

POPP JÓZSEF

Prof. Dr., MTA levelező tagja, egyetemi tanár, Neumann János Egyetem

OLÁH JUDIT

Prof. Dr., MTA doktora, egyetemi tanár, Neumann János Egyetem

## Az energiafogyasztás és CO<sub>2</sub>-kibocsátás szerkezetének alakulása a körforgásos bioökonómia tükrében

### Az energiafogyasztás és CO<sub>2</sub>-kibocsátás szerkezetének alakulása a körforgásos bioökonómia tükrében

*A modern történelem legnagyobb energianáltsága 2021 második felében kezdődött, Oroszország Ukrajna elleni inváziója tovább súlyosbította a helyzetet, ugyanis a szén, az olaj és a földgáz ára rekordszintre emelkedett. A COVID járvány után az energianáltság súlyos gazdasági károkat okozott, különösen a közel 140 fosszilis tüzelőanyag-importra szoruló országoknak. A magas energiaárakra sok ország a fosszilis tüzelőanyagok importjának diverzifikálásával, a termelés felfuttatásával és az energiafelhasználás támogatásával reagált. A 2015-ös párizsi megállapodás kötelezettségvállalást jelent a globális felmelegedés emelkedését legfeljebb 2°C, de lehetőség szerint 1,5°C alatt tartására az iparosodást megelőző szinthez képest. A megújuló energia jelenlegi felhasználása messze van attól, ami ahhoz szükséges, hogy a világ 2050-re elérje a nulla nettó kibocsátást. Az EU-ban az Európai Zöld Megállapodás keretében a körforgásos gazdaság és bioökonómia jelent biztosítékot a klímacélok teljesítéséhez.*

**Kulcsszavak:** energiafogyasztás, szén-dioxid-kibocsátás, megújuló energia, körforgásos bioökonómia

### Structure of Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions in Light of the Circular Bioeconomy

*The biggest energy crisis in modern history began in the second half of 2021, Russia's invasion in Ukraine further aggravated the situation, as the price of coal, oil and natural gas rose to record levels. After the COVID epidemic, the energy crisis caused severe economic damage, especially to the nearly 140 countries that depend on fossil fuel imports. Many countries responded to high energy prices by diversifying their imports of fossil fuels, increasing production and subsidizing energy consumption. The 2015 Paris Agreement represents a commitment to keep the increase in global warming to a maximum of 2°C, but if possible, below 1.5°C compared to pre-industrial levels. Current use of renewable energy is far from what is needed for the world to reach net zero emissions by 2050. In the EU, within the framework of the European Green Deal the circular economy and bioeconomy are a guarantee for meeting the climate goals.*

**Keywords:** energy consumption, carbon dioxide emissions, renewable energy, circular bioeconomy

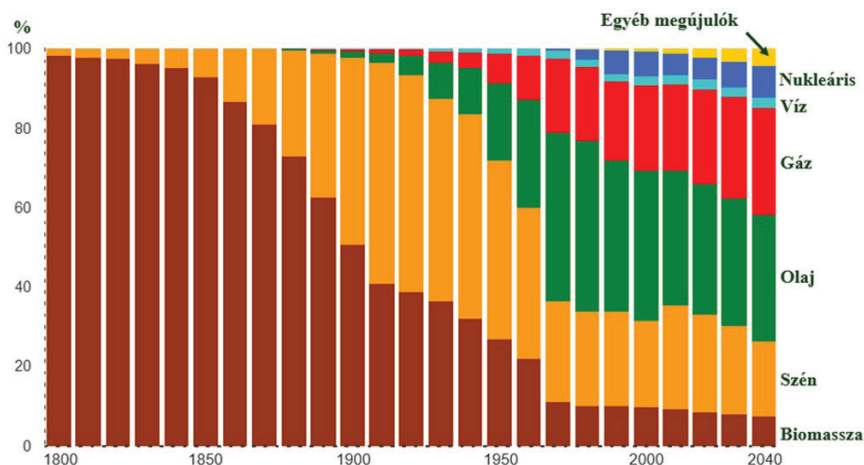
## 1. Az energiafogyasztás szerkezetének alakulása 1800-2022 között

A globális népességnövekedés mellett az életmódváltozás (pl. urbanizáció és motorizáció) miatt emelkedik az emberek átlagos energiafogyasztása is. A fejlett országokban az energiahatékonyság javulása mérsékelheti ezt a folyamatot. A növekvő világnépesség tehát hatványozódó (exponenciális) erőforrás-felhasználást eredményez, a fosszilis készletek viszont végesek. A megújuló erőforrások állandóan újratermelődő anyag- és energiaforrások, amelyek hozzájárulnak az energiaellátás biztonságának javításához, a környezetterhelés, különösen a CO<sub>2</sub>-kibocsátás csökkentéséhez, a vidékfejlesztéshez és a nemzetközi kereskedelem bővítéséhez. A megújuló energiaforrások növekvő felhasználása mellett az energiahatékonyság és -takarékoság növelése is fontos szempont a fosszilis energia felhasználásának mérsékléséhez, ezzel egyidejűleg az energiainport-függőségből származó politikai és gazdasági kockázatok csökkentéséhez.

1800-ig a gazdaság a természetes erőforrásokon alapult, helyébe fokozatosan a fosszilis gazdaság lépett. A Földön a lélekszám emelkedésével közel párhuzamosan nőtt az energiafogyasztás is. Nagyon kevés régió állít elő fosszilis energiát a világon, ráadásul többségében politikailag megbízhatatlan országokról és régiókról van szó, amelyek gyakran a politikai zsarolás eszközeként, stratégiai fegyverként használják az energiaexportot. Míg a 19. század elejéig a globális energiafelhasználás közel 100%-át a biomassa adta, addig a gőzgép térhódításával a 20. század elején az összes energiaigény felét már szénrel elégtették ki. Később a belső égésű robbanómotor feltalálásával (személygépkocsi, repülőgép) fokozatosan emelkedett a kőolaj iránti kereslet, s ezzel együtt a földgázfelhasználás is (Smil, 2000; REN21, 2022). 2020-ban a végső energiafogyasztásban a fosszilis energia aránya 78%, a megújuló energiaforrásoké (nukleáris energiával együtt) pedig 22% körül alakult globális szinten és az EU-ban egyaránt (1. ábra).

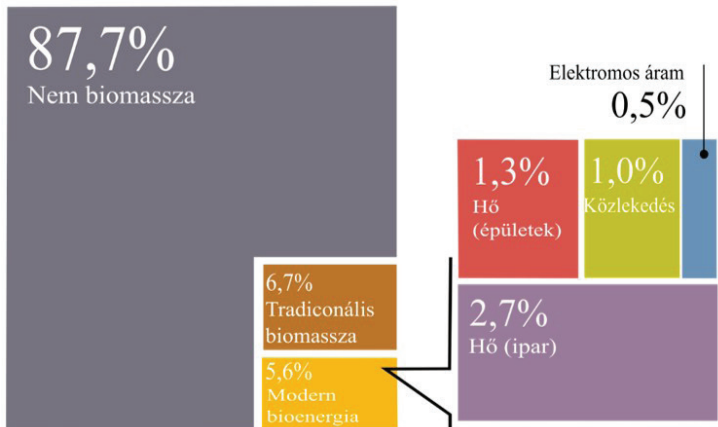
A globális végső energiafogyasztásban a nem biomassa alapú energia (kőolaj, szén, földgáz és nukleáris energia) aránya 2020-ban 87,7%-ot, a megújuló energiaforrás pedig 22,3%-ot tett ki (REN21, 2022). A megújuló energia a világ negyedik legnagyobb energiaforrását jelenti a kőolaj, szén és földgáz után. A tradicionális biomassa (főzés és fűtés) 6,7%-ot, a modern bioenergia (hő, bioüzemanyag, villamosenergia) 5,6%-ot tett ki, az egyéb megújuló energia (szél, nap és víz stb.) aránya elérte a 10%-ot (2. ábra). A biomassa hagyományos felhasználása az elmúlt években stabil volt, de részesedése a globális végső energiaellátásban fokozatosan csökkent, miközben a modern bioenergia és egyéb megújuló energiaforrások részesedése az 1990-es évek vége óta folyamatosan nőtt. A múltban a biomassa energiacélú felhasználása elsősorban fás nyersanyagokon alapult, de ma az energiatermelést szolgáló bioenergia a növényi és állati eredetű hulladékoktól kezdve az élelmiszeripar melléktermékein át egészen az energianövényekig, a lakossági szerves hulladékokig és a vízi biomasszáig terjed.

1. ábra. Az energia-felhasználás alakulása a tüzelőanyagok %-ában



Forrás: Smil, 2000; REN21, 2022 adatai alapján saját szerkesztés

2. ábra. A megújuló energia aránya a globális végső energiafogyasztásban 2020-ban



Forrás: REN21, 2022 alapján saját szerkesztés

Számos definíció szerint az atomenergia nem megújuló, de nem bocsát ki üvegházhatású gázokat (ÜHG), ugyanakkor előállításához nélkülözhetetlen a véges uránkészlet (urán-235), ráadásul a nukleáris hulladék mérgező, sőt 10 000 évig is radioaktív maradhat. Az éghajlat-politikai taxonómiáról szóló rendelet sze-

rint a gázzal és nukleáris energiával összefüggő egyedi tevékenységekre vonatkozó kritériumok összhangban állnak az uniós éghajlat- és környezetvédelmi célkitűzésekkel. A megújuló technológia, valamint az atomenergia (alig 2% a részesedése a globális végső energiafogyasztásban) és földgáz a „fenntartható” kategóriába került. A rendelet 2023 januárjában lépett hatályba (Európai Bizottság, 2022).

## 2. A megújuló energia növekvő szerepe az energiaellátásban

A megújuló energiaforrások (a szélenergia, a napenergia, a vízenergia, az óceánból nyert energia, a geotermikus energia, a biomassza és a bioüzemanyagok) a fosszilis tüzelőanyagok alternatívái, amelyek segítséget nyújtanak az ÜHG-kibocsátás csökkentéséhez, diverzifikálják az energiaellátást, valamint csökkentik a fosszilis tüzelőanyagoktól való függést. A nemzetközi elemzések szerint a megújuló energiák használatának terjedése megállíthatatlan folyamat, ráadásul felhasználásuk növelése jókora versenyelőnyt is jelent. Az energiafogyasztás szerkezetét meghatározza a gazdasági szerkezet, azon belül az energiaigényes és fosszilis energiát használó ágazatok, illetve vállalatok aránya. Hatással van rá az összeszerelő tevékenységek aránya is (lásd Magyarország), mivel a közlekedésen keresztül növelik a gazdaság energiaintenzitását, ugyanis az alapanyag és a részegységek behozatala mellett a nemzetközi piacokra szállítják a késztermékeket. Befolyásolja az energiahasználatot az is, hogy mennyire korszerűek az épületek, az irodák és a lakóházak is, de fontos szempont a megújuló energia felhasználásának támogatása és ösztönzése is. A megújuló energiára való átállást a klímaváltozás mérséklése mellett fosszilis energia kiszámíthatatlan ára és inflációnövelő hatása is indokolja (Peng et al., 2022).

A 2015. december 12-én elfogadott párizsi megállapodás kötelezettségvállalást jelent a fosszilis energiahordozók arányának mérséklésére, a CO<sub>2</sub>-kibocsátás csökkentésére és a globális felmelegedés emelkedését legfeljebb 2°C, de lehetőség szerint 1,5°C alatt tartására (United Nations, 2023). Az egyéb megújuló energia termelése (szél-, nap-, víz-, geotermikus-energia, bioüzemanyagok stb.) világszerte gyorsabb ütemben bővül, mint a biomasszára alapozott bioenergia előállítása. A megújuló energiaforrásokon belül az egyéb megújuló energia 10%-ot, ezzel szemben a modern bioenergia és tradicionális biomassza 12,3%-ot képvisel (REN21, 2022).

Az Egyesült Nemzetek Szervezete (ENSZ) 2021. évi klímakonferenciáján 151 ország nyújtott be új nemzeti hozzájárulást az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére a Párizsi Megállapodás értelmében. 2021 végére a világ népességének közel 85%-át képviselő 135 országban és az EU-ban volt érvényben valamilyen nettó nulla kibocsátási célkitűzés, de sok ország esetében nem is létezik konkrét jogszabály a célok eléréséhez. Oroszország Ukrajna elleni háborúja az energiabiztonság és az energiafüggetlenség kérdését is reflektorfénybe

helyezte, ugyanis még inkább előtérbe került a megújuló energiaforrások alkalmazása. Az éghajlattal kapcsolatos intézkedések városi szinten növekedtek. 2021 végére a globális városi lakosság 30%-át (1,3 milliárd fő) adó 1500 város rendelkezik megújuló energia felhasználására vonatkozó célokkal. Ebből 1100 város jelentett be klímasemleges (nettó nulla kibocsátást) célkitűzést 2050-ra.

### 2.1. A megújuló energiaforrások jelentősége az EU-ban

Az Európai Unió a 2020-ig tartó energia- és éghajlat-politikai célkitűzéseiről szóló 2009/28/EK irányelv előírta, hogy 2020-ra a teljes bruttó energiafelhasználás 20%-a megújuló energiaforrásokból származzon az EU átlagában, amihez az egyes tagországok eltérő részesedéssel járultak hozzá, végül a kötelező 20%-os részarány helyett 22,1%-ot ért el az EU. A közlekedésben a megújuló energia részarányát minden tagállam számára egységesen 10%-ban határozták meg, ami végül 10,3%-ra emelkedett az EU átlagában, de a tagállamok fele nem teljesítette a 10%-os célkitűzést.

Az EU-ban 2021-ben a megújuló energiaforrások aránya a teljes bruttó energiafelhasználásban 21,8% volt szemben a 22,1%-kal 2020-ban (Eurostat, 2023a). A tagországok közötti eltérés nagy szóródást mutat (Svédország 62,6%, Finnország 43,1%, Lettország 42,1%, ezzel szemben Luxemburg 11,7%, Málta 12,2% és Hollandia 12,3%). Magyarország 14,1%-kal szerepel a listán, ezzel az eredménnyel megközelítette a 14,5%-os vállalását. A régió országaival összevetve a középmezőnyben helyezkedünk el, mert a megújuló energia aránya Ausztriában 36,4%, Horvátországban 31,3%, Szlovéniában 25,0%, Romániában 23,6%, Csehországban 17,7%, Szlovákiában 17,4%, Lengyelországban pedig 15,6% volt 2021-ben (Eurostat, 2023).

Az Eurostat (2023) adatai alapján a 2021. évi villamosenergia-fogyasztásban a megújuló energia aránya 37,5 %-ra javult (2020-ban 37,4%). A leggyorsabban a napenergia-felhasználás aránya (15,1%) emelkedett, de a legnagyobb arányt továbbra is a szél- és vízenergia (37,5%, illetve 32,1%) képviseli. A szilárd biomassza 7,4%-os és az egyéb megújuló energiaforrások 7,9%-ot tettek ki. A tagországok között Ausztria (76,5%), Svédország (75,7%), Dánia (62,6%), Portugália (58,4%), Horvátország (53,5%) és Lettország (51,4%) vezet, a sorrend végén Máltát (9,7%), Magyarországot (13,7%), Luxemburgot (14,2%), Csehországot (14,5%) és Ciprust (14,8%) találhatók. A 27 tagországból az előző évhez viszonyítva 2021-ben csak 14-ben volt javulás, 13-ban pedig csökkent a megújuló energiából származó áramfogyasztás aránya. A két EFTA tagországban Izland (99,6%) és Norvégia (113,7%) – volt a legmagasabb a megújuló energia aránya a villamosenergia-felhasználásba.

A fűtés-hűtés energiafogyasztásán belül a megújuló energia aránya az EU átlagában 22,89%-ot ért el 2021-ben (2020-ban 23%). A legnagyobb arányt

Svédország (68,6%) Észtország (61,3%), Lettország (57,4%) és Finnország (52,6%) érte el, elsősorban a természeti adottságoknak köszönhetően. A legalacsonyabb érték Írországban (5,2%), Hollandiában (7,7%) és Belgiumban (9,2%) volt. Az EFTA tagország, Izland megújuló energia aránya a fűtés-hűtés energiafogyasztásban 97,3% volt (Eurostat, 2023a).

A közlekedésben a megújuló energia aránya az EU-ban 2020. évi 10,3%-ról 9,1%-ra csökkent 2021-ben, pedig 2030-ra 14%-ra kell növelni ezt az értéket. Javuló arányt csak négy országban, Dániában, Horvátországban, Litvániában és Finnországban látunk. A legmagasabb arányt Svédország (30,4%), Finnország (20,5%) és Szlovénia (10,6%) mutatja, ezzel szemben Málta, Görögország, Írország, Lengyelország, Magyarország, Lettország és Litvánia értéke nem érte el a 7%-ot. Magyarországon 2020 és 2021 között 11,6%-ról 6,2%-ra esett vissza ez az érték. Az EFTA tagország, Svédország is magas megújuló energia arányt (20,4%) képvisel a közlekedésben (Eurostat, 2023a).

Összességében megállapítható, hogy a közlekedés, valamint a fűtés-hűtés területén csökkent a megújuló energia fogyasztás aránya 2021-2020 között (10,3-ről 9,1%-ra, illetve 23,0-ról 22,9%-ra). Az elektromosenergia-fogyasztásban is csak minimális javulást tapasztalunk (37,4-ről 37,5%-ra). Valószínűsíthető, hogy az áramfogyasztáshoz hasonlóan a közlekedésben is a Covid időszak utáni gazdasági fellendülés energiafogyasztásának gyors növekedésével nem tudott lépést tartani a megújuló energiából származó felhasználás. Néhány tagország kivételével az EU tehát nem áll jól a megújuló energiára való áttérésben, pedig egyre nagyobb ívű célokat tűztek ki ezzel kapcsolatban. Ebből következik, hogy a 2050-re kitűzött célok nem tűnnek könnyen teljesíthetőnek. Például 2030-ra az energiafogyasztásban a megújuló energia arányának 40%-ra kellene nőni a 2021. évi 21,8% helyett (83%-os javulás), amikor 2011-2021 között 14,5%-ról 21,8%-ra nőtt ez az arány, azaz csupán 50%-os javulást sikerült elérni. Ráadásul az iparban, a közlekedésben és a fűtés-hűtés területén a cél 45%-os érték teljesítése. A cél az energiamegtakarításból, a megújuló energia előállításának növeléséből és a megújuló energia beszerzési forrásainak bővítéséből érhető el.

A megújuló energiaforrások beruházásainak finanszírozásáért folytatott versenyben a nap- és szélenergia került előtérbe, az újabb generációs bioüzemanyag-technológia piaci bevezetése pedig még várat magára. A megújuló energia – főleg a nap-és szélenergia – ára az innovációnak és növekvő piaci keresletnek köszönhetően ma már versenyképes a fosszilis energia alapú áramtermeléssel. A fejlett gazdaságokban az áramszünetek egyik fő oka, hogy a rendszer nem mindig képes kezelni az energiaáramlás hirtelen változásait, de számos egyéb hálózati probléma is felléphet. A megújuló energia terjedését egyelőre gátolja az energiatárolás, a virtuális erőmű és a smart grid (okoshálózat) hiánya, habár a fejlődés ezen a területen is biztató. A jelenlegi helyzetben az energiafogyasztás bővülő nap- és szélenergia-termeléssel párosul, ezáltal az időjárásfüggő

megújuló energia aránya megnőtt a villamosenergia-termelésben, ami nagyobb rugalmasságot követel meg a rendszertől az energiaellátás fenntartása érdekében, ugyanakkor az elérhető rugalmassága korlátozott mind a kínálati, mind a keresleti oldalon. A nagy vállalatok villamosenergia-rendszerei eddig megbízhatóan teljesítettek, de a továbbiakban is a rendszer-üzemeltetők, szabályozók és kormányok folyamatos éberségére van szükség (IEA, 2022).

### 3. REPowerEU terv

Az EU 2021-ben energiafogyasztásának mintegy 40%-át állította elő, míg 60%-át importálta. A teljes gázimport 39%-át, a teljes olajimport 25%-át és az összes szénimport 46%-át importálta Oroszországból 99 milliárd euró értékben (Eurostat, 2023b). Az előzetes adatok szerint 2022-ben jelentős mértékben csökkent az Oroszországból származó gáz- és olajimport (Eurostat 2023b). A REPowerEU tervet az Európai Bizottság az Ukrajna elleni orosz invázióra válaszképpen dolgozta ki a világpiacon energiaválság megszüntetése céljából. A terv célja az energiatakarékosság növelése, a tiszta energiára való átállás felgyorsítása és az EU energiaellátásának diverzifikálása a megfelelő energetikai infrastruktúra kiépítése érdekében. A REPowerEU terv alapján az új geopolitikai és energiapiaci körülmények között indokolt drasztikusan felgyorsítani a zöld energiára való átállást, ezzel párhuzamosan az energiafüggőséget csökkenteni és az orosz fosszilis tüzelőanyagoktól való függést megszüntetni. A 2022. évi REPowerEU terv számos intézkedést vázol fel, amelyek és a zöld átállás mielőbbi megvalósítására irányulnak. A nemzetközi partnerekkel együttműködve az EU alternatív energiaellátási lehetőségeket keres. Rövid távon a lehető leghamarabb alternatív gáz-, olaj- és szénforrásokra, hosszabb távon pedig növekvő megújuló, ezen belül a zöld hidrogén termelésére van szükség. Ezen felül a lakosoknak, vállalkozásoknak és egyéb szervezetnek is lehetősége van az energiamegtakarításra. Az ipar és a közlekedés feladata a fosszilis tüzelőanyagok kiváltása más energiaforrásokkal a CO<sub>2</sub>-kibocsátás és energiafüggőség csökkentése érdekében (European Commission, 2022).

A Bizottság 2022. évi javaslata a megújuló energiaforrásokat hasznosító erőműveket nyomós közérdeknek tekinti, ami gyorsabb új engedélyezési eljárásokat és az uniós környezetvédelmi jogszabályoktól való egyedi eltéréseket tesz lehetővé. A REPowerEU terv a hőszivattyúk telepítését, a fotovoltaikus napenergia-kapacitás növelését, valamint a megújuló hidrogén és biometán behozatalát helyezi előtérbe annak érdekében, hogy a megújuló energiaforrások aránya 45%-ra emelkedjen 2030-ra.

Az új REPowerEU-célkitűzések 2027-ig 210 milliárd EUR összegű további beruházást igényelnek. E mechanizmus fő célja, hogy segítse a tagországokat a megújuló energiára vonatkozó egyéni és kollektív célkitűzéseik elérésében. A



finanszírozási mechanizmus összekapcsolja azokat az országokat, amelyek hozzájárulnak a projektek finanszírozásához (hozzájáruló országok) azokkal az országokkal, amelyek beleegyeznek abba, hogy területükön új projekteket építsenek (fogadó országok). A Bizottság meghatározza a mechanizmus végrehajtási keretét és finanszírozási eszközeit, sőt dönt arról, hogy a mechanizmus keretében a tagállamok, az uniós alapok vagy a magánszektor hozzájárulásai finanszírozhatók-e. A finanszírozási mechanizmus révén előállított energia beleszámít az összes részt vevő ország megújuló energiával kapcsolatos célkitűzéseibe, végül hozzájárul az Európai Zöld Megállapodás azon törekvéséhez, hogy 2050-re megvalósuljon a klímasemlegesség (European Commission, 2022).

Az úgynevezett REPowerEU-forrást a tagállamok által már elfogadott nemzeti helyreállítási tervekhez kapcsolódóan lehet igényelni. Ezeknek a kiadásoknak a megújuló energiafelhasználáshoz, az energia hatékonysághoz és az energiatárolási kapacitás építéshez kell kapcsolódnuk. A REPowerEU-terv végrehajtásának középpontjában a Helyreállítási és Ellenállóképességi Eszköz (Recovery and Resilience Facility: RRF) áll. A tagállamok az RRF-hiteleket (jelenleg 225 milliárd euró) és az az EU kibocsátáskereskedelmi rendszer (Emissions Trading System: ETS) kibocsátási egységeinek árveréséből finanszírozott RRF-támogatásokat (jelenleg a piaci stabilitási tartalék 20 milliárd euró értékben) használhatják fel 2027-ig az energiahatékonyság és a megújuló energia részarányának növelésére, valamint a közlekedési infrastruktúra, így a vasutak villamosításának támogatására (European Commission, 2023a).

#### 4. Nettó nulla CO<sub>2</sub>-kibocsátás az EU-ban 2050-re

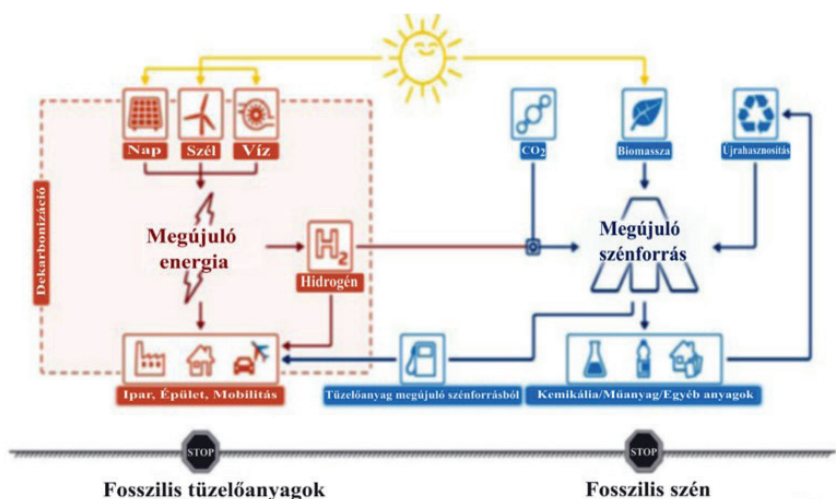
A kumulatív CO<sub>2</sub>-kibocsátás 1750-2020 között 1,5 billió tonna volt, a jelenlegi évi 36 milliárd tonna CO<sub>2</sub>-kibocsátás 40 év alatt újabb 1,5 billió tonna CO<sub>2</sub>-kibocsátást jelentene. A GDP növekedésével párhuzamosan emelkedő CO<sub>2</sub>-kibocsátás helyett a cél a kibocsátások leválasztása a GDP növekedési ütemétől (IEA, 2022). Az EU vállalta, hogy 2030-ig már legalább 55%-kal csökkenti az ÜHG kibocsátását 2005-höz képest, és 2025-ig a nehézipar mellett a közlekedési ágazatra, illetve az építőiparra is kiterjesztik a CO<sub>2</sub>-kibocsátás kereskedelmi rendszerét. A CO<sub>2</sub>-kibocsátás ára az EU kibocsátáskereskedelmi rendszerében (ETS) tonnánként 6 euróról 90-100 euróra emelkedett 2017-2023 között. Kiemelt szerepe van a talajnak a szénmegkötésben és széntárolásban (carbon farming), ugyanakkor eddig nem került szóba a mezőgazdasági termelés (talajművelés) bevonása a CO<sub>2</sub>-kibocsátás kereskedelmi rendszerébe (Ember, 2023). A jövőben az ÜHG-kibocsátás árainak további növekedésére számíthatunk, mert egyre több ágazat kerül a kereskedelmi rendszerbe (közlekedés, építőipar stb.). Az EU-ban komoly gazdasági és politikai megfontolás tárgya a közel 60%-os energiatárolás csökkentése és a fosszilis energiahordozók gyors helyettesítése megújuló



energiaforrásokkal, miközben a növekvő energiaárak (és élelmiszerárak) komoly társadalmi feszültséget idéznek elő. Az ÜHG-kibocsátás árának emelkedése is elősegíti az orosz gáz- és kőolajimporttól való függés csökkentését az alacsony ÜHG-kibocsátású alternatív energiaforrásokba történő befektetés ösztönzése mellett (Popp & Oláh, 2022).

A dekarbonizáció, azaz a gazdaság szénmentesítése a fosszilis tüzelőanyagok megújuló energiával történő helyettesítését jelenti. A megújuló energia egy kis része valóban szénmentes (nap, szél, víz és hidrogén), másik része viszont megújuló bioszén (bioenergia, bioüzemanyag). A kemikália és műanyag előállításához is 100%-ban megújuló szénforrásra (CO<sub>2</sub> légkörből, biomassza, újrahasznosítás) lesz szükség 2050-re (3. ábra).

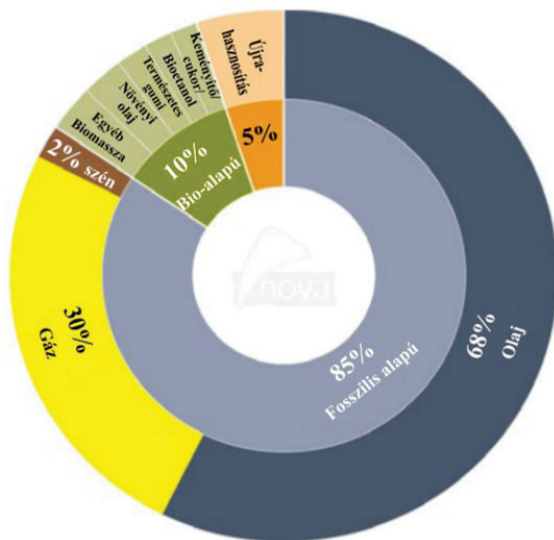
3. ábra. A megújuló energia és megújuló szénforrás a fenntartható jövő záloga



Forrás: Saját szerkesztés Kähler et al., 2021 alapján

A föld alól kitermelt szénforrás (kőolaj, földgáz és szén) 90%-a tüzelőanyag és energia célú felhasználásra kerül, míg 10%-át a cement- és vegyipar használja fel. A vegyipari termékekbe beépített szenet beágyazott szénnek nevezik. A beágyazott szénigény jelenleg világszerte évi 450 millió tonna. A beágyazott szén 85%-a fosszilis eredetű szénforrásból (olaj és gáz), 10%-a biomasszából és 5%-a újrahasznosításból származik (4. ábra). A beágyazott és a termeléshez felhasznált energia széntartalmának megoszlása a fő kemikáliák esetében azt jelzi, hogy a szénlábnyom kétharmadát a beágyazott szén teszi ki, egyharmadát pedig a termeléshez szükséges energiafelhasználás (Kähler et al., 2021).

4. ábra. A kemikáliák előállításához szükséges globális szénigény alapanyagának megoszlása, 2020

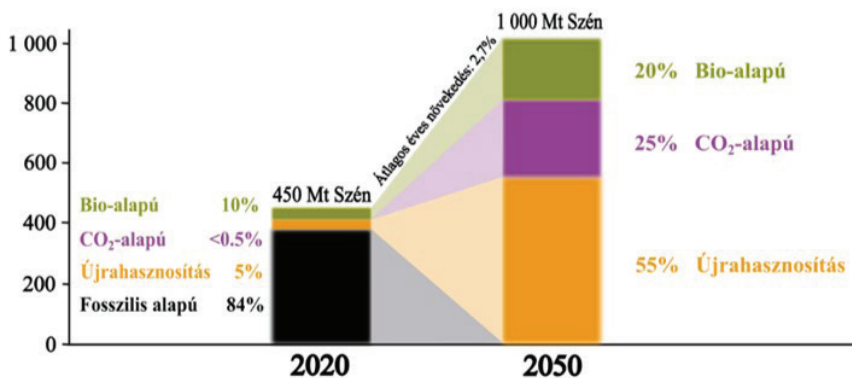


Forrás: Saját szerkesztés Kähler et al., 2021 alapján

A vegyipari termékekbe beépített szén globális mennyisége 450 millió tonnáról 1000 millió tonnára nő 2020-2050 között. A vizsgált időszakban a fosszilis eredetű szénforrás eltűnik, a biomassa alapú szénforrás aránya 10%-ról 20%-ra, a CO<sub>2</sub>-alapú szénforrás pedig szinte a nulláról 25%-ra emelkedik, az újrahasznosításból származó szénforrás részesedése pedig 5%-ról 55%-ra nő. A kemikáliák előállításához szükséges biomassa-alapú szén aránya a globális biomassa termelés 0,9%-áról mintegy 2%-ára nő 2020-2050 között (5. ábra). A szénforrás (kőolaj, földgáz és szén) föld alóli kitermelését a Föld felszínén (bioszféra) és a felszín felett (atmoszféra) található szénforrásokkal fogják helyettesíteni (Kähler et al., 2021).

Az EU-ban az Innovációs és Modernizációs Alap segíti az energiaszektort és az energiaintenzív ipari ágazatokat, hogy alacsony CO<sub>2</sub>-kibocsátású technológiákra térjenek át. A rendszer legfontosabb eleme a CO<sub>2</sub>-kibocsátási egységek (kvóták) ingyenes kiosztása az ETS-ben szereplő létesítmények számára: kvótánként egy tonna károsanyag-kibocsátásra jogosultak. Az ingyenes kvótakiosztás rendszerét meghosszabbítják, de az ingyenes kiosztásnál azokra az ágazatokra összpontosítanak, amelyeknél a legnagyobb a kockázata annak, hogy termelésüket az EU-n kívülre helyezik, így hozzájárulnak a szénszivárgás jelenségéhez. A szénszivárgásnak kevésbé kitett ágazatok esetében az ingyenes kvótakiosztás

5. ábra. A kemikáliák előállításához szükséges globális szénigény alapanyagának megoszlása 2020-2050 között



Forrás: Saját szerkesztés Kähler et al., 2021 alapján

2026 után fokozatosan megszűnik. A szénszivárgás megakadályozása érdekében az ETS kiegészül a határmenti karbonköltség kiegyenlítő mechanizmusával (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM), amely a vállalatok növekvő karbonköltségét, így az importtal szemben jelentkező csökkenő versenyképességét ellensúlyozza. Az importőrök többletköltsége megegyezik azzal, mintha a terméket belföldön állították volna elő, vagyis az import karbon tartalma után megfizetik a mindenkorli karbonkvóta piaci árát kvótavásárlással. Az importált fogyasztási cikkek karbonintenzitását ellensúlyozó mechanizmus (karbonadó) bevezetése a kibocsátásáthelyezés kockázatát csökkenti. A CBAM alkalmazásával megszűnik az ingyen kvóta kiosztás. Az ingyen kvóta és a villamos áram közvetett CO<sub>2</sub>-kibocsátási költsége miatt az EU-ban versenyképességi hátrányt szenvednek el az érintett ágazatok, mert a CO<sub>2</sub>-kibocsátás árát a termelési költségbe beépítik. A globális karbonvám bevezetése megakadályozza a szénszivárgást, mivel a karbonadó ellensúlyozza a termelési költségtöbbletet. A klímasemleges célkitűzés eléréséhez a CO<sub>2</sub>-kibocsátás árának tonnánként 250-500 euróra kell emelkednie a következő 30 évben (Verde, 2020).

Továbbra is szükség van a CO<sub>2</sub>-leválasztásra és -tárolásra, különösen az energiaigényes iparágakban és az átmeneti időszakban a CO<sub>2</sub>-mentes hidrogén előállításához. Erre akkor is szükség lesz, ha a biomassa alapú energiából és az ipari növényekből származó CO<sub>2</sub>-kibocsátást kell leválasztani és tárolni a negatív kibocsátás elérése céljából. A fosszilis tüzelőanyagokon alapuló mai technológiák valószínűleg 2050-ben is működnek még, ezért a CO<sub>2</sub>-kivonó technológiák bevezetése növeli az uniós stratégia hitelességét hosszú távon. A CO<sub>2</sub>-leválasztás és

-tárolás még nincs kereskedelmi szakaszban, megvalósulásához sokkal több kutatásra, innovációra van szükség, ráadásul új infrastruktúrát, többek között szállítási és tárolási hálózatot is igényel (European Commission, 2023b).

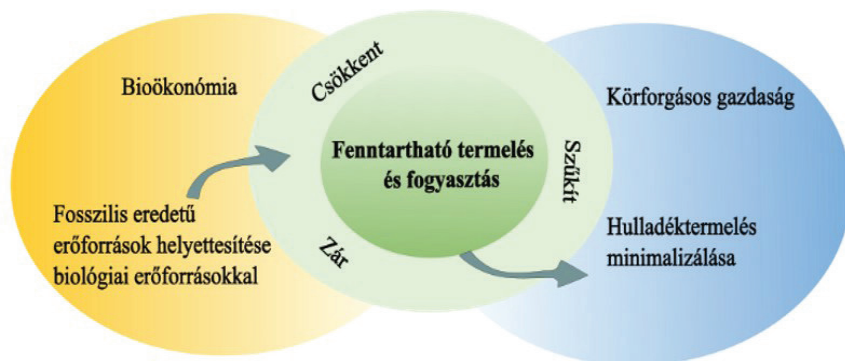
## 6. Végső megoldás: Körforgásos bioökonómia

Világszerte számos bioalapú iparág óriási energiát fektet a körforgásos gazdálkodás előnyeinek (újrahasznosítás, biológiai úton való lebomlás) kiaknázásába. Az EU-ban a körforgásos gazdaságról és bioökonómiáról szóló intézkedéscsomag felgyorsítja a körforgásos bioökonómiára való átállást a globális versenyképesség javítása érdekében. Mindez elősegíti a fenntartható gazdasági növekedést és új munkahelyeket teremt. A körforgásos biomassza alapú gazdaság kiváltja a fosszilis eredetű erőforrásokat/termékeket. Ma a lineáris gazdasági modell uralkodik. Évi 100 milliárd tonna nyersanyagot – ásványok, fémek, fosszilis tüzelőanyagok és biomassza – használnak fel világszerte. A globális nyersanyag-felhasználás 9%-át hasznosítják újra, vagyis a gazdaság 9%-ban körforgásos (Circle Economy, 2022). A természeti erőforrások biztonságos elérése folyamatos politikai viták és nemzetközi egyezségek tárgyát képezik. A világnépesség növekedésével párhuzamosan bővül a települések száma, az iparosodás és az infrastruktúra, amihez egyre több termőterületre is szükség van. Végső megoldást a körforgásos gazdaság kiépítése jelent. A körforgásos gazdaság eszközeit üzleti modelleknek nevezzük: fenntartható vagy tartós dizájn, karbantartás és javítás, megosztás, felújítás, újragyártás, újrahasznosítás és újrafelhasználás. A körforgásos gazdaság elterjedésével a természeti erőforrások élettartamát növeljük a hulladék minimalizálása mellett, vagyis nem egyszer használatos terméként kezeljük azokat (Oláh & Popp, 2021).

A fosszilis tüzelőanyagok 10 milliárd tonna fosszilis eredetű szenet tartalmaznak, ezzel szemben a globális mezőgazdaság 7 milliárd tonna bioszenet termel. Ez azt jelenti, hogy a bioszén előállítását 2,5-szeresére kell növelni, hogy fedezze az évente felhasznált 10 milliárd tonna fosszilis eredetű szenet az 7 milliárd tonna bioszennel (Tvaronavičienė et al., 2018). Hozzá kell tenni, hogy a biomassza energia- és szén-sűrűsége alacsonyabb a fosszilis erőforrásokénál, ugyanakkor alkalmas hő- és villamos energia, valamint bioüzemanyag és bioalapú kemikália előállítására (BIO, 2020). A bioökonómia tehát a fosszilis eredetű erőforrások biológiai (megújuló) erőforrásokkal történő helyettesítéséről szól, ami azt jelenti, hogy a fosszilis szenet megújuló szénrel helyettesítjük a főbb iparágakban: energia- és közlekedési, a vegyipari és építőipari ágazatban. Ez történhet biomasszából származó szénrel (bioszféra), a szén újrahasznosításával (technoszféra) és szén-megkötéssel CO<sub>2</sub>-ből az atmoszférában és/vagy a technoszférában (füstgázok). A bioökonómia elsősorban a biomassza termeléséről és a biomassza élelmiszer- és nem élelmiszer célú feldolgozásáról szól. A körforgásos gazdaság az anyag és ter-

mék magas fokú újrahasznosításával és a hulladék minimalizálásával kiegészíti a bioökonómiát. Jelentős szinergikus kapcsolat fedezhető fel a bioökonómia és körforgásos gazdaság metszéspontjának eredményeképpen, ezért a két koncepció integrációjáról van szó (7. ábra).

7. ábra. A körforgásos bioökonómia sematikus ábrázolása

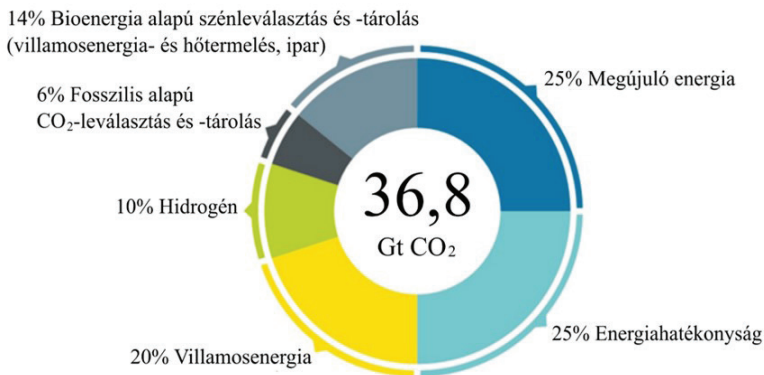


Forrás: Saját szerkesztés Tan & Lamers, 2021 alapján

## 7. A CO<sub>2</sub>-kibocsátás csökkentésének technológia lehetőségei 2050-re

Az IRENA (2022) 1,5°C-os forgatókönyve szerint a jelenlegi évi közel 37 Gt CO<sub>2</sub>-kibocsátást 2050-re 25%-kal csökkenti a növekvő energiahatékonyság, 20%-kal a villamosenergia felhasználása, 10%-kal pedig a zöld hidrogén fogyasztásának a növekedése. A megújuló energia pedig a teljes primerenergia-ellátás 25%-át teszi ki, vagyis 25%-kal járul hozzá a CO<sub>2</sub>-kibocsátás visszaszorításához. Ehhez valamivel több mint 150 EJ biomassza termelésre lenne szükség, vagyis a mai felhasználás (55 EJ) háromszorosára. A vegyiparban a bioenergia mind a folyamatenergiát, mind a vegyipari termelés nyersanyagát biztosítja a fosszilis tüzelőanyag helyettesítésével. Emellett növelni kell az egyéb megújuló forrásokból (elsősorban napenergiából) származó energiatermelést is. Továbbá a bioenergia- és fosszilis alapú CO<sub>2</sub>-leválasztás és -tárolás, mint negatív kibocsátás összesen 20%-kal csökkenti CO<sub>2</sub>-kibocsátást (8. ábra).

A bioenergia alapú szén-leválasztás és -tárolás egyre fontosabb szerepet játszik, ugyanis 2050-re negatív kibocsátásként 14%-kal járul hozzá az 1,5°C-os forgatókönyv teljesítéséhez. A biomassza felhasználásából származó CO<sub>2</sub>-leválasztás és -tárolás potenciálja 2050-re a becslések szerint évi 10 Gt CO<sub>2</sub>, ugyanakkor a becsült potenciál kevesebb, mint a felével, azaz 4,5 Gt CO<sub>2</sub>-leválasztással és -tárolással számolnak a gyakorlatban. Ez a lehetőség az energia-,

8. ábra. A CO<sub>2</sub>-kibocsátás csökkentésének technológia lehetőségei 2050-re

Forrás: Saját szerkesztés az IRENA, 2022 alapján

biofinomító-, hő- és vegyiparban rejlik, de jelentős lehet a cement-, cellulóz- és papírgyártásban, élelmiszeriparban, esetleg vas- és acélgyártásban is. Az előrejelzések szerint a tárolt biogén CO<sub>2</sub> 60%-a a biomassa alapú villamosenergia termelésből, 40%-a pedig a CO<sub>2</sub>-intenzív iparágakból származhat. Eddig az etanolgyártásból származó CO<sub>2</sub> ipari léptékű leválasztása és tárolása könnyelhető el sikerként, ugyanis „negatív kibocsátásként” kerül elszámolásra. A támogatások és adómentességek növelhetik a bioenergia árversenyképességét.

De a CO<sub>2</sub>-kibocsátás növekvő költsége, a megújuló energiából származó villamosenergia- és/vagy hőtermelés kötelező részaránya vagy közlekedési ágazatban a bioüzemanyag üzemanyagba történő kötelező bekeverésének a növelése szintén elősegíti a bioenergia piacra jutását. Ezzel szemben a fosszilis tüzelőanyagok használatának tilalma (például autók vagy kazánok) és a negatív externáliák, azaz CO<sub>2</sub>-kibocsátás emelkedő költsége, valamint a fosszilis tüzelőanyagok támogatásának megszüntetése felgyorsítja a fosszilis tüzelőanyagok kivezetését. Ennek ellenére a fosszilis alapú szén-leválasztás és -tárolás negatív kibocsátásként 2050-re 6%-kal mérsékeli a CO<sub>2</sub>-kibocsátást (IRENA, 2022).

Köszönetnyilvánítás: A 132805 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a K\_19 pályázati program és a TKP2021-NKTA-32 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

**Felhasznált irodalom:**

- BNEF (2020). *Hydrogen Economy Outlook, Key messages*. Bloomberg New Energy Finance <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>
- BIO (2020). *Bio-based Chemicals Industry Looks to Biomass & Capital to Maintain Momentum*. <https://archive.bio.org/articles/bio-based-chemicals-industry-looks-biomass-capital-maintain-momentum>
- Circle Economy (2022). *The Circularity Gap Report 2022*. Amsterdam: circle economy, 1-64. <https://www.circularonline.co.uk/wp-content/uploads/2022/01/Circularity-Gap-Report-2022.pdf>
- Ember (2023). *Carbon price tracker*. <https://ember-climate.org/data/data-tools/carbon-price-viewer/>
- Eurogia (2021). *Eurogia Green Transition Call*. <https://www.smart-systems-integration.org/system/files/document/Green%20transition%20Call%20text%20final.pdf>
- European Commission (2022). *REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy*. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Strasbourg, 8.3.2022, COM(2022) 108 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A108%3AFIN>
- European Commission (2023a). *Recovery and Resilience Facility*. [https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility\\_en](https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility_en)
- European Commission (2023b). *Carbon capture, use and storage*. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-capture-use-and-storage\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-capture-use-and-storage_en)
- Európai Bizottság (2022). *A Bizottság (EU) 2022/1214 felhatalmazáson alapuló rendelete (2022. március 9.)*. Az (EU) 2021/2139 felhatalmazáson alapuló rendeletnek egyes energiaágazatbeli gazdasági tevékenységek tekintetében, valamint az (EU) 2021/2178 felhatalmazáson alapuló rendeletnek az ezekre a gazdasági tevékenységekre vonatkozó különös közzétételek tekintetében történő módosításáról (EGT-vonatkozású szöveg). Az Európai Unió Hivatalos Lapja 2022.7.15. L 188/1, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=celex%3A32022R1214>
- Eurostat (2023a). *Renewable energy statistics*. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable\\_energy\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics)
- Eurostat (2023b). *EU imports of energy products - recent developments*. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU\\_imports\\_of\\_energy\\_products\\_recent\\_developments&oldid=554503#Overview](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=EU_imports_of_energy_products_recent_developments&oldid=554503#Overview)
- IEA (2022). *World Energy Outlook 2022*. International Energy Agency, <https://iea>



- blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf
- IRENA (2022). *World Energy Transitions Outlook 2022*. International Renewable Energy Agency, <https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>
- Kähler, F., Carus, M., Porc, O., & vom Berg, C. (2021). Turning off the Tap for Fossil Carbon: Future prospects for a global chemical and derived material sector based on renewable carbon. *Industrial Biotechnology*, 17(5), 245-258. <https://doi.org/10.1089/ind.2021.29261.fka>
- Oláh, J., Lengyel, P., Balogh, P., Harangi-Rákos, M., & Popp, J. (2017). The role of biofuels in food commodity prices volatility and land use. *Journal of Competitiveness*, 9(4), 81-93. <https://doi.org/10.7441/joc.2017.04.06>
- Oláh J. & Popp J. (2021): *A fenntartható fejlődés záloga a körforgásos bioökönomia*. Szaktudás Kiadó Ház Zrt., Budapest, Szerkesztők: Oláh J. - Popp J., 1-101. ISBN: 978-963-575-003-0, <https://szaktudas.hu/webshop/564-a-fenntarthato-fejlodes-zaloga-a-korforgasos-biookonomia>
- Peng, G., Meng, F., Ahmed, Z., Oláh, J., & Harsányi, E. (2022). A path towards green revolution: how do environmental technologies, political risk, and environmental taxes influence green energy consumption?. *Frontiers in Environmental Science*, 10, Article number: 927333, 1-18. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.927333>
- Popp J. & Oláh J. (2022). Feláldozzák-e a zöld célokat az energia-és élelmiszerbiztonság oltárán? *Magyar Tudomány*, 83(10), 1297-1310. <https://dopi.org/10.1556/2065.183.2022.10.7>
- REN21 (2022). *Renewables 2022 Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, REN21 Secretariat, Paris, ISBN 978-3-948393-04-5, 1-308. <https://www.ren21.net/gsr-2022/>
- Smil, V. (2000). Perils of long-range energy forecasting: reflections on looking far ahead. *Technological Forecasting and Social Change*, 65(3), 251-264. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(99\)00097-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(99)00097-9)
- Tan, E. C., & Lamers, P. (2021). Circular bioeconomy concepts—a perspective. *Frontiers in Sustainability*, 2, 701509, 1-8. <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.701509>
- Tvaronavičienė, M., Prakapienė, D., Garškaitė-Milvydienė, K., Prakapas, R., & Nawrot, Ł. (2018). Energy efficiency in the long run in the selected European countries. *Economics and Sociology*, 11(1), 245-254. <https://doi.org/10.14254/2071-789X.2018/11-1/16>
- Verde, S. F. (2020). The impact of the EU emissions trading system on competitiveness and carbon leakage: the econometric evidence. *Journal of Economic Surveys*, 34(2), 320-343. <https://fsr.eui.eu/publications/?handle=1814/66267>
- United Nations (2023): *The Paris Agreement*. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>