

A GLOBÁLIS SZÉN-DIOXID-KIBOCSÁTÁST GENERÁLÓ FŐ HAJTÓERŐK

MAIN DRIVERS OF THE GLOBAL CO₂-EMISSION

Fazekas András István

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, fazekasai@energia.bme.hu

Összefoglalás. Bizonyított, hogy az erre vonatkozó mérések megkezdése óta rendkívül szoros korreláció van a légkör szén-dioxid tartalma és a globális átlaghőmérséklet alakulása között. Jelen rövid áttekintésben az a kérdés kerül megvizsgálásra, elemzésre, hogy milyen tényezők befolyásolják a (fosszilis tüzelőanyagokból származó) globális szén-dioxid-kibocsátás alakulását. Azaz milyen hajtóerők játszanak ebben meghatározó szerepet, és mekkora ezen tényezők (= hajtóerők) súlya a kibocsátás alakulásában, illetve milyen tendenciák jellemzik a kibocsátás, és ezen tényezők alakulását. Az áttekintés fő célkitűzése az, hogy rámutasson arra, milyen megállapítások vonhatók le a bemutatott idősorok, és az idősorok közötti korrelációk elemzéséből. Ez alapvető fontosságú, a globális felmelegedés elleni küzdelem reális lehetőségeinek felmérése, a lehetséges optimális eszközrendszer megválasztása szempontjából. A bemutatásra kerülő adatsorok a külföldi forrásokból ismertek, a tanulmány novuma azonban ezen adatsorok komplex összehasonlító elemzése és a következtetések explicit megfogalmazása.

Abstract. Since the start of the relevant measurements, it has been justified that there has been an extremely close correlation between the carbon-dioxide content of the atmosphere and the increase of the global average temperature. This brief overview examines what factors influence the development of global CO₂-emissions (from fossil fuels). What driving forces play a decisive role in this, what is the weight of these factors (= driving forces) in the development of output, and what tendencies characterize the development of these factors. The main objective of the review is to showcase what findings can be drawn from the analysis of the time series presented and the correlations between the time series. It is essential to assess the realistic possibilities for combating global warming and choose the optimal instruments. The data sets presented are known from international resources. The novum of the study is the complex comparative analysis of these data sets and the explicit formulation of the conclusions.

1. Problémafelvetés, célkitűzés

Közismert, hogy a légkör CO₂-tartalma és a globális átlaghőmérséklet között összefüggés van. Nem szorul bizonyításra, hogy az energetika és a széles értelemben vett környezetvédelem területén napjainkban a legsúlyosabb probléma a globális felmelegedés és ezzel szoros összefüggésben a globális klímaváltozás problémája (Robertson, 2014; Caradonna, 2014; Reményi, 2010; Fagan, 2012; Behringer, 2010). Mindkét folyamat, eredetét és hatását tekintve globális eredetű és globális hatású. Ebből következően a megoldás, a következmények csökkentésére tett erőfeszítések is csak széles körű összefogás esetében hozhatnak jelentős eredményt.

Jelen rövid áttekintésben az a kérdés kerül megvizsgálásra, elemzésre, hogy milyen tényezők befolyásolják a (fosszilis tüzelőanyagokból származó) globális szén-dioxid-kibocsátás alakulását? Azaz milyen hajtóerők játszanak ebben meghatározó szerepet, és mekkora ezen tényezők (= hajtóerők) súlya a kibocsátás alakulásában, illetve milyen tendenciák jellemzik a kibocsátás, és ezen tényezők alakulását. Az áttekintés fő célkitűzése az, hogy rámutasson arra, milyen megállapítások vonhatók le a bemutatott idősorok és az idősorok közötti korrelációk elemzéséből. Ez alapvető fontosságú, a globális felmelegedés elleni küzdelem reális lehetőségeinek felmérése, a lehetséges optimális eszközrendszer megválasztása szempontjából. A bemutatásra kerülő adatsorok a külföldi forrásokból ismertek, a tanulmány novuma azonban ezen adatsorok komplex összehasonlító elemzése és a következtetések explicit megfogalmazása.

2. A jelenlegi helyzet rövid áttekintése

A Nemzetközi Energiaügynökség (International Energy Agency, IEA) legfrissebb jelentése (IAE, 2021) szerint 2020-ban a világ (fosszilis tüzelőanyagokból származó) szén-dioxid kibocsátása 5,8 százalékkal csökkent a 2019. évihez képest, azaz abszolút értékben cca. 2 milliárd tonnával volt kisebb, mint az előző évben. Ez a csökkenés a legnagyobb mértékű csökkenés azóta, amióta ezt a folyamatot nyomon követik, és jóval meghaladja a 2009. évi globális világgazdasági válság okozta kibocsátás-csökkenést (IAE, 2020). A változás alapvetően a világméretű COVID-19 járvány következményének tudható be. Ezen igen jelentős kibocsátás-csökkenés ellenére a világ éves összes szén-dioxid-kibocsátása 2020-ban 31,5 milliárd tonna volt, és a földi légkörben az éves átlagos szén-dioxid koncentráció értéke a valaha mért legmagasabb értéket érte el (412,5 ppm). Ez az érték mintegy 50%-kal haladta meg az ipari forradalom kezdetére becsült értéket.

3. A légköri globális szén-dioxid-kibocsátást befolyásoló hajtóerők

A globális szén-dioxid-kibocsátás alakulását „befolyásoló tényezők” alatt olyan „tényezők” értendők, amelyek változása valamilyen irányban szoros korrelációban van a szén-dioxid-kibocsátás alakulásával. Példaképpen a világ népességének alakulása alapvető befolyásoló tényező, vagyis „hajtóerő”, hiszen minden energiatermelés és energiafelhasználás – közvetve vagy közvetlenül – az emberi igények kielégítését szolgálja. Lényegi és közös meghatározottságuk

azonban ezen hajtóerőknek, hogy soha nem önmagukban, hanem más hajtóerőkkel együtt befolyásolják egy adott országot, régió szén-dioxid-kibocsátásának alakulását. Könnyen belátható, hogy a népesség számának alakulása mellett annak is döntő szerepe van a szén-dioxid-kibocsátás alakulásában, hogy egy adott országban milyen bázison történik a villamosenergia-termelés, vagy éppenséggel a hőtermelés. A vízerőművi vagy atomerőművi villamosenergia-termelésnek nincs közvetlen szén-dioxid-kibocsátása szemben például a lignit tüzelő-bázisú villamosenergia-termeléssel. Világosan látni kell azt is, hogy nagyon sok hajtóerő azonosítható, és azt is, hogy az azonosított hajtóerők nem egyenlő „súllyal” (= mértékben) befolyásolják a kibocsátás alakulását. Fontos szempont az is, hogy olyan hajtóerőket kell azonosítani, amelyek hatása megbízhatóan kvantifikálható. A lakosság számának alakulása és az energiafelhasználás (és ezzel szoros összefüggésben a szén-dioxid-kibocsátás) alakulása közötti összefüggés jól számszerűsíthető. Azonban nem ez a helyzet például abban az esetben, ha azt szeretnénk megtudni, hogy milyen szerepe van a környezettudatosságnak a szén-dioxid-kibocsátás alakulásában. Ennek a „hajtóerőnek” a hatása egzakt módon nem számszerűsíthető, nem állnak rendelkezésre erre vonatkozóan adatok.

Az alapkérdés megválaszolása tehát valójában több kérdés megválaszolását foglalja magában. Mindenekelőtt azonosítani kell a hajtóerőket, és valamilyen módon meg kell határozni azt, hogy az egyes azonosított hajtóerők milyen súllyal játszanak szerepet a kibocsátás alakulásában.

Nem szorul bizonyításra, hogy gyakorlatilag nagyon sok tényező befolyásolja a globális szén-dioxid-kibocsátás alakulását. Nem belemenve ezen kérdéskör elméleti vizsgálatába, ebben az összefoglaló áttekintésben az ún. Kaya-egyenletben (Kaya-azonosságban) szereplő (és ahhoz szorosan kapcsolódó) hajtóerők elemzésére kerül sor. Ennek alapján belátható, hogy a kiválasztott hajtóerők valóban alapvetően meghatározó szerepet játszanak a globális kibocsátás alakulásában, másrészt az, hogy hatásuk egzakt módon számszerűsíthető. Az ún. Kaya-egyenlet (Jancovici, 2014) alkalmazásával a globális szén-dioxid-kibocsátás legfontosabb hajtóerői egymáshoz képesti alakulása követhető nyomon egzakt módon.

4. A vizsgálat tárgyát képező idősorok

A Kaya-egyenletben a globális szén-dioxid-kibocsátást alapvetően meghatározó hajtóerők idősorai szerepelnek, mint bemenő adatok. Ezen idősorok az ún. bázis idősorok. Idősorok alatt az adott mennyiségek adott időszakra (például: évre) vonatkozó adatainak (időben) rendezett halmaza értendő.

Bázis idősoroknak a továbbiakban a P (világ népessége), a G (a világ éves GDP-termelése), az E (a világ éves halmozatlan primerenergia-felhasználása), valamint a C (a világ fosszilis tüzelőanyagok eltüzeléséből származó éves szén-dioxid-kibocsátása) mennyiségek tárgyidőszakbeli alakulását leíró idősorok tekintendők. Származtatott idősorok a bázis

idősorokból képzett G/P, E/G, C/E, C/G, C/P és E/P idősorok. A vizsgálat tárgyát tehát összesen tíz idősor képezi.

5. A Kaya-egyenlet (Kaya-azonosság)

Soron következő lépésként röviden ismertetésre kerül az úgynevezett Kaya-egyenlet (Kaya-azonosság), majd ezt követően meghatározásra kerül az, hogy a Kaya-egyenletben szereplő mennyiségek (hajtóerők) egymáshoz viszonyítva milyen súllyal bírnak a globális szén-dioxid-kibocsátás generálásában. A számítás a Kaya-egyenletből adódó összefüggésekkel történik.

A Kaya-egyenlet alkalmazása meghatározó szerepet játszik a globális szén-dioxid-kibocsátás jövőbeli lehetséges alakulásával kapcsolatos különböző scenáriók kialakításában, az IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change (Éghajlatváltozási Kormányközi Testület)) által készített különböző jelentésekben (tanulmányokban). A Kaya-egyenlet megalkotása Yoichi Kaya japán energia-közgazdász nevéhez fűződik, aki az összefüggést először a Keiichi Yokoborival közösen írt „Environment, Energy, and Economy: Strategies for Sustainability” (Kaya and Yokobori, 1997) című könyvében publikálta először. Ez a könyv lényegében a „Conference on Global Environment, Energy, and Economic Development” (1993: Tokyo, Japan) konferencia legfontosabb megállapításait összegezi. A szerző az egyenlet lényegét később ismertette a „Japanese Perspectives on Climate Change Mitigation Strategy” című könyvében is (Kaya et al., 2015). A Kaya-egyenlet és annak alkalmazása tehát majd három évtizedes múltra tekint vissza, és a klímaváltozással, a globális felmelegedés problémájával foglalkozó szakemberek körében nem ismeretlen. Azonban megalapozottan kijelenthető, hogy Magyarországon az egyenlet (az egyenlet lényegi állítmánya), és az IEA említett kiadványában (IEA, 2020, 2021) foglalt legfontosabb megállapítások csak a témával foglalkozó szakemberek szűk körében ismertek, szélesebb körben gyakorlatilag ismeretlenek, jöllehet az IEA kiadványban szereplő megállapítások igen nagy fontosságúak a globális felmelegedés megítélése, és a probléma lehetséges kezelése szempontjából. Yoichi Kaya egyik fő kutatási területe annak a kérdéskörnek a vizsgálata, hogy milyen alapvető tényezők (hajtóerők) befolyásolják az egyes országokban, régiókban, globálisan a szén-dioxid-kibocsátás alakulását, s milyen módon lehet ezen hajtóerők hatását számszerűsíteni (Kaya and Yokobori, 1997; Kaya et al., 2015).

A Kaya-egyenlet alap gondolata az, hogy a fosszilis tüzelőanyagok kibocsátásából származó szén-dioxid-kibocsátás alakulását alapvetően négy fontos mutató (egy extenzív és három intenzív) mennyiség alakulására vezeti vissza. Az egyenlet alkalmazásával meghatározható az, hogy ezek a hajtóerők egymáshoz képest milyen módon (melyik irányban és milyen sebességgel) befolyásolják a globális kibocsátás alakulását. Az a kiinduló állítás, hogy bizonyíthatóan magas korreláció van egy adott országban, és értelemszerűen országok összességében, így globálisan is, az alábbi, megbízhatóan és jól számszerűsíthető, mennyiségek és a mindenkori szén-dioxid-kibocsátás között:

- lakosság száma (1 jelű hajtóerő: (P));
- az egy főre jutó nemzeti össztermék (2 jelű hajtóerő: (G/P));
- a nemzeti össztermékre vetített energia-intenzitás, vagyis az egységnyi nemzeti össztermékre eső fajlagos energiafelhasználás (3 jelű hajtóerő: (E/G)); valamint az
- energiafelhasználás karbon-intenzitása, vagyis az egységnyi energiafelhasználásra jutó szén-dioxid-kibocsátás (4 jelű hajtóerő: (C/E)) között.

Az említett három intenzív és egy extenzív mennyiség segítségével történik az úgynevezett Kaya-egyenlet (azonosság) felírása:

$$C = P * \left(\frac{G}{P}\right) * \left(\frac{E}{G}\right) * \left(\frac{C}{E}\right)$$

Az összefüggés matematikai alakjából látható, hogy tulajdonképpen egy azonosság felírásáról van szó, ez magyarázza, hogy hol „Kaya-egyenletről”, hol „Kaya-azonosságról” beszélnek.

6. Bázis idősorok elemzése

Az IEA (IEA 2020, 2021) adatai alapján rendelkezésre állnak a P, G, E és C mennyiségek alakulását leíró idősorok az 1971–2017 közötti 47 éves időszakra vonatkozóan (Robertson, 2014). A tárgyidőszakra, illetve annak bizonyos részeire vonatkozó adatok természetesen más forrásokból is rendelkezésre állnak. Ezek azonban az adatgyűjtés és feldolgozás módszertanát illetően egymástól jelentősen különböznek (International Energy Association, 2019). Az eltérések az IEA adatokhoz képest arányukat tekintve nem jelentősek. A bázis idősorok konzisztens idősorok, ami alatt az értendő, hogy az adatok értelmezése, gyűjtése, feldolgozása egységes elvek, módszerek szerint történt. Az adatgyűjtésre, az ún. kulcsfontosságú hajtóerők kiválasztására vonatkozó irányelvek és módszerek részletes leírása (többek között) megtalálható a „Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change” című kiadványban, annak is az ötödik, „Drivers, Trends and Mitigation” című részében, illetve a „CO2 Emission from Fuel Combustion, Highlights” című (2019 Edition) IEA kiadványban (6. fejezet: „Indicator Sources and Methods”).

Közel ötven évre egész pontosan az 1971–2017 közötti 47 esztendőre vonatkozóan rendelkezésre álló konzisztens adatok megalapozottan lehetővé teszik a hosszú távú,

SSZ.	MEGNEVEZÉS	MEGHATÁROZÁS	MÉRTÉKEGYSÉG
BÁZIS IDŐSOROK			
01	Fosszilis tüzelőanyagokból származó, éves globális szén-dioxid-kibocsátás (C)	—	Mt _{CO2} /a
02	A világ népessége (P)	—	Ezer millió fő (cap)
03	A világ éves GDP-termelése 2010. évi változatlan USA dollárban, vásárlóerő paritáson (ppp) számolva (G)	—	Milliárd USD _{2010ppp} /a
04	A világ éves, halmozatlan primerenergia-felhasználása (E)	—	PJ/a
SZÁRMAZTATOTT IDŐSOROK			
05	Egy főre jutó éves, globális GDP-termelés átlaga, 2010. évi amerikai dollárban, vásárlóerő paritáson kifejezve	G/P	USD _{2010ppp} /cap/a
06	Energia-intenzitás globális átlaga (egységnyi globális GDP-termelésre jutó éves, halmozatlan összes primerenergia-felhasználás, 2010. évi amerikai dollárban, vásárlóerő paritáson kifejezve)	E/G	MJ/USD _{2010ppp} /a
07	Globális éves halmozatlan primerenergia-felhasználás karbon-intenzitása (egységnyi éves, globális, halmozatlan primerenergia-felhasználásra jutó éves globális szén-dioxid-kibocsátás)	C/E	t _{CO2} /TJ/a
08	Egységnyi globális, éves GDP-termelésre jutó átlagos szén-dioxid-kibocsátás, vagyis az átlagos éves globális GDP-termelés karbon-intenzitása, 2010. évi változatlan USA dollárban és vásárlóerő paritáson kifejezve	C/G	kg _{CO2} /USD _{2010ppp} /a
09	Egy lakosra jutó éves szén-dioxid-kibocsátás globális átlaga	C/P	t _{CO2} /cap/a
10	Egy főre jutó éves halmozatlan primerenergia-felhasználás globális átlaga	E/P	MJ/cap/a

1. táblázat. A vizsgált idősorok.

A BÁZIS IDŐSOROK LEGFONTOSABB JELLEMZŐI					
MEGNEVEZÉS	Abszolút értékbeli változás		Százalékos eredő változás (1971 = 100 %) 1971 – 2017	Éves átlagos változás százalékban (1971 – 2017)	Tendencia (1971 – 2017)
	1971	2017			
C [Mt _{CO₂} /a] Éves globális, fosszilis tüzelőanyagokból származó szén-dioxid-kibocsátás	13 945	32 840	235,5 %	+1,84 %/a	Tendenciájában egyértelműen növekvő éves kibocsátás, nem utal semmi a tartós változásra. Az évenkénti változás alapvetően véletlenszerű (sztochasztikus).
P [Millió fő (cap)] A világ népessége	3 761	7 519	199,9 %	+1,48 %/a	Egyértelműen szigorúan monoton növekvő népesség, nem utal semmi a tartós változásra. Az évenkénti változás (növekedés) mértéke tendenciájában csökkenő.
G [Milliárd USD _{2010ppp} /a] Globális éves GDP-termelés 2010. évi változatlan USA dollárban, vásárlóerő paritáson kifejezve	23 888	113 555	475,3 %	+3,37 %/a	Tendenciájában egyértelműen növekvő éves GDP-termelés, nem utal semmi a tartós változásra. Az évenkénti változás mértéke véletlenszerű (sztochasztikus).
E [PJ/a] Globális, éves, halmozatlan primerenergia-felhasználás	231 088	584 990	253,1 %	+ 1,99 %/a	Tendenciájában egyértelműen növekvő energiafelhasználás, nem utal semmi a tartós változásra. Az évenkénti változás mértéke véletlenszerű (sztochasztikus).

2. táblázat. A bázis idősorok fő jellemzői.

a folyamatokat valóban lényegileg meghatározó trendek (tendenciák) megállapítását. Minden egyes idősor esetében megvizsgálásra került:

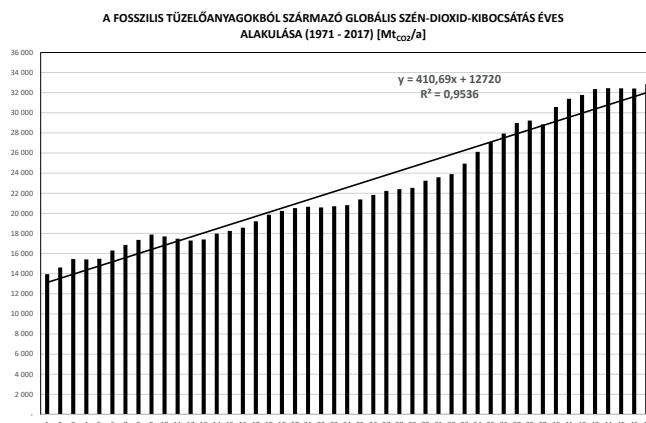
1. az adott mennyiség abszolút értékének időbeli alakulása,
2. az adott mennyiség bázis évhez (1971 = 100%) viszonyított százalékos változása,
3. az adott mennyiség évenkénti, a mindenkori megelőző évhez viszonyított százalékos változása.

Természetesen még számtalan egyéb vizsgálatnak is alávetették ezek az adatsorok, de első közelítésben az így nyert alapvető megállapítások is elegendőek (*International Energy Association, 2019; Climate Change 2014; International Energy Agency, 2019*).

Az 1. táblázat összefoglalóan tartalmazza a vizsgálat tárgyát képező bázis idősorok és származtatott idősorok megnevezését, meghatározását és az adott mennyiségek mértékegységét.

Az egyszerű és gyors áttekinthetőség kedvéért az 2. táblázat összefoglalja a bázis idősorok alakulását jellemző főbb adatokat.

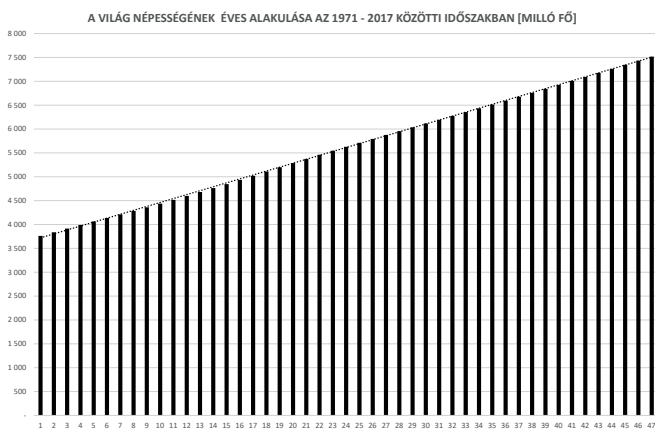
A globális éves szén-dioxid-kibocsátás alakulását az 1971–2017 közötti időszakban az 1. ábra mutatja. A fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből származó éves globális szén-dioxid-kibocsátás a vizsgálat tárgyát képező 47 éves időszakban 1971. évi, hozzávetőlegesen 14 milliárd tonnáról 2017-re közel 33 milliárd tonnára növekedett, ami azt jelenti, hogy közel fél évszázad alatt 2,35-szörösére nőtt. Ez igen jelentős növekedés. Ez a változás 47 év átlagában nagyjából 1,84%-os éves relatív (átlagos) növekedésnek felel meg.



1. ábra. A globális szén-dioxid-kibocsátás tárgyidőszakbeli alakulása.

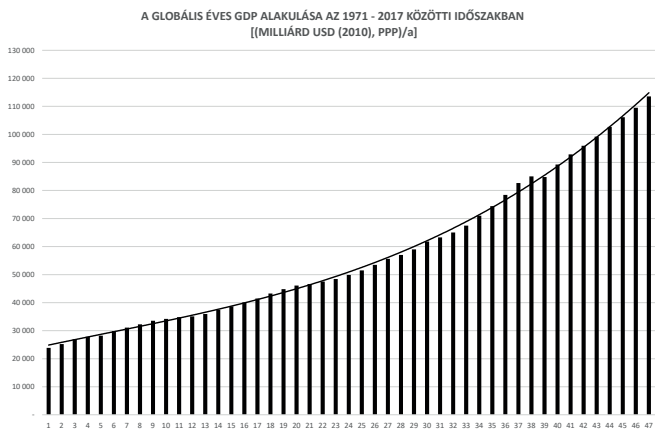
Természetesen a 47 év alatt az éves növekedés relatív értéke korántsem volt állandó. Az éves százalékos változások mértékében jelentős különbségek adódtak az elmúlt közel fél évszázadban. Voltak olyan évek, amikor az éves (előző évi értékhez viszonyított) növekedés öt százalék körüli volt, sőt nem is olyan régen a hat százalék körüli értéket is elérte, de voltak olyan évek (8 év összességében), amikor az előző évi értékhez képest a kibocsátás csökkent. Összességében az éves relatív változások teljességgel véletlenszerűen alakultak.

A világ népességének alakulását a 2. ábra mutatja a vizsgált tárgyidőszakban. A tárgyidőszak kezdetén (1971-ben) a Föld népessége 3761 millió főt tett ki. 2017-re ez az érték 7519 millió főre nőtt, ami gyakorlatilag azt jelenti, hogy a világ lakossága 47 év alatt megduplázódott. Éves átlagban ez a változás 1,48%-os növekedésnek felel meg. A népesség növekedése a vizsgált tárgyidőszakban szigorúan monoton növekvő volt. Semmilyen jel nem utalt a tendencia változására. Az előző évhez, mint bázisértékhez viszonyított növekedés alakulását illetően azonban egyértelműen megállapítható, hogy a világ lakosságának éves bázison vett relatív növekedése szigorúan monoton csökkenő.



2. ábra. A világ népességének tárgyidőszakbeli alakulása.

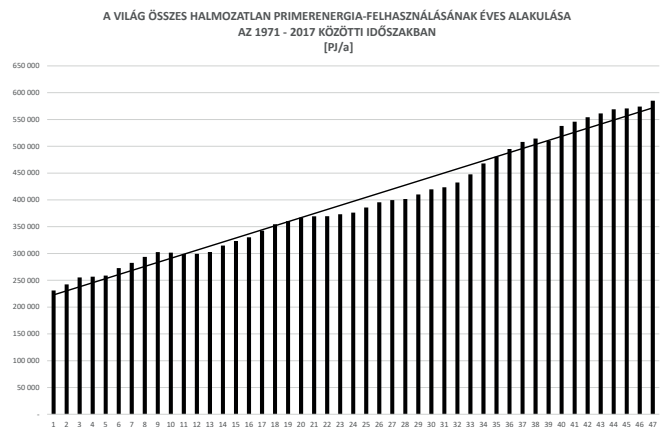
A világ 2010. évi konstans USA dollárban ppp (purchasing power parity: vásárlóerő paritás) értéken számolt globális GDP-termelése igen jelentős ütemben növekedett a tárgyidőszakban. Az 1971. évi 23 888 milliárd USD értékről 47 év alatt 113 555 milliárd USD értékre változott, ami a 475 százalékos eredő növekedésnek felel meg (3. ábra). A globális GDP-termelés átlagos éves bővülése 3,37% volt.



3. ábra. A globális GDP-termelés tárgyidőszakbeli alakulása.

A globális GDP-termelés évenkénti relatív változása igen változóan alakult, +7%/év és -0,2%/év közötti tartományban ingadozott. A 47 év alatt mindössze egyetlen évben, a 2008-as globális válság következtében zsugorodott a Föld GDP-termelése.

A világ éves halmozatlan összes primerenergia-felhasználása a szén-dioxid-kibocsátással majdnem azonos mértékben növekedett. 1971-ben az összes energiafelhasználás 231 088 PJ volt, és ez az érték 2017-re 584 990 PJ-ra változott, ami 253%-os eredő növekedésnek felel meg (4. ábra). A felhasználás éves átlagos bővülése 1,99% körüli értéknek felel meg. Az előző évhez, mint bázisévhez viszonyított százalékos változások teljességgel véletlenszerűen alakultak.



4. ábra. A globális összes halmozatlan primerenergia-felhasználás alakulása.

7. A származtatott idősorok elemzése

Származtatott idősorok alatt a bázis idősorokból képzett idősorok értendők. A vizsgálat szempontjából a 3. táblázatban foglalt idősorok elemzése bír fontossággal. A táblázat az 1. táblázattal azonos felépítésű, ugyanazokat az alapvető információkat tartalmazza az egyes idősorokról.

MEGNEVEZÉS		R ÉRTÉKE
C: E	Szén-dioxid-kibocsátás: Energiafelhasználás	0,996889942
C: G	Szén-dioxid-kibocsátás: GDP termelés	0,993846318
C: P	Szén-dioxid-kibocsátás: Népesség	0,976221918
E: P	Energiafelhasználás: Népesség	0,989453535
E: G	Energiafelhasználás: GDP termelés	0,990553865
P: G	Népesség: GDP termelés	0,971481265

3. táblázat. A bázis idősorok közötti korreláció alakulása.

Az általános anyagi jólétet (életszínvonalat) komplex módon jellemző G/P érték a vizsgálati tárgyidőszakban a globális szén-dioxid-kibocsátással majdnem pontosan azonos mértékben nőtt, 47 év alatt az 1971. évi érték 2,38-szorosára változott. Abszolút értékben ez azt jelenti, hogy az egy főre jutó éves globális GDP-termelés 6351 USD/fő/év értékről 15103 USD/fő/év értékre változott. A változás (néhány évtől eltekintve) majdnem szigorúan monoton növekvő volt. Az előző évre, mint bázisévre vonatkoztatott relatív változások sztochasztikusan alakulnak, összességében azonban lassan növekedtek.

Az egységnyi GDP-termelésre jutó energiafelhasználás igen jelentősen változott a vizsgált tárgyidőszakban. 47 év alatt közel a felére csökkent. 2017-ben az értéke 5,15 MJ/USD_{2010ppp}/év volt. A tárgyidőszakbeli változást (néhány évtől eltekintve) szigorúan monoton csökkenés jellemzi. Semmi jel nem mutatott e tendencia tartós változására. Az éves relatív változások azonban sztochasztikusan alakultak, tendenciájukban azonban az éves relatív csökkenések mértéke növekvő.

Az éves globális halmozatlan összes primerenergia-felhasználás karbon-intenzitása (vagyis az egységnyi éves halmozatlan összes primerenergia-felhasználásra jutó szén-dioxid-kibocsátás) abszolút értéke nagyon lassan ugyan, de csökkent valamelyest a tárgyidőszakban (60,3 t_{CO2}/TJ/év értékről 56,1 t_{CO2}/TJ/év értékre változott). Semmi jel nem utalt e tendencia megváltozására. Az éves (előző évre, mint bázisra vonatkoztatott) relatív változások enyhén növekvő tendenciát mutatnak.

Az egységnyi globális GDP-termelésre jutó éves átlagos szén-dioxid-kibocsátás, vagyis az átlagos éves globális GDP-termelés karbon-intenzitása (két évtől eltekintve) szigorúan monoton csökkenést mutatott a tárgyidőszakban, a vizsgált tárgyidőszakban a felére csökkent. Semmi nem utalt e tendencia tartós változására. Az éves relatív (előző évre, mint bázisra vonatkoztatott) változások teljességgel véletlenszerűen alakulnak, tendenciájukban azonban lassan növekvő csökkenést mutatnak.

Az egy lakosra jutó éves szén-dioxid-kibocsátás globális átlaga a tárgyidőszakban változóan alakult, összességében mérsékelten növekedett, 3,71 t_{CO2}/fő/év értékről 4,37 t_{CO2}/fő/év értékre változott. Ez a változás 17,7 százalékos tárgyidőszakbeli növekedésnek felel meg. Az egyes években a relatív (előző évre, mint bázisra vonatkoztatott) változások véletlenszerűen alakulnak, összességében enyhén növekvő tendenciát mutatnak.

Az egy főre jutó éves halmozatlan összes primerenergia-felhasználás globális átlaga a tárgyidőszakban véletlenszerűen változott, összességében azonban lassan növekvő tendenciát mutatott. A tárgyidőszakban 26,6 százalékkal nőtt az egy főre jutó energiafelhasználás globális átlaga, ami abszolút értékben azt jelentette, hogy a fajlagos energiafelhasználás 64 MJ/fő/év értékről 77,8 MJ/fő/év értékre emelkedett. Az egyes években a relatív (előző évre, mint bázisra vonatkoztatott) változások mértéke enyhén csökkenő növekedést mutat. A tárgyidőszakbeli átlagos változási sebessége -0,504%/év.

8. A idősorok közötti sztochasztikus kapcsolat vizsgálata

A bázis idősorok és a származtatott idősorok közötti korreláció értékét a 4. táblázat tartalmazza.

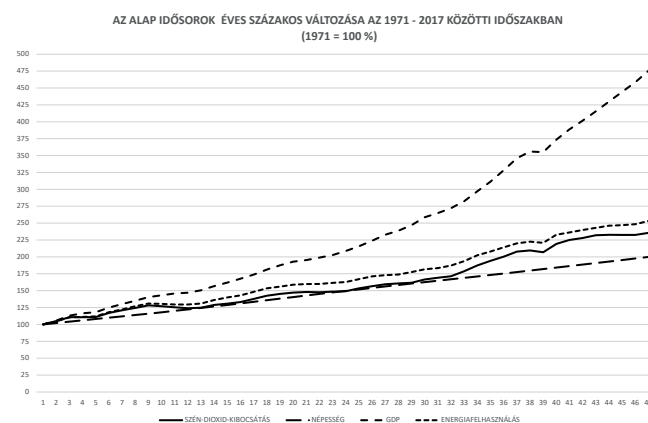
A táblázatban foglalt értékek alapján egyértelműen megállapítható, hogy a bázis idősorok közötti korreláció igen szoros. Ez arra utal, hogy az említett befolyásoló tényezők (hajtóerők) változása irányát tekintve megegyezik. Egyértelműen megalapozott tehát az a kijelentés, hogy

ezek a hajtóerők meghatározó szerepet játszanak a légkörben levő (fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből) származó szén-dioxid mennyiségének alakulásában. A származtatott idősorok közötti sztochasztikus kapcsolat is igen erős, az R értéke 0,961 és 0,995 tartományban van. Mindezek alapján megállapításra és bizonyításra került, hogy a C sztochasztikus idősort eredményváltozóként tekintve, a (P), (G) és (E) sztochasztikus idősorokat pedig tényezőváltozóként tekintve rendkívül szoros korreláció áll fenn a (C)-(P), a (C)-(G) valamint a (C)-(E) idősorok között, azaz az említett kétféle változó korreláció értéke egyhez nagyon közeli érték.

Alapvető fontosságú azonban általánosságban annak kiemelt hangsúlyozása, hogy a sztochasztikus változók közötti korreláció nem jelent egyben szükségszerűen ok-okozati összefüggést a változók között. Az azonban bizonyíthatóan állítható, hogy ha két véletlen változó között ok-okozati összefüggés van (azaz az egyik változó mennyiségének a változása következménye a másik változó mennyisége változásának), akkor a két változó közötti korreláció értéke +1-hez, vagy -1-hez nagyon közeli, esetleg azzal megegyező érték. Egy példával megvilágítva az elmondottakat: az elmúlt ötven évben a világon kvázi folyamatosan növekedett az eladott Coca-Cola mennyisége, és ugyancsak kvázi folyamatosan növekedett a globális szén-dioxid-kibocsátás. A két véletlen idősort alkotó véletlen változók közötti korreláció bizonyíthatóan egyhez nagyon közeli érték, de józan ésszel semmiképpen nem gondolható, hogy a két sztochasztikus folyamat között bármiféle ok-okozati összefüggés lenne. Vagyis a korreláció önmagában nem jelent szükségszerűen ok-okozati összefüggést a két véletlen változó értékeinek alakulása között. Az azonban minden esetben kijelenthető, hogy amennyiben két véletlen változó között bizonyított ok-okozati összefüggés van, akkor a közöttük levő korreláció nagyon erős. Ezt minden esetben szem előtt kell tartani a klímaváltozással kapcsolatos idősorok analízise során.

9. Az Kaya-egyenletben szereplő hajtóerők alakulása a vizsgált tárgyidőszakban

A továbbiakban azt vizsgáljuk, hogy egymáshoz képest hogyan alakultak az egyes hajtóerők a közel fél évszázados tárgyidőszakban, vagyis a Kaya-egyenletben foglaltak alapján kiszámításra kerülnek az egyes hajtóerők relatív „súlyai” a globális szén-dioxid-kibocsátáson belül.



5. ábra. Az alap idősorok tárgyidőszakbeli relatív változása.

A SZÁRMAZTATOTT IDŐSOROK LEGFONTOSABB JELLEMZŐI					
MEGNEVEZÉS	Abszolút értékbeli változás		Százalékos változás (1971 = 100 %) (1971 – 2017)	Éves átlagos változás százalékbán (1971 – 2017)	Tendencia (1971 – 2017)
	1971	2017			
G/P Egy főre jutó éves GDP-termelés globális átlaga, 2010. évi amerikai dollárban, vásárlóerő paritáson kifejezve. [USD _{2010ppp} /cap/a]	6351	15103	237,8 %	+1,86 %/a	Tendenciájában egyértelműen növekvő érték. Semmi nem utal tartós változásra a tendenciát illetően. Az előző évre, mint bázisra vonatkoztatott relatív változások sztochasztikusan alakulnak, összességükben azonban lassan növekednek.
E/G Energia-intenzitás globális átlaga (egységnyi globális éves GDP-termelésre jutó, halmozatlan összes primerenergia-felhasználás, 2010. évi amerikai dollárban, vásárlóerő paritáson kifejezve. [MJ/USD _{2010ppp} /a]	9,6739	5,1516	53,3 %	+0,989 %/a	Egyértelműen, szigorúan monoton csökkenő értékek, nem utal semmi a tendencia tartós változására. Az éves változások (csökkenés) mértéke véletlenszerűen alakul, de tendenciájában az éves relatív csökkenés mértéke lassan növekszik.
C/E Az éves globális halmozatlan primerenergia-energiafelhasználás karbon-intenzitása (egységnyi éves halmozatlan összes primerenergia-felhasználásra jutó szén-dioxid-kibocsátás. [t _{CO2} /TJ/a]	60,3	56,1	93,0 %	+0,998 %/a	A kibocsátás abszolút értékét tekintve Nagyon kis mértékben csökkenő tendencia. Semmi jel nem utal e tendencia megváltozására. Az éves (előző évre, mint bázisra vonatkoztatott) relatív változások növekvő tendenciát mutatnak.
C/G Egységnyi globális GDP-termelésre jutó éves átlagos szén-dioxid-kibocsátás, vagyis az átlagos globális GDP-termelés karbon-intenzitása, 2010. évi változatlan dollárban és vásárlóerő paritáson kifejezve. [kg _{CO2} /USD _{2010ppp} /a].	0,5838	0,2892	49,5 %	+ 0,985 %/a	Két évtől eltekintve szigorúan monoton csökkenő értékek. Semmi nem utal e tendencia tartós változására. Az éves relatív (előző évre, mint bázisra vonatkoztatott) változások véletlenszerűen alakulnak, tendenciájukban azonban lassan növekvő csökkenést mutatnak.
C/P Egy lakosra jutó éves szén-dioxid-kibocsátás globális átlaga. [t _{CO2} /cap/a]	3,71	4,37	117,7 %	+ 0,349 %/a	A tárgyidőszakban változó tendenciájú, összességében mérsékelt növekvő fajlagos kibocsátás. Az egyes években a relatív (előző évre, mint bázisra vonatkoztatott) változások véletlenszerűen alakulnak, összességében enyhén növekvő tendenciát mutatnak.
E/P Egy főre jutó éves halmozatlan primerenergia-felhasználás globális átlaga. [MJ/cap/a]	61,4	77,8	126,6 %	+0,504 %/a	A tárgyidőszakban változó tendenciájú, összességében lassan növekvő energiafelhasználás. Az egyes években a relatív (előző évre, mint bázisra vonatkoztatott) változások mértéke enyhén csökkenő növekedést mutat.

4. táblázat. A származtatott idősorok fő jellemzői.

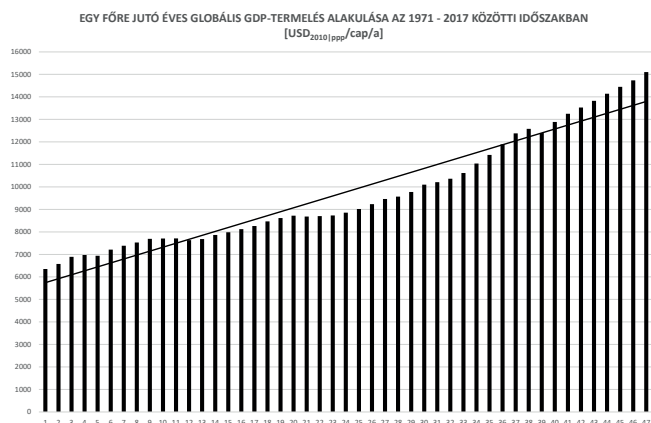
A vizsgálatok alapjául szolgáló idősorok esetében ezek az értékek minden egyes évre vonatkozóan rendelkezésre állnak. Terjedelmi okok miatt csak négy (önkéntesen választott) időszakra (1971–1980, 1981–1990, 1991–2000, 2001–2010), illetve a vizsgált tárgyidőszak egészére (1971–2017) vonatkozóan kerülnek bemutatásra ezen számított értékek.

Az eredményeket összefoglalóan szemlélteti az 5. ábra. Az ábrák a Kaya-egyenletben szereplő négy alapvető hajtóerő alkotta sztochasztikus idősorokra vonatkozóan

mutatják az aktuális tárgyidőszakbeli százalékos változás előjeles értékeit. A tárgyidőszakbeli százalékos változások báziséve minden esetben az adott tárgyidőszak kezdőéve. Az 5. ábra oszlopdiagramjai egyben megadják a százalékos változások számértékét is. Az ábrásor négy egymást követő évtizedre vonatkozóan adja meg az értékeket. Az egyes hajtóerők tárgyidőszakbeli változása értelemszerűen pozitív vagy negatív értékű lehet, azaz bekövetkezhet növekedés, vagy éppenséggel csökkenés az adott időszakon belül. Az oszlopdiagramok végső soron nem csak a változás relatív (bázisértékre vonatkoztatott) értékét adják meg, hanem

egyben információt szolgáltatnak a változások sebességére is. Hiszen a tárgyidőszakbeli időtartam szerepel az összefüggések nevezőjében, vagyis „sebességről” (időbeli első deriváltról) van szó. Szemügyre véve a kapott eredményeket, megállapítható, hogy a népesség növekedése és az egy főre jutó GDP értékének növekedése szignifikánsan meghatározó erejű volt mind a négy évtizedben, s ebből következően a teljes, majd fél évszázados időszakban. Globális átlagban (hangsúlyozottan: globális átlagban) a népesség globális növekedése és az anyagi jólét globális növekedése (amit a G/P idősor fejez ki) sokkal nagyobb mértékű és gyorsabb volt (abszolút értékben), mint a másik két hajtóerő változása (csökkenése). Nem szorul magyarázatra, és egyszerűen bizonyítható, hogy a népesség növekedése (P hajtóerő) és az anyagi jólét javulása ((G/P) hajtóerő) egyértelműen növelték a szén-dioxid-kibocsátást globális átlagban, míg az (E/G) és a (C/E) hajtóerők jellemzően ellenkező irányban befolyásolták a szén-dioxid kibocsátást globális átlagban. Ezen változások között ok-okozati összefüggés van! Ez annak volt a következménye, hogy az egységnyi GDP előállításához szükséges energiafelhasználás globális átlagban csökkent, azaz a GDP-termelés energiahatékonyasága folyamatosan javult. Egyre kevesebb és kevesebb energia kellett egységnyi GDP megtermeléséhez. A (C/E) hajtóerő esetében már nem ilyen egyértelmű a változás iránya, hiszen látható az 5. ábra alapján, hogy 2001 és 2010 között ez a hajtóerő kibocsátásnövelő hatású volt, hangsúlyozottan globális átlagban, míg általában a globális szén-dioxid-kibocsátást csökkentette. Mi ennek a magyarázata? Természetesen nagyon sok tényező együttes hatásának eredményeképpen alakult ki ez a helyzet. De a domináns ok az volt, hogy Kína globális mértékben is rendkívül erősen növelte a szénbázisú energiatermelését (villamosenergia-termelését), aminek következtében az egységnyi energiafelhasználásra jutó szén-dioxid-kibocsátást jellemző korábbi világtendencia megfordult. Ezért szerepel ez a hajtóerő a negyedik oszlop tetején, mint kibocsátást növelő tényező.

A 6. ábra ugyanezen tárgyidőszakokra vonatkozóan mutatja a globális szén-dioxid kibocsátás alakulását. Látható, hogy a változás mértéke korántsem egyenletes az egymást követő négy évtizedben. A két ábra által közölt információkat összegezve az állapítható meg, hogy globális méretekben



6. ábra. Az egy főre jutó GDP-termelés globális átlagának alakulása.

a fosszilis eredetű szén-dioxid-kibocsátás domináns hajtóerői a népesség és az anyagi jólét növekedése. Ezt a tendenciát mindeközéig nem volt képes ellensúlyozni a két kibocsátáscsökkentő hajtóerő, nevezetesen az E/G és a C/E hajtóerő. A P és a G/P hajtóerők sokkal gyorsabban növekednek abszolút értékben, mint a másik két, alapvetően a kibocsátást csökkentő hatóerő. Ez igen nagy horderejű megállapítás, amit nem lehet figyelmen kívül hagyni a globális klímavédelmi stratégia kialakításakor.

10. Az idősorok elemzéséből levonható legfontosabb következtetések

A bemutatott idősorok áttekintése alapján maguktól értetődő módon adódnak a következtetések. Célszerű azonban mégis röviden összefoglalni a legfontosabb megállapításokat. Mindenekelőtt meghatározó tényként rögzíthető, hogy a vizsgált majd fél évszázados időszakban egyértelműen nőtt a fosszilis eredetű CO₂-kibocsátás. Ez szükségszerű következménye annak, hogy a Föld lakossága (P), valamint az egy főre jutó CO₂-kibocsátás globális átlaga (C/P) növekedett, mivel az összes (globális) kibocsátás a népesség számának és az egy főre jutó CO₂-kibocsátás globális átlagának szorzataként adódik, vagyis $C = P \cdot (C/P)$. És ez matematikai szükségszerűséggel így is marad, amíg az előző évre, mint bázis évre vonatkoztatott (relatív) változása mindkét szorzótényezőnek egynél nagyobb értékű, vagy pedig a két relatív érték szorzata egynél nagyobb értékű. Azaz a globális szén-dioxid-kibocsátás mindaddig megállíthatatlanul növekedni fog, amíg az alábbi összefüggés fennáll:

$$\left[\left(a = \frac{P_i}{P_{(i-1)}} \right) * \left(b = \frac{\frac{C_i}{P_i}}{\frac{C_{(i-1)}}{P_{(i-1)}}} \right) \right] = (a*b) > 1$$

Az összefüggésben az „i” index egy tetszőlegesen kiválasztott tárgyévvel jelöl, az „a” tényező pedig a Föld lakossága előző évre, mint bázis évre vonatkoztatott változásának relatív értékét jelöli, míg a „b” tényező az egy főre jutó CO₂-kibocsátás globális átlagának előző évre, mint bázis évre vonatkoztatott relatív értékét jelöli.

Egyszerűen megfogalmazva az előbbieken mondottakat: addig nő a globális kibocsátás, amíg vagy mindkét tényező egyszerre lesz egynél kisebb értékű, vagy amikor az egyik tényező nagyobb mértékben csökken, mint amennyire a másik tényező növekszik. Vagyis a következő esetekben:

1. vagy a Föld népessége és az egy főre jutó CO₂-kibocsátás globális átlagának előző évre, mint bázis évre vetített (azaz relatív) értéke együttesen csökken;
2. vagy a Föld népessége relatív mértékben jobban csökken, mint amennyivel az egy főre jutó CO₂-kibocsátás relatív értékben növekszik;
3. vagy a Föld népessége relatív értékben kisebb mértékben növekszik, mint amennyivel az egy főre jutó CO₂-kibocsátás relatív mértékben csökken.

Nem szorul az sem magyarázatra, hogy az egy főre jutó CO₂-kibocsátás (C/P) értékének változása szorosan összefügg (szükségszerű ok-okozati! következménye) az egy főre jutó fosszilis eredetű primerenergia-felhasználásnak ($E_{\text{fosszilis}}/P$). Érdeemes egy pillantást vetni a két idősor tárgyidőszakbeli alakulására, s akkor ez nyilvánvalóvá válik! Vagyis amíg relatív értékben ez az érték globális átlagban nem csökken, addig csak (2) esetben lehetséges a globális kibocsátás csökkenése. Egyszerűen fogalmazva: globális átlagban a népesség és a jólét növekedése a szén-dioxid-kibocsátás bizonyítottan legfőbb hajtóerői. Ez perdöntő jelentőségű konklúzió.

11. Globális versus regionális trendek

Nagyon fontos azonban rögtön annak kiemelése és nyomatékos hangsúlyozása, hogy az eddigiekben globális átlagértékekről volt szó. Alapvetően téves lenne pusztán a globális átlagértékek alapján elhamarkodott következtetéseket levonni. Ezek alapján ugyanis, nem megengedhető módon, arra a nagyon leegyszerűsített és téves következtetésre lehetne jutni, hogy a népesség növekedése és az anyagi jólét növekedése szükségszerűen és elkerülhetetlenül a szén-dioxid-kibocsátás növekedését eredményezi, ugyanis a P, és a G/P (végső soron az $E_{\text{fosszilis}}/P$) hajtóerők szignifikánsan gyorsabban és nagyobb mértékben növekednek, mint a kibocsátást csökkentő E/G és C/E hajtóerők. A helyes és megalapozott véleményalkotáshoz szükséges egy sokkal differenciáltabb, országonkénti, régiókénti analízis is. Ennek alapján ugyanis bizonyítottan megállapítható, hogy csak a gazdasági fejlődés meghatározott szakaszában érvényes az előbbi megállapítás, miszerint a népesség növekedése (P) és az anyagi jólét (G/P) növekedése szükségszerűen a szén-dioxid-kibocsátás növekedését eredményezi. A gazdaságilag fejlett országokban és régiókban ez a tendencia, ez a megállapítás már nem igaz! Ezen országok és régiók esetében a szén-dioxid kibocsátás vagy stagnál, vagy csökken, miközben a lakosság száma (ha a globális átlagnál sokkal szerényebb mértékben is) nő, vagy stagnál (igaz egyes régiókban, országokban csökken) és az anyagi jólét (G/P) viszont szignifikánsan növekszik! Ezen megállapítást alátámasztó részletes vizsgálatok bemutatására itt most terjedelmi korlátok miatt nincs lehetőség, ez egy másik áttekintés témája.

Az IPCC tanulmány idézett megállapításai a globális átlagértékekre vonatkoznak, és nagyon leegyszerűsítve azt fogalmazzák meg a tények alapján, hogy az egy főre jutó nemzeti össztermék globális átlagának és a világ lakosságának a növekedése a két legfontosabb hajtóereje a globális CO₂-kibocsátás növekedésének. Másképpen fogalmazva arról van szó, hogy e két hajtóerő gyorsabban növekszik, mint a globális CO₂-kibocsátást ellenkező irányban befolyásoló (azaz a kibocsátást csökkentő) másik két alapvető hajtóerő, vagyis az egy főre jutó GDP-termelés energia-intenzitása és az egy főre jutó halmozatlan energiafelhasználás karbon-intenzitása.

A globális átlagértékek azonban elfedik az egyes régiók, országok közötti meglévő igen jelentős különbségeket. Ezek a különbségek nem egyszerűen az alapvető hajtóerőket

jellemző értékek számszerű különbségében jelentkeznek. A lényegi különbségek abban jelentkeznek, hogy egyes régiókban és országokban (= lényegileg a gazdaságilag legfejlettebb régiókban és országokban) megfordult a GDP növekedés és a népesség növekedés, valamint a CO₂-kibocsátás közötti összefüggés, azaz nem áll fenn jellemzően a világ egészére nézve napjainkban domináns törvényszerűség, miszerint a gazdasági fejlődés és a népesség növekedése szükségszerűen a CO₂-kibocsátás növekedésével jár. Nagyon leegyszerűsítve kijelenthető, hogy a fejlettebb régiók, országok esetében az említett hajtóerők közötti kapcsolat (korreláció) alapvetően más, lényegében ellentétes a gazdasági fejlettség alacsonyabb szintjén álló régiókban, országokban ezen hajtóerők közötti kapcsolattal.

Irodalom

- Behringer, W.*, 2010: A klíma kultúrtörténete. A jégkorszaktól a globális felmelegedésig. Corvina Kiadó, Budapest.
- Caradonna, J. L.*, 2014: Sustainability. A History. Oxford University Press, New York, Aucland.
- Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Fagan, B.*, 2012: A nagy felmelegedés. A klímaváltozás és a civilizációk felemelkedése és hanyatlása. Európa Könyvkiadó, Budapest.
- https://books.google.hu/books?hl=hu&lr=&id=JAFEBgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT19&dq=Climate+Change+2014:+Mitigation+of+Climate+Change.+Contribution+of+Working+Group+III+Ezekhez+is+k%C3%A9rem+a+heto+the+Fifth+Assessment+Report+of+the+Intergovernmental+Panel+on+Climate+Change&ots=dACFvI1758&sig=pDduBKpFtjct_NqhrWlyjbGleg&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- International Energy Agency (IEA) 2019: CO₂ Emission from Fuel Combustion, Highlights.
- International Energy Agency (IAE), 2020: World Energy Outlook 2020. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- International Energy Agency (IAE), 2021: Global Energy Review 2021. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>
- Jancovici, J.-M.*, 2014: What is Kaya's Equation? <https://jancovici.com/en/climate-change/economy/what-is-kayas-equation>
- Kaya, Y. and Yokobori, K.*, 1997: In (ed.: Kaya, Y. and Yokobori, K.), Environment, Energy and Economy: Strategies for Sustainability. United Nations University Press, Tokyo, New York, Paris.
- Kaya, Y., Yamaji, K. and Akamoto, K.*, 2015: Climate Change and Energy: Japanese Perspectives on Climate Change Mitigation Strategy. ICP Series on Climate Change Impacts, Adapt. and Mitig. 4., Imperial College Press, London. <https://doi.org/10.1142/p969>
- Reményi K.*, 2010: Energetika, CO₂, Felmelegedés. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Robertson, M.*, 2014: Sustainability. principles and Practice. Routledge Taylor and Francis Group, London and New York.