétválasztása, bár elméletileg kívánatos, empirikusan számos korlátba ütközik. A tanulmány az Európai Unió 27 tagállamára vonatkozóan vizsgálja a decoupling megvalósíthatóságának korlátait a makrogazdasági rebound-hatás tükrében. A vizsgálat módszertana összehasonlító elemzés és panel ökonometria. A relatív decoupling néhány esetben elérhető, azonban az abszolút decoupling bizonyítékai korlátozottak. További problémát jelent, hogy a technológiai hatékonyságnövekedést gyakran ellensúlyozza a rebound-hatás, illetve a gazdasági globalizáció révén a környezeti terhelések a fejlődő országokba kerülnek át. Mindezek fényében a jelenlegi gazdasági modell újragondolása, valamint az anyag- és energiahasználat abszolút csökkentését célzó stratégiák előtérbe helyezése elengedhetetlenné válik egy igazságosabb és ökológiai szempontból fenntarthatóbb jövő érdekében.

JEL-kódok: Fo2, F68, L50, O52, P51

Kulcsszavak: Európai Unió, Green Deal, Rebound-effect, IPAT, fogyasztás- és termelésalapú kibocsátás

¹ Zombory Anita PhD-hallgató, közgazdász szaktanár, Szegedi Tudományegyetem Közgazdaságtani Doktori Iskola. E-mail: zombory.anita@gmail.com.

1. BEVEZETÉS ÉS ELMÉLETI KERETEK: A KORLÁTLAN NÖVEKEDÉS ÖKOLÓGIAI HATÁRAI

A szétválasztás (*decoupling*) az ökológiai közgazdaságtan és a fenntarthatósági gondolkodás egyik központi koncepciója. Fontosságát az adja, hogy a konvencionális gazdasági növekedés és a környezeti terhelés szorosan összefonódik: a bruttó hazai termék (GDP) gyarapodása a historikus adatok alapján szinte kivétel nélkül az erőforrás-felhasználás és a környezetszennyezés fokozódásával jár együtt. A *decoupling* célja ennek a strukturális kapcsolatnak a megbontása.

E paradigmaváltást a bolygó véges eltartóképessége (*planetary boundaries*) teszi halaszthatatlanná. Mivel a Föld ökoszisztémáinak kapacitása véges, a korlátlan erőforrás-felhasználás kumulatív környezeti válságokhoz vezet. Míg a klasszikus közgazdasági paradigma növekedésorientált, és a környezeti externáliákat jórészt másodlagosként kezeli, az ökológiai közgazdaságtan rámutat arra, hogy egy véges rendszerben nem tartható fenn végtelen fizikai növekedés, ráadásul az anyagi átáramlás (*throughput*) bővüléséből nem következik automatikusan a társadalmi jólét növekedése (Meadows et al., 1972). A konvencionális gazdasági modell középpontjában álló korlátlan termelés és fogyasztás így egy rendszerszintű ökológiai csapdát hoz létre, amely veszélyezteti a hosszú távon élhető természeti környezetet (Jackson, 2009).

Mindezen elméleti korlátok ellenére napjainkban az Egyesült Nemzetek Szervezete, az Európai Unió és számos nemzetállam stratégiai programjai azon a feltételezésen alapulnak, hogy a gazdasági növekedés és a környezeti terhelés közötti kapcsolat gyengítése vagy megszüntetése lehetővé teszi a növekedési paradigma fenntartását. Az Európai Bizottság által 2019 decemberében közzétett Európai Zöld Megállapodás (*European Green Deal*) egyik legfőbb politikai ígérete éppen az, hogy a klímavédelmi célok elérése nem jár a gazdasági fejlődés megtorpanásával (European Commission, 2019). A kezdeményezés átfogó célkitűzése, hogy az EU-t 2050-re klímasemlegessé tegye, miközben a középtávú, „Irány az 55%!” (*Fit for 55*) csomag 2030-ig legalább 55%-os kibocsátáscsökkentést ír elő az 1990-es bázisévhez képest.

A feldolgozott szakirodalom a *decoupling* két fő típusát különbözteti meg (Wiedenhofer et al., 2020):

- Relatív szétválasztás (*relative decoupling*): A gazdaság tovább növekszik, de a környezeti terhelés növekedési üteme elmarad a GDP növekedési ütemétől.
- Abszolút szétválasztás (*absolute decoupling*): A GDP gyarapodása mellett a környezeti terhelés abszolút mértékben csökken.

A szakpolitikai stratégiákban domináns „zöld növekedés” (*green growth*) megközelítést azonban komoly bírálatok érik (Laurent, 2020; Parrique et al., 2019).

Egyrészt a döntéshozók elsősorban a termelésalapú (területi) kibocsátási mutatókat veszik alapul, amelyek a kiszervezett termelés miatt gyakran szignifikánsan alacsonyabbak a fogyasztásalapú (ökológiai lábnyom jellegű) mutatóknál, hamis képet festve a valós eredményekről. Másrészt ez a szemlélet azon a megkérdőjelezhető feltételezésen nyugszik, hogy a technológiai hatékonyságjavulás önmagában elegendő a környezeti nyomás mérséklésére, a termelés és a fogyasztás volumenének korlátozása nélkül.

2. A VISSZAPATTANÓ HATÁS (*REBOUND EFFECT*) MINT A SZÉTVÁLASZTÁS STRUKTURÁLIS KORLÁTJA

A gazdasági növekedés és a környezeti terhelés abszolút szétválasztásának legfőbb elméleti és gyakorlati akadály a „visszapattanó hatás (*rebound effect*)” (Sorrell, 2007). A jelenség gyökerei a William Stanley Jevons (1865) által leírt Jevons-paradoxonig nyúlnak vissza, amely kimutatta, hogy a technológiai hatékonyságjavulás az egységnyi termelési költségek csökkenése révén nem az erőforrás-felhasználás mérséklődéséhez vezet, hanem ösztönzi a fogyasztás és a termelés további expenzióját (Gillingham, 2014; Jarvis- King, 2024).

A modern erőforrás-közgazdaságtan (Sorrell, 2009; Font Vivanco et al., 2016) a visszapattanó hatás három, egymásra épülő és egymást erősítő szintjét különíti el:

1. Közvetlen (direkt) hatás: Az adott energiahatékony technológia vagy szolgáltatás egységköltségének csökkenése a mikroökonómiai keresletelméletnek megfelelően (a helyettesítési és jövedelmi hatás révén) közvetlenül növeli az adott szolgáltatás iránti egyéni keresletet.
2. Közvetett (indirekt) hatás: A hatékonyságból adódó monetáris megtakarítások (a fogyasztóknál felszabaduló diskrecionális jövedelem, a vállalatoknál jelentkező költségcsökkentés) más, potenciálisan szintén magas erőforrás- és energaintenzitású szektorok és termékek fogyasztásában vagy beruházásaiban jelennek meg.
3. Makrogazdasági hatás: Az energiahatékonyság rendszerszintű javulása növeli a teljes nemzetgazdaság termelékenységét és versenyképességét. Ez az implicit árcsökkenéseken keresztül átalakítja a globális ellátási láncokat, felgyorsítja a gazdasági növekedést, és ezáltal aggregált szinten nagyobb energia- és anyagfelhasználást eredményez (Barker et al., 2009).

A makrogazdasági rebound-hatás jelenléte alapjaiban kérdőjelezi meg az abszolút *decoupling* megvalósíthatóságát (Antal-van den Bergh, 2016): rávilágít arra, hogy a hatékonyságvezérelt technológiai fejlődés által kiváltott rendszerszintű gazdasági visszacsatolások semlegesítik a mérnöki jellegű energiamegtakarításokat

(Brockway et al., 2021). Az ökológiai közgazdaságtan értelmezésében a visszapattanó hatás ezért nem egy kiküszöbölhető technikai hiba, hanem a tőkefelhalmozási és növekedési kényszer immanens strukturális következménye (Hickel–Kallis, 2020).

3. A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSE, HIPOTÉZISE ÉS MÓDSZERTANI KERETEI

A jelen tanulmány elsődleges célja annak feltárása, hogy az energiapolitikai stratégiákban prioritásként kezelt technológiai energiahatékonyság-javulás képes-e megvalósítani az anyag- és energiaáramok abszolút mértékű mérséklését, vagy a rendszerszintű makrogazdasági visszacsatolások semlegesítik ezeket a mérnöki megtakarításokat. Ezen elméleti és szakpolitikai feszültség empirikus ellenőrzésére az alábbi fő hipotézist fogalmazzuk meg:

H1: Az EU-27 országaiban az energiahatékonyság javulása (az energaintenzitás csökkenése) nem vezet a környezeti terhelés abszolút csökkenéséhez, mivel a gazdasági növekedés által generált abszolút energiafogyasztás-növekedés semlegesíti a relatív hatékonysági nyereséget (makrogazdasági rebound-hatás).

A hipotézis tesztelése és a környezeti terhelést alakító hajtóerők feltárása érdekében a kutatásban az IPAT-modellt alkalmazzuk, amely a környezeti nyomást (I) a népesség (P), a társadalmi jólét/egy főre jutó GDP (A) és a technológiai hatékonyság (T) tényezőire bontja szét (Dietz–Rosa, 1997; Ehrlich–Holdren, 1971).

Mivel a feldolgozott szakirodalom rámutat a területi mutatók torzító hatásaira (Wiedenhofer et al., 2020), elemzésünkben összehasonlító számításokat végzünk a fogyasztásalapú és a termelésalapú kibocsátások alakulására vonatkozóan, amely újdonságként jelenik meg az e témával foglalkozó szakirodalmi elemzésekben. A tagállamok gazdasági szektorainak időbeli kibocsátási mintázatait elemezve feltárjuk a lehetséges strukturális problémákat, és az eredmények szintézisével következtetéseket vonunk le a *decoupling* reális megvalósíthatóságáról és korlátairól.

A rebound-hatás és a szétválasztási folyamatok ökonometriai modellezéséhez (panel-regressziók, ökonometriai hatásvizsgálatok) az alábbi standardizált mutatókat alkalmazzuk, amelyeket az 1. táblázat foglal magában. A gazdasági növekedés és a jövedelmi szint a rebound-hatás elsődleges mozgatórugója. Az energiahatékonyság javulása költségmegtakarítást eredményez mind a háztartásoknál, mind a vállalatoknál. A növekvő reáljövedelem (1 főre jutó GDP) fokozza az aggregált keresletet más energaintenzív javak és szolgáltatások iránt (jövedelmi

hatás) (Callen, 2008). Sorrell (2007) kiemeli, hogy a GDP növekedése nélkül a makroszintű makroökonómiai visszapattanó hatás nem modellezhető megfelelően, mivel a technológiai hatékonyságjavulás által felszabaduló tőke és munkaerő a GDP-t növeli. Az egy főre jutó teljes GHG-kibocsátás segít elkülöníteni a fizikai energiamegtakarítás és a tényleges klímavédelmi eredmény (dekarbonizáció) közötti különbséget a nemzeti határokon belül (IPCC, 2022). Az egy főre jutó energiafelhasználás a rebound-hatás eredeti elméleti definíciója (Jevons-paradoxon) közvetlenül a primerenergia-fogyasztás alakulására vonatkozik. A hatékonyságjavulás ellenére fellépő abszolút energiafogyasztás-növekedést (backfire), vagy részleges megtakarítást ezen a mutatón keresztül lehet közvetlenül mérni (Sorrell, 2007). A fejlett gazdaságokban a termelésalapú mutatók gyakran torzítanak a szén-dioxid-szivárgás (carbon leakage) és az energiaintenzív iparágak kiszervezése (offshoring) miatt. A globális rebound és a szétválasztás (decoupling) illúziójának tesztelésére szolgál (Peters et al., 2011). Szolgáltatások hozzáadott értéke a GDP (%-ban) a gazdasági szerkezet dezindusztrializációja (áttérés a nagy energiaintenzitású iparról a kisebb közvetlen energiaintenzitású szolgáltatási szektorra) önmagában is csökkentheti az energia- és emisszióintenzitást technológiai javulás nélkül is. Ennek a strukturális elmozdulásnak a kiszűrése (kontrollálása) nélkül a becsült rebound-hatás torzított lenne (Suh, 2006). A megújuló energiafogyasztás aránya az energiamix tiszta átmenetét és annak a rebound-mechanizmusokra gyakorolt moderáló hatását kontrollálja (IRENA, 2023). A fosszilis energiahordozók aránya okozhatja, hogy a fosszilis függőség magas szintje mellett a hatékonyságjavulás miatti árcsökkenés erősebb keresletnövekedést (reboundot) válthat ki a korlátozott helyettesíthetőség miatt (Brockway et al., 2021). A primer energiaintenzitás a technológiai hatékonyság egyik sarkalatos változója, mivel a rebound-hatás ökonometria mérésekor a technológiai fejlődést és a hatékonyságváltozást az energiaintenzitás alakulásával ragadhatjuk meg. Ha az energiaintenzitás javulása (csökkenése) nem jár együtt az aggregált energiafogyasztás vagy emisszió arányos csökkenésével, az igazolhatja a rebound-hatás jelenlétét (United Nations, 2023; Gillingham–Rapson–Wagner, 2016).

1. táblázat

A rebound-hatás empirikus elemzéséhez felhasznált indikátorok

Indikátor megnevezése	Mértékegység	Magyarázat	Felhasznált szakirodalom
1 főre jutó GDP	USD / fő (folyó áron)	Az egy főre jutó GDP a bruttó hazai termék és az évközepe népesség hányadosa. A gazdasági fejlettség és az aggregált makrogazdasági kibocsátás alapvető mutatója. ²	Callen (2008) Sorrell (2007)
Egy főre jutó teljes GHG-kibocsátás	t CO ₂ e / fő	Az adott ország teljes üvegházhatású gáz-kibocsátása (LULUCF nélkül), a népességre vetítve. A termelésalapú közvetlen klímaterhelést méri. ³	(IPCC, 2022)
Egy főre jutó energiafelhasználás	kg kőolaj-egyenérték (koe) / fő	Az egy főre vetített primerenergia-felhasználás, kőolaj-egyenértékben kifejezve. Az aggregált energiaigény alakulását mutatja. ⁴	(Sorrell, 2007)
Fogyasztásalapú GHG kibocsátás	tonna szén-dioxid-egyenérték t CO ₂ e / fő	A nemzetközi kereskedelemmel korrigált kibocsátási mutató: Fogyasztásalapú kibocsátás = Termelésalapú kibocsátás – Exporthoz kapcsolódó kibocsátás + Importhoz kapcsolódó kibocsátás (t) ⁵	(Peters et al., 2011; Parrique et al., 2019)
Szolgáltatások hozzáadott értéke a	GDP (%) -ban	A szolgáltatási szektor részesedése a bruttó hazai termékben (a köztes termékek levonása után). A gazdaság szerkezeti átalakulását (deindusztrializáció) kontrollálja. ⁶	(Suh, 2006)
Megújuló energiafogyasztás aránya	a teljes végső energiafelhasználásból (%)	A végső energiafogyasztásból a megújuló források (nap, szél, víz, biomassza) részesedése. Az energiamix tiszta átmenetét méri. ⁷	IRENA (2023)

2 <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD?end=2023&start=1960&view=chart>

3 <https://data.worldbank.org/indicator/EN.GHG.CO2.PC.CE.AR5?end=2023&start=1960&view=chart>

4 <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE?end=2023&start=1960&view=chart>

5 https://ourworldindata.org/grapher/consumption-co2-emissions?tab=table&mapSelect=OWID_EU27~DEU~ITA~FRA~POL~ESP~BEL~NLD~CZE~AUT~ROU~SWE~HUN~FIN~PRT~GRC~IRL~DNK~BGR~SVK~HRV~LTU~SVN~LVA~EST~MLT~LUX~CYP&tableFilter=countries

6 <https://data.worldbank.org/indicator/NV.SRV.TOTL.ZS?end=2023&start=1960&view=chart>

7 <https://data.worldbank.org/indicator/EG.FEC.RNEW.ZS?end=2023&start=1960&view=chart>

Indikátor megnevezése	Mértékegység	Magyarázat	Felhasznált szakirodalom
Fosszilis energiahordozók fogyasztása	a teljes energia- felhasználás arányában (%)	A primer energiafogyasztásból a szénhidrogének és szén részesedése. A szénintenzív energiamix mértékét jelzi. ⁸	(Brockway et al., 2021)
A primerenergia energiaintenzitása	MJ/USD (2017-es PPP GDP)	Egy egységnyi vásárlóerő-paritáson számított GDP előállításához felhasznált primerenergia megajoule- ban. A makroszintű technológiai energiahatékonyság fő indikátora. ⁹	United Nations (2023), Gillingham, -Rapson- Wagner (2016).

Forrás: Saját szerkesztés

4. A REBOUND-HATÁS ÖKONOMETRIAI TESZTELÉSE

A kutatás arra keresi a választ, hogy a technológiai modernizációból fakadó relatív energiahatékonyság-javulás (az energiaintenzitás mérséklődése) miért és milyen csatornákon keresztül válik képtelenné a környezeti terhelés abszolút csökkentésére. A Jevons-paradoxon logikája alapján az egységnyi kibocsátásra vetített hatékonyságjavulás erőforrás-felszabadulást eredményez, amely makrogazdasági szinten reáljövedelem-növekedésként és az életszínvonal emelkedéseként csapódik le. Ez a jóléti expanzió a termelési volumen és a lakossági fogyasztás növekedésén keresztül részben vagy egészben semlegesítheti a technológiailag garantált ökológiai nyereséget (Brockway et al., 2021).

A hazai és nemzetközi szakpolitikai diskurzus módszertani torzításait kiküszöbölve az elemzés explicit módon szétválasztja a termelésalapú (production-based) és a fogyasztásalapú (consumption-based) emissziós pályákat. Ez a kettős megközelítés lehetővé teszi a nemzetközi kereskedelemmel közvetített szén-dioxid-szivárgás (carbon leakage) és a makrogazdasági szintű közvetett rebound hatások empirikus elkülönítését.

A transzmissziós mechanizmusok modellezéséhez kétoldali logaritmikus (log-log) specifikációt alkalmazunk, aminek köszönhetően a becsült együtthatók közvetlenül rugalmasságként értelmezhetők. A vizsgálat 27 tagállam 24 évnyi adatára (621 megfigyelés) terjed ki az alábbi változóstruktúra mentén:

⁸ <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.COMM.FO.ZS?end=2023&start=1960&view=chart>

⁹ <https://data.worldbank.org/indicator/EG.EGY.PRIM.PP.KD?end=2023&start=1960&view=chart>

Függő változók:

log_ghg_emission: Egy főre jutó területiális (termelésalapú) üvegházhatású gáz-kibocsátás.

log_consumption_based_emission: Egy főre jutó fogyasztásalapú széndioxid-kibocsátás (tartalmazza az importált javakba ágyazott karbonlábnyomot is).

Magyarázó és kontrollváltozók:

log_E_GDP: Energiaintenzitás; a technológiai energiahatékonyság közvetlen mutatója (amelynek csökkenése jelez hatékonyságjavulást).

log_GDP_per_capita: Egy főre jutó reál-GDP; a gazdasági fejlettség és a jövedelmi hatás kontrollálására.

log_energy_use_per_capita: Egy főre jutó primer energiafelhasználás; a skála- és volumenhatás mérésére.

log_GVA_services: A szolgáltatási szektor bruttó hozzáadott értékének (GVA) aránya a GDP %-os arányában kifejezve; a strukturális kompozíciós hatást méri.

log_CO2_GDP: Szén-dioxid-intenzitás; az energiamix tisztaságának indikátora.

log_POP: Demográfiai kontrollváltozó (teljes népesség).

dummy_paris és *dummy_recession*: Kvalitatív (dummy) változók a Párizsi Klímaegyezmény (2015 utáni időszak), valamint a makrogazdasági sokkok (2008-as válság, COVID-19) kontrollálására.

Az elemzés során dinamikus panelregressziót alkalmaztunk, amely lehetővé teszi az időbeli változások és az országonként eltérő sajátosságok együttes vizsgálatát.

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 X_{it} + \beta_2 X_{it} + \dots + \epsilon_{it} \quad (1)$$

Az Y_{it} a függő változó (egy főre jutó CO₂ kibocsátás), i -edik megfigyelési egységre (27 tagállamra) és t -edik időszakra (2000–2023) vonatkozik. Az X_{it} a magyarázó és kontrollváltozók vektora (egy főre jutó GDP, 1 főre jutó primer energiafelhasználás, energaintenzitás, karbonintenzitás, szolgáltatási szektor hozzáadott értékének aránya a GDP-hez, népesség, valamint a strukturális sokkokat és intézményi változókat megragadó dummy változók).

4.1. Diagnosztikai tesztek: a magyarázó változók multikollinearitásának ellenőrzése

A becsült panelmodellek struktúrájának és a standard hibák torzítatlanságának ellenőrzése érdekében elengedhetetlen a magyarázó változók közötti multikollinearitás tesztelése. Erre a célra a variancia-inflációs tényező (VIF) mutatóit alkalmaztuk a vizsgált időszakra vonatkozóan a (2.táblázat).

2. táblázat

A vizsgált magyarázó változók multikollinearitási tesztje (FMOLS bázison)

Változó	VIF
<i>log_energyuse_per_capita</i>	4,4758
<i>log_GVA_services</i>	19,0931
<i>log_POP</i>	1,8639
<i>log_E_GDP</i>	21,8504
<i>log_CO2_GDP</i>	17,4082
<i>log_GDP_per_capita</i>	7,2488

Forrás: Saját szerkesztés eViews szoftverrel (FMOLS modellben tesztelt)

Megjegyzés: *Az átlagtól való eltéréssel nem korrigált, nyers adatokra épülő mutató. ** Ahogy nő a mintanagyság (több évet, hónapot vagy egyedet vonz be a vizsgálatba), a kointegráció miatt a modell becslési hibája a lehető leggyorsabban nullára csökken.

A kapott nem centrált (Uncentered)* VIF értékek alapján az energiaszintén (log_E_GDP), a szolgáltató szektor részaránya (log_GVA_services) és a szén-dioxid-intenzitás (log_CO2_GDP) meghaladják a hagyományosan vett 10-es kritikus küszöbértéket. Ez a jelenség azonban nem jelent módszertani hibát; a modell eredményei az alábbi elméleti és ökonometria specifikumok miatt megalapozottak:

Rendszerszintű együttmozgás: A vizsgált makrogazdasági aggregátumok természetüknél fogva szorosan korrelálnak. Az egy főre jutó GDP növekedése és a szolgáltató szektor strukturális térnyerése törvényszerűen és szimultán alakítja át az országok energiahatékonyságát és emissziós struktúráját. Ezen változók együttes szerepeltetése elméletileg indokolt (Hickel és Kallis, 2020), elhagyásuk a kihagyott változó miatti torzításhoz (*omitted variable bias*) – vezetne.

Skálázás és trendek: Az *Uncentered VIF* mutatók az adatok abszolút szintjéből és a konstans tag jelenlétéből adódóan eleve matematikai kényszer miatt magasabbak olyan idősoros paneladatoknál, ahol a változók logaritmizált formában szerepelnek, kizárólag pozitív értéktartományt vesznek fel, és határozott hosszú távú trendet követnek.

Kointegráció és robusztusság: Mivel a hosszú távú kointegrációs tesztek (Kao, Pedroni, Johansen–Fisher) igazolták a változók közötti tartós egyensúlyi kapcsolatot, a becsült modellek rendelkeznek a szuperkonzisztencia (*super-consistency*) tulajdonságával. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a kointegrációs vektor becslésekor az OLS-alapú eljárások aszimptotikusan immunisak a multikollinearitás torzító hatásaival szemben. Ezt empirikusan bizonyítja, hogy az együttthatók varianciái rendkívül alacsonynak bizonyulnak (jóval 0,001 alattiak), a kapott együttthatók és p-értékek pedig stabilak, robusztusak és magas szinten szignifikánsak maradtak (Al-Azzam–Fajness, 2018; Kao–Chiang, 2000).

4.2. Ökonometriai becslési eljárások

A rövid és hosszú távú hatások elkülönítése, valamint az időbeli változások és az országonként eltérő sajátosságok együttes vizsgálata érdekében dinamikus, heterogén panel-ökonometriai modelleket alkalmazunk.

Rövid távú dinamika és statikus panel-specifikációk

A rövid távú rugalmasságok és az azonnali sokkhatások azonosítására a változók első differenciáinak logaritmusát alkalmazzuk. A bázisbecslések robusztusságát három klasszikus eljárással teszteljük a Random Effects (RE), a Fixed Effects (FE) és a Pooled OLS modellek segítségével, ahol a modellek közötti választást a Hausman-teszt formális kritériumai vezérlik. Az elsőfajú autokorrelációt a Durbin-Watson-statisztikával ellenőrizzük, míg a panel-korrelációt és a heteroszkedaszticitást robusztus, periódus-specifikus White-féle standard hibákkal (White-period robust standard errors) kezeljük.

Hosszú távú egyensúlyi kapcsolatok és kointegráció

Mivel a makrogazdasági idősorok gyakran nem-stacionárius folyamatok, a hosszú távú strukturális kointegrációs vektorok számszerűsítésére három olyan korszerű modellt futtatunk, amelyek hatékonyan kezelik a szimultán torzításokat és endogenitást: a Fully Modified OLS (FMOLS), a Dynamic OLS (DOLS) és a Pooled Mean Group (PMG) modelleket. Ezek segítségével pontosan feltárható, hogy a gazdasági rendszer sokkjai után a piaci mechanizmusok milyen sebességgel csatornázzák vissza a technikai megtakarításokat az újabb tőkefelhalmozási és fogyasztási folyamatokba.

A modellezési eredményeket az átláthatóság érdekében két különálló, de egymással logikai egységet alkotó táblázatban mutatjuk be. A 3. táblázat a rövid távú

dinamikus panelek eredményeit, és a hosszú távú kointegrációs modellek és a hibakorrekciós PMG modell együtthatóit részletezi.

3. táblázat

A visszapattanó hatás rövid távú dinamikus panelregressziós eredményei (Első differenciák szintje: d_log)

	RE		FE		OLS	
Rövid táv						
Független változók/ magyarázó változók	Együttható	p-érték	Együttható	p-érték	Együttható	p-érték
Függő változó: Fogyasztás alapú CO ₂ –kibocsátás (d_log_consumption_based emission)						
Konstans (β ₀)	−0,0088	0,0437	−0,0074	0,0018**	−0,0079	0,0003***
Karbonintenzitás (d_log_CO ₂ _GDP)	0,1536	0,0002***	0,2053	0,0000***	0,1588	0,0000***
Energiaintenzitás (d_log_E_GDP)	−0,2171	0,0033***	−0,3264	0,0000***	−0,2183	0,0005***
Egy főre jutó energiafelhasználás (d_log_energy_use_per_capita)	0,3110	0,0009***	0,4095	0,0000***	0,3092	0,0000***
Egy főre jutó GDP (d_log_GDP_per_capita)	0,1562	0,0143**	0,1497	0,0000***	0,1563	0,0000***
Szolgáltató szektor aránya (d_log_GVA_service	0,2080	0,0145**	0,0639	0,1832	0,1770	0,0152**
Teljes népesség (log_POP_d2)	−0,1215	0,6330	−0,1959	0,2736	−0,0610	0,8548
Dummy változó (dummy_paris)	0,0066	0,1153	0,0073	0,0091	0,0069	0,0087**
Dummy változó (dummy_recession)	−0,0096	0,0701	−0,0048	0,0573*	−0,0098	0,0004***
Modell diagnosztika						
Durbin-Watson statistika			nincs jelen súlyos elsőfajú autokorreláció	2,42	nincs jelen súlyos elsőfajú autokorreláció	2,35
R ²				0,40		0,38
Breusch-Pagan teszt			A heteroszkedaszticitás és panel-korreláció jelenlétét robusztus White-statisztikákkal kezeltük, így a standard hibák torzítatlanok.		A heteroszkedaszticitás és panel-korreláció jelenlétét robusztus White-statisztikákkal kezeltük, így a standard hibák torzítatlanok.	
Hausman teszt	a modellt el kell vetni	1,000				

F-statistic				10,87		44,72
Akaike info criterion		-4,15				-4,2
	RE		FE		OLS	

Függő változó: Egy főre jutó termelés alapú (területi) kibocsátás (d_log_ghg_emission)

Független változók/ magyarázó változók	Együttható	p-érték	Együttható	p-érték	Együttható	p-érték
Konstans (β_0)	-0,0001	0,8465	-0,0008	0,0103**	0,0003	0,4197
Karbonintenzitás (d_log_CO2_GDP)	0,3992	0,0000***	0,3975	0,0000***	0,4011	0,0000***
Energiaintenzitás (d_log_E_GDP)	-0,3074	0,0000***	-0,3534	0,0000***	-0,3144	0,0000***
Egy főre jutó energiafelhasználás (d_log_energy_use_per_capita)	0,3230	0,0000***	0,3744	0,0000***	0,3300	0,0000***
Egy főre jutó GDP (d_log_GDP_per_capita)	0,0101	0,3347	0,0047	0,2058	0,0115	0,0856*
Szolgáltató szektor aránya (d_log_GVA_service)	0,0878	0,0020***	0,0486	0,0275**	0,0892	0,0000***
Teljes népesség (log_POP_d2)	-0,2105	0,0021***	-0,0610	0,1473	-0,1908	0,0026**
Dummy változó (dummy_paris)	0,0001	0,7535	0,0001	0,5206	0,0001	0,8228
Dummy változó (dummy_recession)	-0,0014	0,1409	-0,0004	0,2636	-0,0011	0,0219**

Modell diagnosztika

Durbin-Watson statistika		1,63	nincs jelen súlyos elsőfajú autokorreláció	1,58	nincs jelen súlyos elsőfajú autokorreláció	1,49
R ²		0,95		0,97		0,95
Breusch-Pagan teszt			A heteroszkedaszticitás és panel-korreláció jelenlétét robusztus White-statisztikákkal kezeltük, így a standard hibák torzítatlanok.		A heteroszkedaszticitás és panel-korreláció jelenlétét robusztus White-statisztikákkal kezeltük, így a standard hibák torzítatlanok.	
Hausman teszt	a modellt el kell vetni	1,0000				
F-statisztika				2413		1284,5
Akaike info criterion	legjobban illeszkedő modell, amelyiknek a legkisebb az értéke	-7,5				-7,5

Hosszú táv						
Független változók/ magyarázó változók	FMOLS		DOLS		PMG	
	Együttható	p-érték	Együttható	p-érték	Együttható	p-érték
Függő változó: Fogyasztás alapú CO ₂ -kibocsátás (d_log_consumption_based emission)						
Konstans (β_0)					-6,1277	0,0000***
Karbonintenzitás (log_CO2_GDP)	0,2530	0,0000***	0,4463	0,0007***	0,2157	0,0000***
Energiaintenzitás (log_E_GDP)	-0,5941	0,0000***	-0,5209	0,0028***	-0,5885	0,0000***
Egy főre jutó energiateljesítmény (log_energy_use_per_capita)	0,6955	0,0000***	0,3721	0,0095***	0,7433	0,0000***
Egy főre jutó GDP (log_GDP_per_capita)	0,0411	0,4817	0,1952	0,0804**	0,2829	0,0000***
Szolgáltató szektor aránya (log_GVA_services)	-0,2934	0,0010***	-0,2172	0,1332	-0,5680	0,0000***
Teljes népesség (log_POP)	0,3144	0,0100***	-0,1656	0,3018	0,3090	0,0000***
					Rövid táv	
COINTEQ (Hibakorrekciós tényező)					-0,2808	0,0004***
Fogyasztás alapú kibocsátás (d_log_consumption_based emission)					-0,1423	0,0226**
Karbonintenzitás (d_log_CO2_GDP)					-0,1137	0,3788
Energiaintenzitás (d_log_E_GDP)					-0,1176	0,4981
Egy főre jutó energiateljesítmény (d_log_energy_use_per_capita)					0,4658	0,0026***
Egy főre jutó GDP (d_log_GDP_per_capita)					0,0772	0,0369*
Szolgáltató szektor aránya (d_log_GVA_services)					0,3686	0,0750
Teljes népesség (log_POP_d2)					0,4264	0,7808
					1,1278	0,4773

Kointegrációs tesztek						
Kao Kointegrációs Teszt						
ADF	-3,4244	0,0003***	Van kointegráció			
Pedroni Residual Kointegrációs teszt						
Determinisztikus trend hiánya (No deterministic trend)						
Group-rho statistic	3,0082	0,9987	Van kointegráció			
Group PP-statistic	-7,2202	0,0000***				
Group ADF – statistic	-1,6814	0,0463	Van kointegráció			
Determinisztikus konstanssal (tengelymetszettel) és trenddel ellátott specifikáció (Deterministic intercept and trend)						
Group-rho statistic	4,4569	1,0000	Van kointegráció			
Group PP-statistic	-8,3290	0,0000***				
Group ADF – statistic	-1,8740	0,0305	Van kointegráció			
Determinisztikus konstans (tengelymetszet) és trend nélküli specifikáció (No deterministic intercept and trend)						
Group-rho statistic	2,3736	0,9912	Van kointegráció			
Group PP-statistic	-5,6773	0,0000***				
Group ADF – statistic	-0,8322	0,2026	Nincs kointegráció			
Johansen Fisher Panel Kointegrációs teszt						
Nincs kointegrációs kapcsolat (None max eigen)	717,7	0,0000***	Van kointegráció			
Függő változó: Egy főre jutó termelés alapú (területi) kibocsátás (d_log_ghg_emission)						
Konstans (β0)					-2,7173	0,0035**
Karbonintenzitás (log_CO2_GDP)	0,4385	0,0000***	0,3526	0,0000***	0,5275	0,0000***
Energiaintenzitás (log_E_GDP)	-0,3950	0,0000***	-0,3673	0,0000***	-1,0472	0,0000***
Egy főre jutó energiafelhasználás (log_energy_use_per_capita)	0,3717	0,0000***	0,4079	0,0000***	0,6772	0,0000***

Egy főre jutó GDP (log_GDP_per_capita)	-0,0181	0,0595**	0,0432	0,2397	-0,1173	0,0382**
Szolgáltató szektor aránya (log_GVA_services)	0,0796	0,0000***	-0,0319	0,5039	0,0613	0,0127**
Teljes népesség (log_POP)	-0,2055	0,0000***	-0,1805	0,0013***	0,0776	0,0851**
					Rövid táv	
COINTEQ Hibakorrekciós tényező)					-0,0039	0,6416
Karbonintenzitás (d_log_CO2_GDP)					0,3839	0,0000***
Energiaintenzitás (d_log_E_GDP)					-0,3379	0,0000***
Egy főre jutó energiafelhasználás (d_log_energy_use_per_capita)					0,3589	0,0000***
Egy főre jutó GDP (d_log_GDP_per_capita)					-	-
Szolgáltató szektor aránya (d_log_GVA_services)					0,0514	0,0698**
Teljes népesség (d_log_POP)					-0,3642	0,0010***

Kointegrációs tesztek**Kao Kointegrációs Teszt**

ADF	-2,93	0,0017***	Van kointegráció			
-----	-------	-----------	------------------	--	--	--

Pedroni Residual Kointegrációs teszt

Determinisztikus trend hiánya (No deterministic trend)						
Group-rho statistic	3,808	0,9999	Van kointegráció			
Group PP-statistic	-1,8825	0,0299**				
Group ADF – statistic	1,7044	0,9559	Nincs kointegráció			
Determinisztikus konstanssal (tengelymetszettel) és trenddel ellátott specifikáció (Deterministic intercept and trend)						
Group-rho statistic	4,4564	1,0000	Van kointegráció			
Group PP-statistic	-4,9849	0,0000***				

Group ADF – statistic	0,0203	0,5081	Nincs kointegráció			
Determinisztikus konstans (tengelymetszet) és trend nélküli specifikáció (No deterministic intercept and trend)						
Group-rho statistic	3,3916	0,9997	Van kointegráció			
Group PP-statistic	–0,2499	0,4013				
Group ADF – statistic	3,1025	0,9990	Nincs kointegráció			
Johansen Fisher Panel Kointegrációs teszt						
Nincs kointegrációs kapcsolat (None max eigen)	665	0,0000***	Van kointegráció			

Megjegyzés: ***, **, * jelöli a szignifikanciát 1%, 5%, illetve 10%-os szinten. A rövid távú statikus modellek első differenciált ($\Delta \log$) formában futottak. A heteroszkedaszticitást és panel-korrelációt robusztus White-period standard hibákkal kezeltük. Forrás: Saját szerkesztés EVIEWS szoftverrel.

Az ökonometriai becslések eredményei alapján a rövid távú dinamikus panelek (FE, RE, OLS) és a hosszú távú egyensúlyi kapcsolatokat feltáró kointegrációs modellek (FMOLS, DOLS, PMG) egy módszertanilag stabil, robusztus és elméletileg konzisztens kauzális láncolatot (ok-okozati összefüggéseket) rajzolnak ki. A Hausman-tesztek értékei ($p = 1,000$) mindkét rövid távú specifikáció esetében jelzik, hogy a Random Effects (RE) modellek hipotézisei elvetendők, így a rövid távú dinamika értelmezése során a fix hatások (Fixed Effects – FE) modelljei tekintendők elsődleges referenciának. A hosszú távú struktúrák esetében az ARDL-alapú PMG (Pooled Mean Group) becslés szolgáltatja a legmegbízhatóbb eredményeket, mivel képes a rövid távú sokkok országspecifikus heterogenitását elválasztani a hosszú távú egyensúlyi pályától.

Az energiahatékonyság és a volumenhatás paradoxonja

A modellben központi szerepet tölt be a relatív energiahatékonyság-javulás (az energaintenzitás $\log_E_GDP$ csökkenése) és az abszolút energiafelhasználás ($\log_energy_use_per_capita$) közötti kauzális kapcsolat. Az adatokból kirajzolódó összefüggések közvetlenül bizonyíthatják a makrogazdasági visszapattanó hatás elméletét:

Hosszú távú egyensúly (PMG): Az energaintenzitás ($\log_E_GDP$) hosszú távú (PMG) modellben kapott szignifikáns negatív együtthatói (fogyasztásalapú kibocsátás modellje esetén -0,5885***; termelésalapú kibocsátás esetén: -1,0472***) első látásra paradox eredményt mutatnak, azonban az ökológiai közgazdaságtan logikája alapján a Jevons-paradoxon tiszta igazolásai. A log-log specifikációban a negatív előjel azt jelenti, hogy az energaintenzitás csökkenése (ami a techno-

lógiai energiahatékonyság javulását jelenti) a kibocsátás növekedésének irányába hatna, amennyiben a rendszer többi elemét (a volumenhatást) változatlanul hagynánk. Ez a negatív rugalmasság rávilágít arra, **hogy a technikai hatékonyság javulása önmagában nem képes az abszolút emissziócsökkentésre**, mert a negatív együtttható matematikai struktúrája hordozza magában a visszapatlanul hatás belső kényszerét, azaz a hatékonyság növekedése a volumenhatáson ($\log_energy_use_per_capita$, $+0,7433^{***}$) keresztül azonnal többletenergia-fogyasztást generál, ami végül semlegesíti a relatív energiahatékonysági nyereséget. A negatív előjel tehát nem hiba, hanem a Jevons-paradoxon matematikai lenyomata. Azt mutatja meg, hogy az energiahatékonyság növelése önmagában csapda, mert ha hatékonyabbá tesszük a rendszert, az nem kevesebb szennyezéshez vezet, hanem a költségek csökkentésén keresztül egy nagyobb, falánkabb gazdasági növekedést generál, ami végül teljesen feléli a technológiai megtakarítást. Tehát a negatív előjel matematikailag azt fejezi ki, hogy az energiaintenzitás javulása (csökkenése) paradox módon a CO₂-kibocsátás növekedését vonja maga után, mivel a technológiai megtakarítást a gazdaság a megnövekedett termelési volumeneken keresztül azonnal feléli.

A transzmissziós csatorna (Volumenhatás): Az egy főre jutó primer energiafelhasználás ($\log_energy_use_per_capita$) hosszú távú PMG becslései mindkét modellben a legmagasabb pozitív rugalmassági együttthatókat mutatták (fogyasztásalapú kibocsátás esetén: $+0,7433^{***}$; termelésalapú kibocsátás esetén: $+0,6772^{***}$). Ez az eredmény kulcsfontosságú az energiaintenzitásnál tapasztalt elméleti paradoxon feloldásában, és közvetlen bizonyítékul szolgálhat a makrogazdasági viszapattanó hatás működésére. Az adatok rávilágítanak arra, hogy a technológiai modernizáció hiába képes javítani a relatív hatékonyságot, a gazdasági rendszer belső dinamikája a felszabaduló kapacitásokat és jövedelmi többleteket azonnal újabb termelési és fogyasztási folyamatokba csatornázza vissza. A változók logaritmizáltak, az együtttható közvetlenül rugalmasságként értelmezhető. Mivel az abszolút energiavolumen kibocsátási rugalmassága rendkívül magas, FMOLS és PMG modellben megközelíti a 0,7-es értéket, hosszú távon, ha az energiafelhasználás 1%-kal nő, a hozzá kapcsolódó kibocsátás közel 0,7%-kal emelkedik. Ez a rendkívül erős, szignifikáns pozitív kapcsolat támaszthatja alá, hogy **az energiavolumen növekedése dominálja a rendszert és teljesen semlegesíti a technológiai hatékonyságjavulásból adódó elméleti megtakarításokat**.

Kauzális mechanizmus: Az eredmények igazolják a makrogazdasági rebound hatást. Bár a technológiai hatékonyság javulása ($E_GDP\downarrow$) elméletileg csökkentené a kibocsátást, az ezáltal generált gazdasági növekedés és kapacitásbővülés megnöveli az abszolút energiafelhasználást ($energy_use_per_capita$). Mivel az abszolút volumenhatás hosszú távú rugalmassága ($+0,67$ és $+0,74$) számszerűen felülmúlja a hatékonysági együttthatókat ($-0,59$ és $-0,58$), a volumenbővülés telje-

sen semlegesíti a technológiai megtakarításokat. Ez azt jelenti, hogy a technológia fejlődésével az energaintenzitás ($\log_E_GDP$) 1%-kal javul, azaz 1%-kal kevesebb energia kell egységnyi GDP előállításához, a kibocsátás $-0,58\%$ és $-0,59\%$ -kal csökken, ez lenne a fenntartható megtakarítás, miközben minden változatlan marad, tehát a környezet terhelése hozzávetőlegesen $0,6\%$ -kal csökkenne. Ezzel szemben a hatékonyság javulása olcsóbbá teszi a termelést, ami gazdasági növekedést indít be. A modell szerint, ha ez a növekedés miatt az abszolút egy főre jutó energiafelhasználás ($\log_energy_use_per_capita$) 1%-kal növekszik, ez önmagában $0,67\% - 0,74\%$ -os emisszió növekedést idéz elő. Ez a Jevons-paradoxon empirikus bizonyítéka, azaz a hatékonyabb energiafelhasználás hosszú távon nem kevesebb, hanem a gazdasági növekedési csatornákon keresztül magasabb rendszerszintű környezeti terheléshez vezet. Ez a magyarázat szakpolitikai szempontból azért kulcsfontosságú, mert rámutat arra, hogy a tisztán technológiai alapú zöld átállás önmagában kudarcra van ítélve, ha a növekedési volumenhatásokat nem korlátozzák vagy kompenzálják strukturális intézkedésekkel.

A szétválasztás (decoupling) aszimmetriája és indikátorfüggősége (GDP_per_capita)

A gazdasági növekedés (GDP_per_capita) környezeti hatásainak elemzése kritikus különbségekre mutat rá a fogyasztás- és a termelésalapú szemlélet között, amelyet a 4. táblázat mutat, rávilágítva arra, hogy a főáramú gazdaságpolitika által hirdetett abszolút szétválasztás részben módszertani illúzió.

4. táblázat

Az egy főre jutó GDP hatása a fogyasztás- és termelésalapú kibocsátásokra rövid és hosszú távon

Időtáv / Modell	Fogyasztásalapú emisszió ($\log_consumption_based$)	Termelésalapú emisszió ($\log_ghg$)
Rövid táv (FE)	+0,1497*** (Erősen pozitív, szignifikáns)	+0,0047 (Nem szignifikáns)
Hosszú táv (PMG)	+0,2829*** (Erősen pozitív, szignifikáns)	-0,1173** (Szignifikáns, negatív)

Forrás: Saját szerkesztés

Rövid távon a gazdasági növekedés azonnal és közvetlenül generál fogyasztásalapú kibocsátás-növekedést, miközben a termelésalapú kibocsátás szintjén ez a hatás még nem szignifikáns. A jövedelemnövekedés azonnali importtöbbletet és fogyasztásbővülést okoz.

Hosszú távon a termelésalapú modellben a negatív együtttható ($-0,1173$) látszólagos abszolút szétválasztást (absolute decoupling) mutat. Ugyanakkor a fogyasztásalapú modellben a jövedelmi rugalmasság hosszú távon még erőteljesebbé és pozitívvá válik ($+0,2829^{***}$).

A kauzális konklúzió: Az EU-27 országaiban nem jelenthető ki egyértelműen, hogy végbement volna a dekarbonizáció, hanem a környezeti terhelést az eredmények alapján a globális ellátási láncokon keresztül kiszervezhették (carbon leakage). A hazai gyárak szerkezetileg tisztulhatnak (ezt mutatja a termelésalapú negatív együtttható), de a tagállamok jóléte és fogyasztása tartósan és szorosan kötődik a globális szén-dioxid-kibocsátáshoz. A fogyasztás alapú kibocsátás esetén az abszolút szétválasztást a makrogazdasági rebound-hatás teljesen blokkolja.

Strukturális deindusztrializáció és kompozíciós hatás (GVA_services)

A szolgáltató szektor bruttó hozzáadott értékének aránya ($\log_GVA_services$) a gazdaság strukturális átalakulásának (kompozíciós hatás) transzmissziós mechanizmusát hivatott mérni.

Rövid távon (FE és OLS) a szolgáltatások felé történő elmozdulás pozitív előjelű a kibocsátásokra nézve (Fogyasztásalapú kibocsátás esetén OLS: $+0,1770^{***}$; Termelésalapú kibocsátás esetén FE: $+0,0486^{***}$). Ez azt jelenti, hogy a szerkezetváltás kezdeti fázisa (pl. digitalizáció, adatközpontok kiépülése, logisztikai hálózatok expanziója) átmeneti energetikai többletterheléssel jár.

Hosszú távon (PMG) a szolgáltatás szektor térnyerése drasztikus kibocsátás-csökkenést eredményez a fogyasztásalapú kibocsátás modelljében ($-0,5680^{***}$). Ez bizonyítja, hogy a dematerializáció és a tudásalapú gazdaság hosszú távon képes mérsékelni a fogyasztás környezeti lábnyomát, ami a strukturális visszapattanó hatások részleges leküzdésének hatékony strukturális eszköze lehet.

4.3 Sokkhatások és intézményi dummik (dummy_paris és dummy_recession)

Párizsi Klímaegyezmény (dummy_paris): Rövid távon a fogyasztásalapú OLS modellben gyenge pozitív hatást mutat ($+0,0069$), míg a többi modellben (mind rövid, mind hosszú távon) nem szignifikáns. Ez az ok-okozati kapcsolatok szintjén azt jelenti, hogy az intézményi-nemzetközi egyezmények önmagukban, strukturális piaci beavatkozás nélkül képtelenek voltak érdemi törést előidézni az EU kibocsátási trendjeiben a vizsgált időszakban.

Makrogazdasági válságok (dummy_recession): Rövid távon mindkét modellben szignifikánsan negatív (Fogyasztásalapú kibocsátás modelljében OLS: $-0,0098^{***}$; Termelésalapú kibocsátás modelljében OLS: $-0,0011^{***}$). Ez megerősíti azt a feltételezést, hogy a kibocsátások csökkenése a vizsgált időszakban nem

a zöld technológiák térhódításának, hanem a gazdasági aktivitás konjunkturális visszaeséseinek volt köszönhető (2008-as válság, COVID-19 miatti leállások).

A Kaya-identitás komponenseinek empirikus számszerűsítése és dekompozíciós elemzése

Az elemzés elsődleges célja annak meghatározása, hogy a technológiai energia- és karbonhatékonyság javulása képes-e abszolút értelemben csökkenteni a környezeti terhelést, vagy a növekedésorientált gazdasági struktúra volumenhatásai felémésztik a hatékonysági nyereséget. A dekompozíciós elemzéstől arra a kérdésre várunk választ, hogy a technológiai komponensek fejlődése képes-e egyidejűleg kompenzálni az affluencia (anyagi jólét) és a demográfiai expanzió skálahatásait.

A kutatás módszertani alapját az Ehrlich és Holdren-féle (1971) IPAT-modell kiterjesztéseként értelmezhető Kaya-identitás logaritmikus dekompozíciója adja. Ezen indexfelbontási eljárás segítségével a globális aggregált adatsorokat állítjuk szembe az Európai Unió (EU-27) specifikus mutatóival a 2000 és 2023 közötti időintervallumban. Az elemzés során a vizsgált időszakai tényadatokat konfrontáljuk az Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014) által javasolt, a 2 °C-os éghajlati stabilizációs pályához (450 ppm)¹⁰ szükséges egyensúlyi forgatókönyvekkel.

Globális és regionális divergenciák a szétválasztás (decoupling) folyamatában

A technológiai fejlettség és a környezeti terhelés közötti kapcsolat elemzése során az első kritikus lépés a lokális (látszólagos) sikerek és a globális biofizikai realitások összevetése. Annak ellenére, hogy az energiafelhasználás és a szén-dioxid-intenzitás globális szinten relatív javulást mutatott, az aggregált környezeti terhelés abszolút növekedése nem állt meg.

A World Bank (2026) adatai alapján (1. ábra) a globális szén-dioxid-kibocsátás 2000 és 2023 között mintegy 51%-kal¹¹ emelkedett, miközben a globális egy főre jutó GDP reálértéken 139,6%-kal¹² növekedett. Globális léptékben tehát nemhogy abszolút, de még tartós relatív szétválasztás sem figyelhető meg. Ezzel szemben az Európai Unió (EU-27) makrogazdasági pályája első ránézésre jelentős eltérést

¹⁰ Ez azt jelenti, hogy ha veszünk a Föld légköréből 1 millió gázmolekulát, abból pontosan 450 molekula üvegházhatású gáz (főleg szén-dioxid).

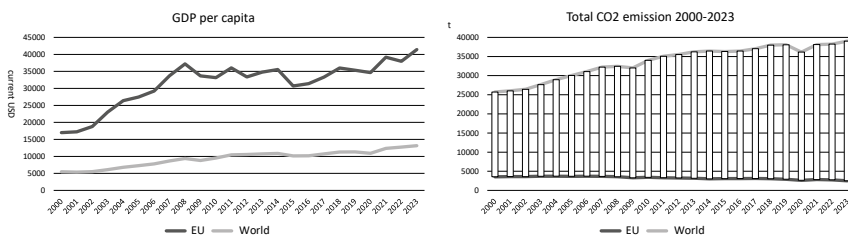
¹¹ <https://data.worldbank.org/indicator/EN.GHG.CO2.MT.CE.AR5>

¹² <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>

mutat, amely strukturális törésvonalat rajzol ki a centrum és a globális periféria közé.

1. ábra

Az 1 főre jutó jövedelem (GDP per capita) és a teljes CO₂-kibocsátás trendjeinek divergenciája az Európai Unióban (EU-27) és globális szinten (2000–2023)



Forrás: Saját szerkesztés a Word Bank adatainak felhasználásával.^{13 14}

Megjegyzés: A globális emelkedő és az uniós degresszív kibocsátási görbék összehasonlítása az egy főre jutó GDP tükrében.

Az EU-27 tagállamaiban az egy főre jutó reál-GDP 2000 és 2023 között 144%-kal¹⁵ nőtt, miközben az egy főre jutó CO₂-kibocsátás 31,2%-kal¹⁶, a teljes területi CO₂-kibocsátás pedig 29,5%-kal csökkent. Ez a tendencia a neoklasszikus környezetgazdaságtan keretei között formálisan *abszolút szétválástként* (*absolute decoupling*) interpretálható, mivel a gazdasági növekedést a teljes kibocsátási volumen abszolút csökkenése kíséri. Ez az összefüggés azonban a viszapattanó hatások és a nemzetközi kereskedelmi áramlások mélyebb vizsgálata során komplexebb megvilágításba kerül.

4.3.1. Uniós szintű dekompozíciós eredmények és az IPCC-célértékek feszültsége

A 2000–2023 közötti időszakban az Európai Unió területén végbement folyamatok logaritmikus felbontásának és a normatív klímacélok eléréséhez szükséges egyensúlyi pályáknak az eredményeit az 5. táblázat foglalja össze.

¹³ <https://data.worldbank.org/indicator/EN.GHG.CO2.MT.CE.AR5>

¹⁴ <https://data.worldbank.org/indicator/EN.GHG.CO2.LU.OS.MT.CE.AR5>

¹⁵ <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>

¹⁶ <https://data.worldbank.org/indicator/EN.GHG.CO2.MT.CE.AR5>

5. táblázat

Kaya-dekompozíciós mátrix és fenntarthatósági egyensúlyi pályák az Európai Unióban (2000–2023)

Dekompozíciós komponensek (tényezők)	Megfigyelt kumulált változás ($\Delta \ln$, 2000–2023)	Megfigyelt éves átlagos változás	Elvárt egyensúlyi pálya I. (Technológiai fókuszú elvárás)	Elvárt egyensúlyi pálya II. (Affluencia- fókuszú elvárás)
Teljes CO ₂ -kibocsátás (I)	−0,171	−0,0078	−0,0503	−0,0503
1 főre jutó GDP ¹⁷ USD/fő (A)	+0,8920	+0,0405	+0,8920	+0,5712
Népesség ¹⁸ fő (P)	+0,0443	+0,0020	0,0443	0,0443
Karbonintenzitás ¹⁹ (CO ₂ /E)	−0,6658	−0,0303	−0,9866	−0,6658
Energiaintenzitás (E/GDP)	−0,4418	−0,0201	−0,4418	−0,4418

Forrás: Saját szerkesztés a World Bank adatai alapján

A táblázat empirikus adataiból leolvasható, hogy az Európai Unió kibocsátási dinamikáját meghatározó domináns pozitív hajtóerő az életszínvonal növekedése (affluencia-hatás: $\Delta \ln A = +0,8920$) volt, miközben a demográfiai nyomás marginális maradt ($\Delta \ln P = +0,0443$). Az adatok kritikai szempontból cáfolják a Környezeti Kuznets-görbe (EKC) azon optimista feltételezését, miszerint a jóléti szint emelkedése automatikusan és elégséges mértékben mérsékli a környezeti terhelést (Karsch, 2019; Dinda, 2004; Ekins, 1997, Grossman–Krueger, 1991, Gyamfi et al., 2020).

Az abszolút szétválasztás formálisan ugyan megvalósult, mivel a teljes kibocsátás csökkent ($\Delta \ln \text{CO}_2 = -0,1710$, ami éves átlagban $-0,78\%$ -os ütemnek felel meg), ám ez a dinamika drasztikusan elmarad az IPCC (2014) által a 2°C -os stabilizációs pálya (450ppm) tartásához előírt éves átlagos $-0,0503$ log-egységes (megközelítőleg $-4,9\%$ -os) elvárt csökkenési ütemtől.

Bár az energetikai és technológiai hatékonyság javult (energiaintenzitás: $-0,4418$; karbonintenzitás: $-0,6658$), a megtakarítások jelentős részét a növekedésorientált gazdasági struktúra és a fogyasztás bővülése elnyelte. Ez a makrogazdasági viszapattanó hatás klasszikus manifesztációja (Sorrell, 2007), azaz a hatékonyságjavulás nem tudott áttörést elérni, mert a rendszer a relatív nyereséget azonnal volumenbővítésre fordította.

¹⁷ <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>

¹⁸ <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>

¹⁹ <https://data.worldbank.org/indicator/EN.GHG.CO2.RT.GDP.KD>

Az elvárt forgatókönyvek (3. és 4. oszlop) rávilágítanak a politikai-gazdasági dilemmára: a klímacélok eléréséhez vagy a technológiai dekarbonizációt kellett volna radikálisan felgyorsítani (a karbonintenzitás kumulált mutatóját $-0,9866$ -ra mélyítve), vagy a technológiai korlátokat elismerve az affluencia kumulált növekedését kellett volna $+0,5712$ értéken korlátozni.

Globális szintű dekompozíciós eredmények és a rendszerszintű fenntarthatatlanság

A globális gazdaság egészére lefolytatott dekompozíció (6. táblázat) még egyértelműbb képet fest a biofizikai korlátok és a technikai optimalizáció konfliktusáról.

6. táblázat

Globális Kaya-dekompozíciós mátrix és fenntarthatósági egyensúlyi pályák (2000–2023)

Dekompozíciós komponensek (tényezők)	Megfigyelt kumulált változás (Aln, 2000–2023)	Megfigyelt éves átlagos változás	Elvárt egyensúlyi pálya I. (Technológiai fókuszú elvárás)	Elvárt egyensúlyi pálya II. (Affluencia-fókuszú elvárás)
Teljes CO ₂ –kibocsátás (I)	+0,6260	+0,0284	–0,0503	–0,0503
1 főre jutó GDP ²⁰ USD/fő (A)	+0,8741	+0,0397	+0,8741	–0,8568
Népesség ²¹ fő (P)	+0,2687	+0,0122	+0,2688	+0,2688
Karbonintenzitás ²² (CO ₂ /E)	–0,2291	–0,0104	–2,2495	–0,2291
Energiaintenzitás (E/GDP)	–0,2877	–0,0131	–0,2877	–0,2877
Környezetterhelés éves átlagos változása	0,028463		–0,0503	–0,0503

Forrás: Saját számítás a World Bank (2026) adatbázisai alapján.

Globális léptékben az aggregált környezeti terhelés kumulált logaritmikus növekedése **+0,6260** volt, ami éves szinten $+2,84\%$ -os expanziós ütemet jelent. A kibocsátás-növekedés elsődleges mozgatórugója a globális népességnövekedés ($+0,2688$) és a globális affluencia-emelkedés ($+0,8741$) kumulált volumenhatása volt.

20 <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>

21 <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>

22 <https://data.worldbank.org/indicator/EN.GHG.CO2.RT.GDP.KD>

Ez a kombinált skálahatás teljes mértékben dominálta és felülírta a globális energiahatékonyság ($\Delta \ln(E/GDP) = -0,2877$) és a karbonintenzitás ($\Delta \ln(CO_2/E) = -0,2291$) javulásából eredő kedvező mérnöki hatásokat.

Az IPCC klímacélok eléréséhez szükséges elméleti pályák (3. és 4. oszlop) drasztikus strukturális beavatkozásokat feltételeznek: globális szinten vagy a karbonintenzitást kellett volna a megfigyelt érték csaknem tízszeresére, $-2,2495$ *kumulált log-értékre* leszorítani, vagy a növekedési kényszert feladva az anyagi jólét mutatóit kellett volna abszolút értékben csökkenteni ($\Delta \ln A = -0,8568$). Ez a többváltozós megközelítés egyértelművé teszi, hogy technokrata finomhangolással a planetáris határok destabilizációja globális szinten nem megállítható.

4.4 A fogyasztás- és termelésalapú kibocsátás, valamint a gazdasági szektorok emissziójának empirikus vizsgálata

A kutatás a területi (termelésalapú) adatokon túllépve integrálja a nemzetközi kereskedelmi áramlásokat tükröző fogyasztásalapú megközelítést (karbonlábnyom). Ezáltal kvantifikálhatóvá válik, hogy a megfigyelt emissziócsökkenés milyen mértékben tulajdonítható valós hatékonyságjavulásnak, és mekkora részben a karbonintenzív termelés kiszervezésének (*carbon leakage*). A fejezet emellett szektorális szinten dekomponálja a 2000–2023 közötti emissziós trendeket (ipar, közlekedés, szolgáltatások, lakosság). A strukturális mutatók alapján az EU tagállamait három országcsoportba soroljuk, feltárva a centrum–periféria relációk biofizikai korlátait, valamint a makrogazdasági visszapattanó hatások (*rebound effect*) jelenlétét.

Az empiria célja és módszertani keretei

Míg az előző fejezet az aggregált, területi alapú adatok dekompozíciójára fókuszált, ez a vizsgálat két kritikus dimenzió bevonásával dekonstruálja a látszólagos uniós sikereket:

1. *A termelés áthelyezésének hatása (Carbon Leakage)*: A területi (termelésalapú) és a karbonlábnyom-alapú (fogyasztásalapú) CO_2 -kibocsátás divergenciájának kvantifikálása.
2. *A szektorális heterogenitás*: Az EU-27 tagállamainak három strukturális országcsoportba szervezése a gazdasági ágazatok (ipar, szállítás, szolgáltatások, háztartások) kibocsátási trendjei alapján (2000–2023), feltárva a direkt és indirekt makrogazdasági visszapattanó hatásokat (*rebound effect*).

A vizsgálat módszertani alapját az *Our World in Data* (2024)²³ és a Világbank (2026) adatbázisai képezik. A nemzetközi intézmények által preferált termelés-alapú (territoriális) megközelítés kizárólag az adott ország földrajzi határain belül keletkező emissziót regisztrálja. Ezzel szemben a fogyasztásalapú megközelítés a területi kibocsátást korrigálja a nemzetközi kereskedelmi áramlásokkal. Amennyiben a fogyasztásalapú mutató meghaladja a termelésalapút, az adott régió nettó karbonimportőrnek tekintendő, ami a környezeti terhelés transznacionális kiszervezését igazolja.

4.4.1 A területi és fogyasztásalapú decoupling-divergencia az Európai Unióban

Az Európai Bizottság aktuális szakpolitikai célszámai (2024) – köztük a „Fit for 55” jogszabályi csomag és a 2040-re előírányzott 90%-os nettó üvegházhatású gáz csökkentési javaslat az 1990-es bázisévhez képest – mereven a területiális elszámolási logikára épülnek. Hivatalos jelentések szerint az EU teljes területi ÜHG-kibocsátása 2022-re 32,5%-kal csökkent 1990-hez képest. A zöld növekedési narratívák ezen a ponton azonban módszertani korlátokba ütköznek.

Az *Our World in Data* (2024) historikus adatsorai alapján az 1990 és 2023 közötti időszakban az EU-27 tagállamaira vonatkozóan a termelésalapú (területi) CO₂-kibocsátási indexe (ΔT) 3,87 milliárd tonnáról 2,51 milliárd tonnára, azaz 35,1%-kal csökkent:

$$\Delta T = \text{Kibocsátás-változás}_{\text{termelés alapú}} = \frac{T_{1990} - T_{2023}}{T_{1990}} = \frac{3,87 - 2,57}{3,87} = 0,351 \quad (2)$$

(ahol T a termelésalapú /területi/ CO₂-kibocsátása milliárd tonnában).

A fogyasztásalapú kibocsátás értékét úgy számítjuk ki, hogy a termelésalapú (területi) kibocsátást korrigáljuk a nemzetközi kereskedelmi áramlásokkal, azaz hozzáadjuk az importált javak előállításához köthető (külföldön realizálódott) emissziót, és levonjuk az exportált termékekbe ágyazott kibocsátást. Ha egy ország fogyasztásalapú mutatója meghaladja a termelésalapút, úgy az adott régió nettó szén-dioxid-importőrnek tekinthető²⁴. Amennyiben az EU-27 esetében ezt a fogyasztási szemléletet vesszük alapul, úgy az 1990-es 4,40 milliárd tonnás bázisérték (ΔF) 2022-re 3,47 milliárd tonnára csökkent, ami mindössze **21,1%-os** volumen-csökkenést jelent:

²³ <https://ourworldindata.org/co2-emissions>

²⁴ https://ourworldindata.org/grapher/consumption-co2-emissions?tab=chart&country=OWID_EU27~OWID_WRL

$$\Delta F = \text{Kibocsátás-változás}_{\text{fogyasztás alapú}} = \frac{F_{1990} - F_{2022}}{F_{1990}} = \frac{4,4 - 3,47}{4,4} = 0,211 \quad (3)$$

(ahol F a fogyasztásalapú CO₂-kibocsátás milliárd tonnában)

Az eredményekből megállapítható, hogy az Európai Unió strukturálisan nettó CO₂-importőr, mivel fogyasztásalapú kibocsátása érdemben magasabb, mint a termelésalapú kibocsátása.

A két elszámolási mód közötti strukturális rés (δ) rávilágít, hogy a területi alapon felmutatott kibocsátáscsökkenés jelentős része módszertani illúzió:

$$\delta = \frac{|\Delta T| - |\Delta F|}{|\Delta T|} = \frac{35,14\% - 21,13\%}{35,14\%} = 39,8\% \quad (4)$$

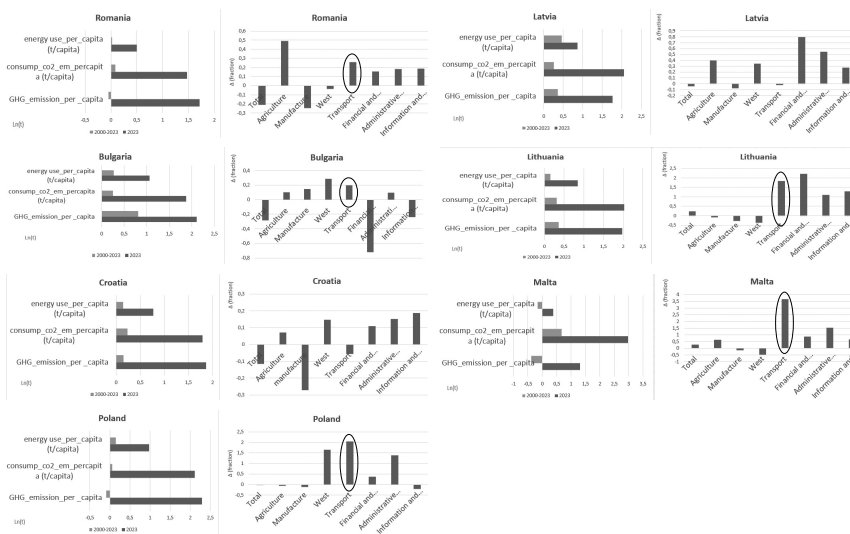
A fogyasztási szemléletet alkalmazva a területi alapon deklarált emissziómérséklődés mintegy 35–40%-a szertefoszlik. Ez az empirikus eredmény igazolja, hogy az EU-27 strukturálisan nettó karbonimportőr. A hazai sikerek több mint egyharmada nem a globális környezeti terhelés abszolút mérsékléséből, hanem a környezetileg destruktív, karbonintenzív termelési fázisok külföldre történő kiszervezéséből (*carbon leakage*) adódhat. *A látszólagos abszolút szétválasztás (decoupling) így valójában egy földrajzi és statisztikai illúzió, amely elrejt a transznacionális visszapattnó hatást.*

4.4.2 Szektorális dekompozíció és tipizálás az EU-27 tagállamaiban

Annak érdekében, hogy képet kapjunk a dekarbonizációs pályák egyenetlenségéről, az EU-27 tagállamait a 2000–2023 közötti szektorális és lábnyom-alapú trendjeik alapján három jól elkülöníthető strukturális csoportba soroltuk.

2. ábra

A gazdaság szerkezet alapú kibocsátásának alakulása a rebound effect értelmezésében: empirikus megfigyelések az I. országcsoportra vonatkozóan (2000–2023)



Forrás: Saját szerkesztés World Bank adatai alapján

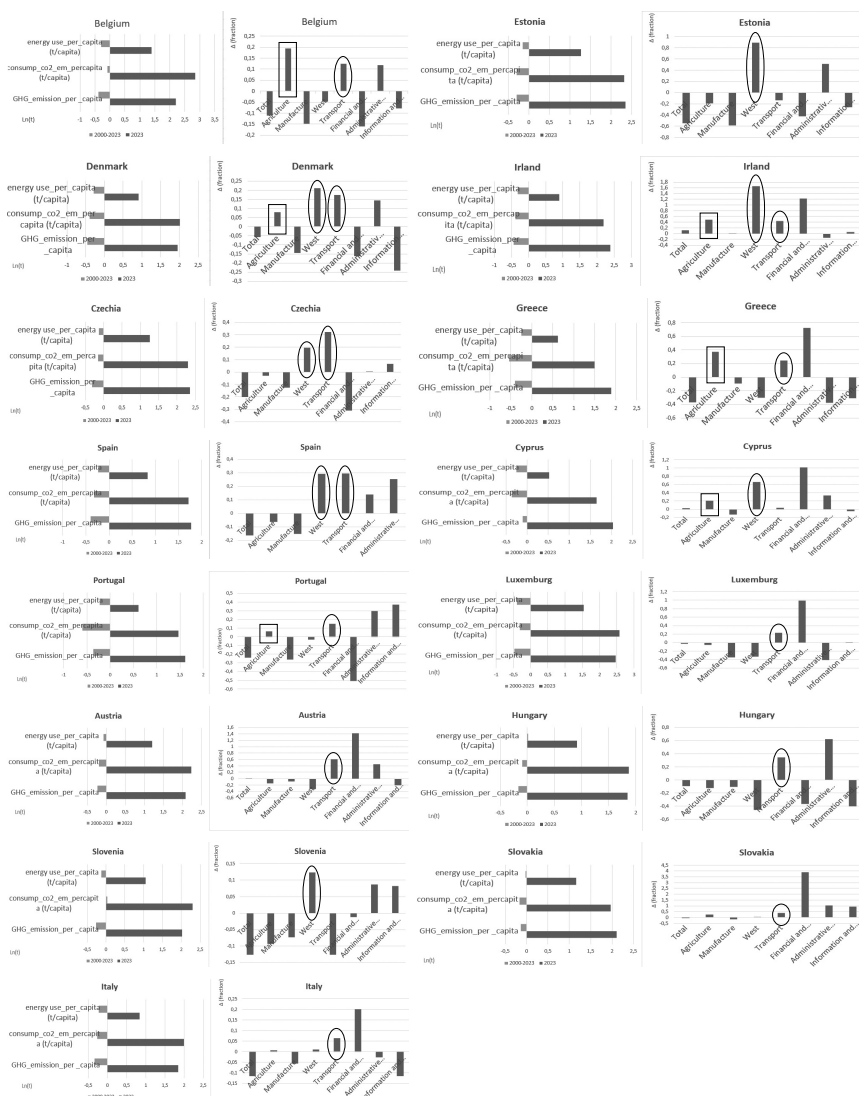
Az I. országcsoport (Periféria és felzárkózó gazdaságok)

Ide tartozik *Lettország, Litvánia, Románia, Bulgária, Horvátország, Málta és Lengyelország*. Ezen államok átmeneti makrogazdasági pályáját a skálahatás egyértelmű dominanciája jellemzi. Az empirikus adatok alapján az egy főre jutó energiafelhasználás és a termelésalapú (területi) CO₂-kibocsátás egymással párhuzamosan növekedett vagy stagnált. Ezzel egy időben a fogyasztásalapú emisszió szisztematikusan meghaladja a termelésalapút, különösen Lengyelország és Románia esetében.

A jelenség közvetve árnyalja Wiedmann és szerzőtársai (2020) megállapításait: miközben a magországok dezindusztrializációja kibocsátás-kiszervezést okoz, a felzárkózó periféria-országok pozíciója kettős terhelésű. Náluk a GDP-növekedést a hazai termelés expanziója és a karbonintenzív javak importja szimultán hajtja fel. Szektorális szinten a mezőgazdaság, a szállítás és a lakossági fogyasztáshoz köthető szolgáltatások kibocsátása emelkedett. Bár a harmadlagos szektorok közvetlen emissziója alacsonyabb, globális ellátási láncakon keresztül jelentős közvetett (indirekt) környezeti nyomást generálnak (Ivanova et al., 2016). Ebben a csoportban sem abszolút, sem relatív decoupling nem azonosítható.

3. ábra

A gazdaság szerkezet alapú kibocsátásának alakulása a rebound effect értelmezésében: empirikus megfigyelések a II. országcsoportra vonatkozóan (2000–2023)



Forrás: Saját szerkesztés World Bank adatai alapján

Megjegyzés: Heterogén ágazati elmozdulások és a fogyasztásalapú kibocsátás növekedése a stagnáló területi adatok mellett.

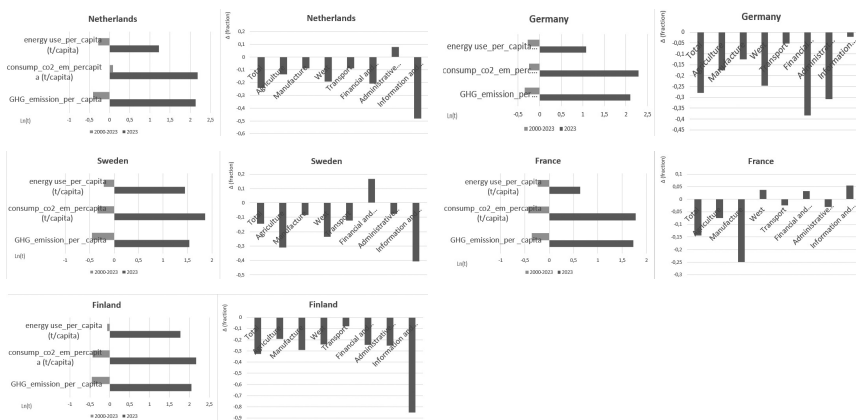
A II. országcsoport (Átmeneti és ingadozó dekarbonizációjú államok)

A második csoportba tartozó országok: *Luxemburg, Belgium, Írország, Ausztria, Észtország, Ciprus és Görögország* esetében az egy főre jutó energiafelhasználás és a területi emisszió mérséklődést vagy stagnálást mutat, azonban a fogyasztásalapú mutatók drasztikus növekedést vagy tartósan magas szintet jeleznek. Különösen Írország és Ciprus esetében szembetűnő a fogyasztási lábnyom elszakadása a hazai termelési adatoktól.

A szektorális bontás rávilágít, hogy miközben az ipari és energetikai szektorok hatékonysága javult, a közlekedés, a logisztika és a közvetlen lakossági fogyasztás emissziója emelkedett. Ez a direkt és indirekt rebound hatás tankönyvi mintája (Sorrell, 2009) kézirata szerint, amikor is az ipari energiahatékonyságból felszabaduló pénzügyi forrásokat a gazdasági szereplők a fokozott mobilitásra, kiterjedtebb digitális szolgáltatásokra és importált fogyasztási cikkekre fordították. Ebben a csoportban a szétválasztás csupán részleges, és a fogyasztási oldalon teljesen elenyészik.

4. ábra

A gazdaság szerkezet alapú kibocsátásának alakulása a rebound effect értelmezésében: empirikus megfigyelések a III. országcsoportra vonatkozóan (2000–2023)



Forrás: Saját szerkesztés World Bank adatai alapján

Megjegyzés: Strukturális dekarbonizáció a magországekban és a tartósan magas háztartási lábnyomok

A III. országcsoporth (az EU fejlett magországai)

Hollandia, Németország, Franciaország, Svédország és Finnország gyakran a fenntartható zöld növekedés és az abszolút decoupling globális mintapéldáiként jelennek meg a szakpolitikai diskurzusokban (EEA, 2023). Az adatok mélyebb, szektorális rétegei azonban itt is feltárják a biofizikai korlátokat. Bár Svédországban és Franciaországban a fogyasztásalapú kibocsátás is csökkenő trendet mutat a reál-GDP növekedése mellett, a primerenergia-felhasználásuk csupán marginálisan mérséklődött. Ez azt bizonyítja, hogy az elért eredmények nem az abszolút dematerializációnak, hanem az energiamix dekarbonizációjának (nukleáris és megújuló energia penetráció) köszönhetőek.

Németország és Hollandia esetében a fogyasztási alapú kibocsátás csökkenése lényegesen elmarad a termelésalapú kibocsátástól, megerősítve a tiszta környezet külföldre történő kiszervezésének tézisé (Wiedmann et al., 2020). Az ipari szektor közvetlen kibocsátásának visszaesését szinte mindenhol kompenzálja a növekvő digitális és szolgáltatási szektor (pl. adatközpontok, e-kereskedelem) transznacionális ellátási láncából eredő implicit energiaigény, ami az indirekt visszapattanó hatás markáns jelenlétét bizonyítja (Giampietro és Mayumi, 2018).

DISZKUSSZIÓ ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A fogyasztásalapú és szektorális adatok integrált elemzése kritikai élel cáfolja a technológia-fókuszú, zöld növekedési elméleteket.

Az adatok igazolhatják, hogy a gazdasági fejlettségtől (centrum-periféria elhelyezkedéstől) függetlenül a technológiai hatékonyságjavulás önmagában képtelen megfékezni a környezeti terhelést és az importkitettséget. Az I. csoport (periféria) a skálahatás miatt képtelen a szétválásra, míg a III. csoport (centrum) látszólagos sikerei mögött a karbonintenzív fázisok transznacionális kiszervezése és a nettó szén-dioxid-import állhat.

Az EU-27 szintjén kimutatott ~40%-os (egzaktan 39,8%-os) módszertani törésvonal a termelés- és fogyasztásalapú adatok között empirikus bizonyítékkal szolgálhat arra, hogy a makrogazdasági rebound-hatás és a szén-dioxid-szivárgás (*carbon leakage*) semlegesíti a relatív hatékonysági nyereséget. A zöld növekedés megvalósulása megkérdőjelezhető, mivel a lokális hatékonysági megtakarítások a növekedési kényszer és az anyagi affluencia miatt globális szinten újabb fogyasztást és rejtett ágazati kibocsátás-átcsoportosítást generálnak (Victor, 2019).

A fenntarthatósági átmenet elméleti és gyakorlati korlátja tehát nem a technológia fejletlenségében, hanem a növekedésorientált makrogazdasági struktúrában keresendő. Valódi abszolút szétválasztás globálisan zárt rendszerben technokrata

finomhangolással az eredmények alapján nem érhető el, ahhoz a fogyasztási szokások, a jövedelemeloszlás és a gazdasági volumen tudatos, strukturális korlátozására van szükség.

A Kaya-dekompozíció adatai szerint a technológiai hatékonyságjavulás üteme ($\Delta \ln(E/GDP) = -0,2877$; $\Delta \ln(CO_2/E) = -0,2291$) messze elmaradt a gazdasági skálahatásoktól. A Fix Hatású (FE) modellek alapján a megújuló energiaforrások részarányának növekedése szignifikánsan csökkenti az importfüggőséget ($\beta = -0,6647$), míg a végső energiafelhasználás bővülése drasztikus importnyomást generál ($\beta = 9,0823$). Az energiatermelékenység javulása szignifikáns pozitív együtthatót mutatott az importfüggőségre ($\beta = 6,2086$), igazolva, hogy a fajlagos költségcsökkenés extra gazdasági aktivitást és magasabb energiaimportot von maga után. Az eredmények alapján megállapíthatjuk, hogy a technológiai hatékonyságjavulás önmagában képtelen megfékezni a környezeti terhelést és az importkitettséget.

Az ökonometriai elemzés eredményei alapján az alábbiakat állapíthatjuk meg: Az Európai Unió tagállamaiban a technológiai alapú energiahatékonyságjavulás hosszú távon képtelen az abszolút környezeti terhelés csökkentésére. A kointegrációs PMG modellek adatai alapján az energaintenzitás javulását (E_GDP) kísérő relatív megtakarításokat a gazdasági rendszer belső növekedési kényszere átforgatja az abszolút energiafelhasználás növelésébe ($energy_use_per_capita$), ami semlegesítheti a technikai hatékonyság környezeti előnyeit. Közben a területi (termelésalapú) mutatók hosszú távon látszólagos abszolút szétválást jeleznek (1 főre jutó GDP) (PMG): $-0,11^{***}$, a fogyasztásalapú kibocsátás modellje bizonyítja, hogy a gazdasági növekedés hosszú távon is szorosan és szignifikánsan növeli a kibocsátást (1 főre jutó GDP) (PMG): $+0,28^{***}$. Ez igazolja, hogy az EU-27 országai nem függetlenítették magukat a környezeti korlátoktól, csupán a környezeti terhelést import ágenseken keresztül externalizálták. A PMG modell hibakorrekciós tagja ($COINTEQ = -0,2808^{***}$) szolgálhat bizonyítékkal arra, hogy a fogyasztásalapú emissziós rendszerben a rövid távú sokkok vagy zöld szakpolitikai beavatkozások után a rendszer rendkívül gyorsan, évente 28%-os sebességgel korrigál vissza a hosszú távú, növekedés-orientált egyensúlyi pálya felé. Ez az érték rávilágíthat arra, hogy a rebound-hatás (visszapattanás) nem egy véletlen hatás, hanem a piac rendszerszintű működése. Ha beavatkozunk a rendszerbe egy zöld technológiával, a piaci mechanizmusok (árak, profitvágy, kereslet) azonnal elkezdnek dolgozni azon, hogy ezt a megtakarítást növekedéssé alakítsák, és visszarántsák a gazdaságot a jól megszokott, magas kibocsátású pályára. Emiatt a rövid távú politikai sikerek hosszú távon elolvadnak. Míg a szolgáltató szektor térnyerése rövid távon strukturális súrlódásokat és átmeneti kibocsátásnövekedést okoz, hosszú távon ez az egyetlen olyan strukturális makrogazdasági változó, amely képes érdemben és radikálisan csökkenteni a fogyasztásalapú

emissziót (rugalmasság: $-0,56^{***}$), így a dematerializáció kulcsfontosságú eszköze a visszapattanó hatás részleges mitigációjának. Ha a szolgáltatások aránya a gazdaságban (a hozzáadott értékben) 1%-kal növekszik, az a lakosság teljes globális fogyasztási lábnyomát (fogyasztásalapú kibocsátását) közel 0,57%-kal csökkenti. Ez egy erős, statisztikailag szignifikáns hatás. *A zöld átállás igazi záloga nem az, hogy hatékonyabbá tesszük a nehézipart (mert a piac azt a növekedéssel kompenzálja), hanem az, ha a gazdaság motorját strukturálisan átrajjuk az anyaggyártásról a szolgáltatásokra.* Ez lehet az egyetlen olyan hosszú távú stratégia a modellek alapján, amely valóban képes csökkenteni a társadalom globális fogyasztási lábnyomát.

HIVATKOZÁSOK

- Al-Azzam, M. – Fajness, M. (2018): On the Estimation of the CO₂ Emission, Economic Growth and Energy Consumption Nexus Using Dynamic OLS in the Presence of Multicollinearity. *Sustainability*, 10(5), 1315. <https://doi.org/10.3390/su10051315>.
- Antal, M. – van den Bergh, J. C. J. M. (2016): Re-spending rebound: A macro-level assessment for OECD countries and emerging economies. *Energy Policy*, 95, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.04.018>.
- Barker, T. – Dagoumas, A. – Rubin, J. (2009): The macroeconomic rebound effect and the world economy. *Energy efficiency*, 2(4), 411–427. <https://doi.org/10.1007/s12053-009-9053-y>.
- Brockway, P. E. – Sorrell, S. – Semieniuk, G. – Heun, M. K. – Jackson, T. (2021): Energy efficiency and economy-wide rebound effects: A review of the evidence and its implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110781. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110781>.
- Callen, T. (2012): Gross domestic product: An economy's all. *International Monetary Fund: Washington, DC, USA*.
- Dietz, T. – Rosa, E. A. (1997): Effects of population and affluence on CO₂ emissions. *Proceedings of the national academy of sciences*, 94(1), 175–179.
- Dinda, S. (2004): Environmental Kuznets Curve hypothesis: A survey. *Ecological Economics*, 49(4), 431–455.
- Ehrlich, P. R. – Holdren, J. P. (1971): Impact of Population Growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive. *Science*, 171(3977), 1212–1217. <https://doi.org/10.1126/science.171.3977.1212>
- Ekins, P. (1997): The Kuznets curve for the environment and economic growth: examining the evidence. *Environment and planning a*, 29(5), 805–830.
- European Environment Agency (2023): Trends and projections in Europe 2023: Tracking progress towards Europe's climate and energy targets (EEA Report No. 07/2023). *Publications Office of the European Union*. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/181515>.
- European Commission. (2019): The European Green Deal. Brussels, 11 December 2019. COM(2019) 640 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640>.
- Font Vivanco, D. – Kemp, R. – van der Voet, E. (2016): How to deal with the rebound effect? A policy-oriented approach. *Energy Policy*, 94, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.054>.

- Giampietro, M. – Mayumi, K. (2018): Unraveling the complexity of the Jevons Paradox: The link between innovation, efficiency, and sustainability. *Frontiers in Energy Research*, 6, 349753. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00026>.
- Gillingham, K. (2014): Rebound effects. *The New Palgrave Dictionary of Economics*.
- Gillingham, K. – Rapson, D. – Wagner, G. (2016): The rebound effect and energy efficiency policy. *Review of environmental economics and policy*.
- Grossman, G. M. – Krueger, A. B. (1991): Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. *National Bureau of Economic Research Working Paper* No. 3914.
- Gyamfi, B. A. – Bein, M. A. – Ozturk, I. – Bekun, F. V. (2020): The moderating role of employment in an environmental Kuznets curve framework revisited in G7 countries. *Indonesian Journal of Sustainability Accounting and Management*, 4(2), 241â–248. <https://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database>.
- Hickel, J. – Kallis, G. (2020): Is green growth possible? *New Political Economy*, 25(4), 469–486. <https://doi.org/10.1080/13563467.2019.1598964>.
- International Energy Agency (2016): Energy Efficiency Market Report 2016. *OECD/IEA*. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-market-report-2016>.
- International Energy Agency (2022): Energy Efficiency 2022. *Paris: IEA*. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>.
- International Energy Agency. (2023). Energy Efficiency 2023. *IEA*.
- IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), *IPCC*, Geneva, Switzerland, 151. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- IPCC (2022) Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report. *Cambridge University Press*.
- IPCC (2014) Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the *Fifth Assessment Report* of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IRENA. (2023). Renewable Energy Statistics 2023. *International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi.
- Ivanova, D. – Barrett, J. – Wiedenhofer, D. – Macura, B. – Callaghan, M. W. – Creutzig, F. (2020): Quantifying the potential for climate change mitigation from consumption. *Environmental Research Letters*, 15(9), 093001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8589>.
- Jackson, T. (2009): Prosperity Without Growth: Economics for a Finite Planet. *Earthscan*.
- Jevons, W. S. (1865): The coal question: An inquiry concerning the progress of the nation and the probable exhaustion of our coal-mines. *Macmillan*.
- Jarvis, A. – King, C. W. (2024): Economy-wide rebound and the returns on investment in energy efficiency. *Energy efficiency*, 17(6), 60. <https://doi.org/10.1007/s12053-024-10236-7>.
- Kao, C. – Chiang, M.-H. (2000): On the estimation and inference of a cointegrated regression in panel data. In *Advances in Econometrics*, 15, 179–222.
- Karsch, N. M. (2019): Examining the validity of the environmental Kuznets curve. *Consilience*, (21), 32–50.
- Laurent, É. (2020): The European Green Deal: from growth strategy to social-ecological transition. *Social policy in the European Union: state of play*, 97–111.
- Meadows, D. H. – Meadows, D. L. – Randers, J. – Behrens, W. W. (1972): The limits to. *Growth*, 102, 27.
- OECD (2002): Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth. <https://doi.org/10.4236/ajibm.2022.126061>.

- Parrique, T. – Barth, J. – Briens, F., Kerschner, C. – Kraus-Polk, A., Kuokkanen, A. – Spangenberg, J. H. (2019): Decoupling debunked. Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability. A study edited by the *European Environment Bureau EEB*, 3.
- Peters, G. P. – Minx, J. C. – Weber, C. L. – Edenhofer, O. (2011): Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 108(21), 8903–8908. <https://doi.org/10.1073/pnas.1006388108>.
- Sorrell, S. (2007, October): The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency. <https://ukerc.ac.uk/publications/the-rebound-effect-an-assessment-of-the-evidence-for-economy-wide-energy-savings-from-improved-energy-efficiency/>.
- Sorrell, S. (2009): Jevons' paradox revisited: The evidence for backfire from improved energy efficiency. *Energy Policy*, 37(4), 1456–1469. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.12.003>.
- Suh, S. (2006): Are services better for climate change? *Environmental Science & Technology*, 40(21), 6555–6560. <https://doi.org/10.1021/es0609351>.
- United Nations Environment Programme (UNEP, 2011): Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication. Nairobi: *United Nations Environment Programme*. https://www.unep.org/resources/report/towards-green-economy-pathways-sustainable-development-and-poverty-eradication-10?utm_source=chatgpt.com.
- United Nations (2023): Global Sustainable Development Indicators Database: SDG Indicator 7.3.1 - Energy intensity measured in terms of primary energy and GDP [Data set]. *UN Statistics Division*. <https://unstats.un.org/sdgs/dataportal/>.
- Victor, P. A. (2008): Managing without growth: Slower by design, not disaster. In *Managing Without Growth*. Edward Elgar Publishing.
- Wiedenhofer, D. – Virág, D. – Kalt, G. – Plank, B. – Streeck, J. – Pichler, M. – Haberl, H. (2020): A systematic review of the evidence on decoupling of GDP, resource use and GHG emissions, part I: bibliometric and conceptual mapping. *Environmental research letters*, 15(6), 063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab842a>.
- Wiedmann, T. – Lenzen, M. – Keyßer, L. T. – Steinberger, J. K. (2020): Scientists' warning on affluence. *Nature Communications*, 11(1), 3107. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16941-y>.