

# A szektorok szerinti metánkibocsátás mértéke és csökkentésének lehetőségei

## Sectoral methane emissions and opportunities to reduce them

VADÁSZI Marianna PhD

Miskolci Egyetem–Bányászat és Energia Intézet, H-3515  
Miskolc-Egyetemváros, Magyarország;  
marianna.vadaszi@uni-miskolc.hu; <http://www.bei.uni-miskolc.hu>;

### Abstract

*Greenhouse gases are causing negative climate change globally. One of the most important of these gases is methane, which has a global warming potential (GWP) of 28. Its greenhouse effect is 28 times stronger than carbon dioxide, and its atmospheric concentration is the result of both human activity and natural processes. Its concentration in the atmosphere increased steadily from the beginning of the Industrial Revolution until the 1990s. The consequences of its destructive impact on climate change and atmospheric processes have led to intensive study of methane emissions and strategies to reduce them. This article reviews the sources and sinks of methane and the key technologies that are crucial for reducing emissions in each sector.*

**Kulcsszavak:** üvegházhatás, metán kibocsátás, olaj- és gázipar, mitigáció, energiaszektor,

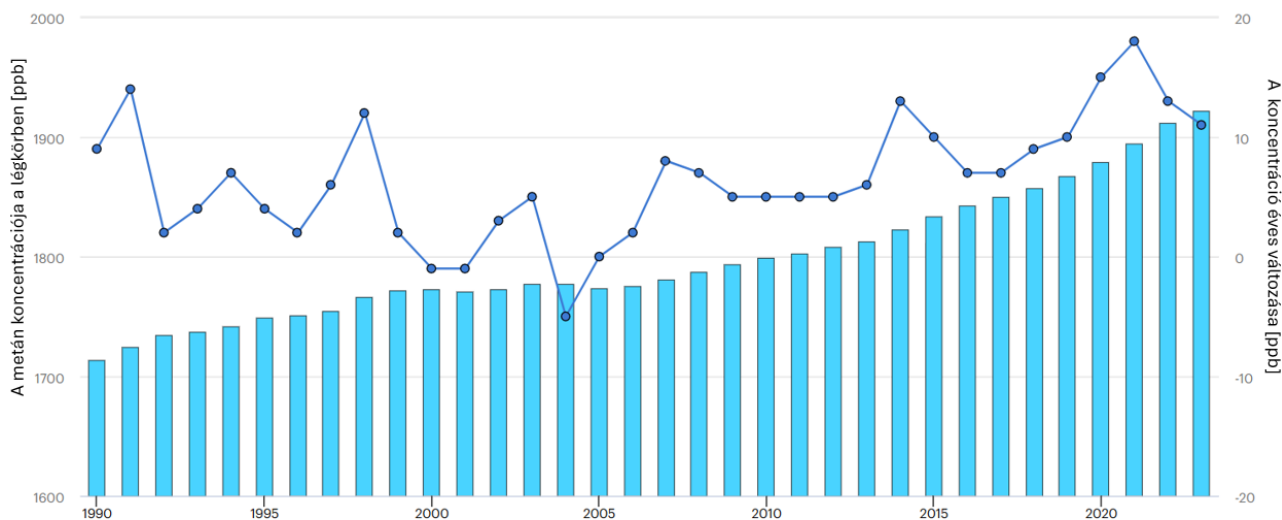
### 1. Bevezetés

Az éghajlatváltozás valós probléma, a szélsőséges időjárási jelenségek előfordulása egyre gyakoribb, amellyel minden országnak szembe kell néznie. Ezért az éghajlatváltozás elleni küzdelem és a megfelelő minőségű környezet elérése világméretű kompromisszumot tesz szükségessé a kibocsátások csökkentése érdekében. A szén-dioxidhoz hasonlóan a metán is üvegházhatású gáz, amelynek mennyisége a légkörben az utóbbi időben az emberi tevékenység következtében megnőtt, fokozva ezzel az éghajlatváltozás problémáját. Az IPCC 2013-as jelentésében az olvasható, hogy a metán hatása 100 év időintervallumot tekintve 24-szer nagyobb, mint a szén-dioxid hatása. [1] A metán globális felmelegedési potenciálját 81,2 és 27,9 értékkel tartja számon az IPCC AR6 (2021) jelentésében, mely adat 20 és 100 éves időtávra vonatkozik. Az ember által okozott metánkibocsátás nagy része a fosszilis tüzelőanyagok kitermeléséből származik. Az állattenyésztéshez kapcsolódó, az emésztési folyamatok és a hulladékok lebomlásából származó metánkibocsátás további jelentős forrás. Az UNEP (2022) megállapítása szerint a metán felelős a globális felmelegedés több mint 25 százalékáért. A metán molekulánként több hőt köt meg a légkörben, mint a szén-dioxid, és a kibocsátása utáni 20 évben a hatása 80-szor károsabb, mint a szén-dioxid hatása. [2]

Az egyéb erős üvegházhatású gázok emittálására való összpontosítással további betekintést kaphatunk az azokat befolyásoló tényezőkbe. A korábbi és a jelenlegi kutatások inkább a CO<sub>2</sub>-kibocsátásra helyezik a hangsúlyt, még akkor is, ha a metán ugyanolyan jelentős, mint a szén-dioxid. [3] Mind az ipari, mind a mezőgazdasági szektor felgyorsítja a metánemissziót, a gazdasági növekedést több szerző is a környezetszennyezés mozgatórugójaként használja. Például a kínai elhagyott bányákból 2060-ra a karbon semleges forgatókönyv szerint Kína szén-dioxid kibocsátásának egyharmadával egyenértékű metán szabadul ki. [4]

### 2. A metán éghajlatra gyakorolt hatása

A metán nagyobb felmelegedési potenciállal rendelkezik, mint a szén-dioxid, különböző természeti és antropogén tényezők összetett kölcsönhatásából származik. Ezeknek a meghatározó tényezőknek a megértése elengedhetetlen az éghajlatváltozásra gyakorolt hatásuk mérsékléséhez. A metán koncentrációja a légkörben jelenleg több mint két és félszerese az iparosodás előtti szintnek. A növekedés az elmúlt években felgyorsult, és a 2020 évektől újabb jelentős éves növekedés következett be. A különböző üvegházhatású gázok éghajlatra gyakorolt hatását két kulcsfontosságú jellemző határozza meg: az, hogy mennyi ideig maradnak a légkörben, és az, hogy mennyire képesek energiát elnyelni. A metán élettartama a légkörben sokkal rövidebb, mint a szén-dioxidé, körülbelül 12 év, de sokkal több energiát nyel el, amíg a légkörben van. Az 1. ábra a metán koncentrációját mutatja 1990 és 2023 között, feltüntetve koncentrációjának éves változását is. [12]



1. ábra A légköri metánkoncentráció változása, 1990-2023 [12]

A legfrissebb átfogó értékelés szerint - amelyet a Global Methane Budget című kiadványban közöltek - a globális metánkibocsátás éves szinten 580 Mt körül van. Ez magában foglalja a természetes forrásokból (a teljes mennyiség mintegy 40%-a) és az emberi tevékenységből (a teljes mennyiség mintegy 60%-a) származó kibocsátást. [5] Az egyes tevékenységek metán kibocsátását általánosságban az alábbi vázlatpontokkal jellemezhetjük:

- Fosszilis tüzelőanyagok előállítása: a metánkibocsátás jelentős mértékben hozzájárul a fosszilis tüzelőanyagok kitermeléséhez, feldolgozásához és elosztásához. Gyakran távozik metán a földgáz és az olaj fúrása, szállítása és tárolása során.
- Mezőgazdaság: a mezőgazdasági műveletek, különösen az állattenyésztés és a rizstermesztés jelentős metánkibocsátó. A kérődző állatok gyomrában lévő mikrobák metánt termelnek az emésztés során, míg az elárasztott rizsföldek olyan anaerob körülményeket teremtenek, amelyek elősegítik a metántermelő baktériumok kialakulását.
- Vizes élőhelyek: a természetes vizes élőhelyek természetes metánforrások a vizes talaj anaerob körülményei miatt. Az olyan emberi tevékenységek azonban, mint a vizes élőhelyek lecsapolása mezőgazdaság vagy városfejlesztés céljából, megváltoztathatják ezeket a kibocsátásokat.
- Hulladéklerakók: a hulladéklerakók az emberi eredetű metánkibocsátás jelentős forrásai. A szerves hulladék oxigén hiányában történő bomlása jelentős mennyiségű metánt termel.
- Energiatermelés: a metánkibocsátás az energiatermelés és -elosztás során fordul elő, beleértve a szénbányászatot és a földgázérműveket. A rosszul kezelt infrastruktúra metánt emittálhat a légkörbe.

Az emelkedő metánkoncentráció növeli a sztratoszféra vízgőzét, lebontva az ózonréteget. A sztratoszféra vízgőze fokozza a hidrogén-oxid gyököket és a poláris sztratoszférikus felhőket, megkönnyítve a tavaszi ózonréteg lebontását. [6] Ennek a vízforrásnak a változékonysága feltételezett hatása a sarki felmelegedésre, a sarki éjszaka során növekvő poláris sztratoszférika felhőfrakció miatt; ennek a kapcsolatnak a fontossága azonban vitatott. [7, 8] A sztratoszférában lévő üvegházhatású gázok általában hozzájárulnak a tropopauza felmelegedéséhez is, fokozzák a sztratoszféra-troposzféra vízcseréjét és alternatív felhőszabályozási mechanizmust biztosítanak. Az ózon 90%-a a sztratoszférában található és 10% a troposzférában. A sztratoszférában természetesen előfordul, blokkolva az UV-sugárzást. A klór-fluorszénhidrogének és más halogén szénhidrogének – hűtőközegek és ipari oldószerek – antropogén kibocsátása azonban hozzájárul a sztratoszféra ózonját elpusztító fotokémiai reakciósorozatokhoz. A troposzférikus ózon egy rövid élettartamú éghajlati szennyező anyag, amely fotokémia útján keletkezik prekursor nitrogén-oxidokkal – antropogén folyamatokból (pl. fosszilis tüzelőanyagok elégetése) és természetes forrásokból (pl. villámcsapás). Ezeknek a folyamatoknak a reakciói összetettek. [9, 10, 11]

### 3. Ágazatok szerinti metánkibocsátás

Az éves metánkibocsátás világszerte lényegesen kisebb, mint a szén-dioxid-kibocsátás. A légkör  $\text{CH}_4$  koncentrációja körülbelül 200-szor alacsonyabb, mint a  $\text{CO}_2$ -é, azonban a metán a globális felmelegedés körülbelül 20%-át teszi ki. A metán jelenléte a légkörben évezredekig stabil volt, majd a 19. században emelkedni kezdett. 1750-ben a metán koncentrációja a légkörben 676–716 ppb volt, 1998-ban 1745 ppb-re, 2008-ban pedig 1800 ppb-re emelkedett. 2010-ben az összes ágazatból származó globális emberi eredetű metánkibocsátást 6,875 millió tonna  $\text{CO}_2$ -egyenértékre ( $\text{MtCO}_{2\text{eq}}$ ) becsülték. [13] A kibocsátások antropogén forrásait három ágazatba, a mezőgazdaság, az energia és a hulladékok közé sorolják. Az ezen ágazatokból származó metánkibocsátás múltbeli tendenciáit a forrásokon keresztül vizsgáljuk, majd a következő fejezetben mérséklési és csökkentési stratégiákat javasolunk.

#### 3.1. A mezőgazdaság metán kibocsátása

Az elmúlt 60 évben a globális élelmezés ellátó rendszerek hatalmas átalakuláson mentek keresztül. A termelés és a termelékenység jelentős növekedése, valamint az élelmiszerárak csökkenése olyan bőséges élelmiszerellátást eredményezett, amely világszerte jelentősen csökkentette a szegénységet és az éhezést. Ezek az előnyök azonban környezeti és éghajlati terhekkel is jártak. Az ember által okozott metánkibocsátás 40%-áért ma már a mezőgazdaság felelős, így a mezőgazdaság a légkörbe jutó e nagyhatású és káros gáz legnagyobb forrása,  $0,2^\circ\text{C}$ -kal járul hozzá a felmelegedéshez. Csökkentése kritikus fontosságú ahhoz, hogy a felmelegedést kezelhető szinten tartsuk. A mezőgazdasághoz kötődő metánkibocsátás három fő forrásból származik:

- Enterális kibocsátás (73%): A bélrendszeri metán a kérődző állatok (pl. szarvasmarha, juh, kecske, bivaly, teve) emésztőrendszerében keletkezik, amikor a bendőben, az egyik gyomorban lévő mikroorganizmusok lebontják a táplálékot. A kérődzők ezt a metánt főként bőfűgással (95%) ürítik ki.
- Trágyakezelés (7%): Amikor a haszonállatok trágyáját tárolják, a mikroorganizmusok által lebontott trágya metánt bocsát ki.
- Rizstermesztés (20%): A rizstermesztés során a földeket elárasztják, és a talajban lévő baktériumok lebontják a szerves anyagokat, és metánt szabadítanak fel. [14]

#### 3.2. Az energiaipar metán kibocsátása

A Nemzetközi Energiaügynökség becslése szerint a fosszilis tüzelőanyagok előállításának és felhasználásának 2023-ban közel 120 Mt metánkibocsátást eredményezett, további 10 Mt pedig bioenergiából származott - nagyrészt a biomassza hagyományos felhasználásából. A kibocsátás 2019 óta, amikor is rekordmagasságot ért el, körülbelül ezen a szinten maradt. Mivel a fosszilis tüzelőanyag-kínálat tovább bővült, ez azt jelzi, hogy a termelés átlagos metánintenzitása globálisan kis mértékben csökkent ebben az időszakban. Az IEA legfrissebb Globális metánkövetési jelentése az energiaágazatból származó metánkibocsátásra vonatkozó legfrissebb rendelkezésre álló adatokon alapul, és új tudományos tanulmányokat, mérési kampányokat és műholdakról gyűjtött információkat is tartalmaz. A műholdak által észlelt nagy metánkibocsátási események 2023-ban 2022-hez képest szintén több mint 50%-kal nőttek, több mint 5 Mt metánkibocsátást észlelve a fosszilis tüzelőanyagok nagyobb szivárgásaiból világszerte - köztük egy nagyobb kútkitörés Kazahsztánban, amely több mint 200 napig tartott.

A fosszilis tüzelőanyagokhoz kötődő becsült közel 120 Mt mennyiségből, mintegy 80 Mt olyan országokból származik, amelyek a globális emisszió első 10 legnagyobb kibocsátója között vannak. Az olaj- és gázipar legnagyobb kibocsátója az Egyesült Államok, amelyet szorosan követ Oroszország, a szénszektor messze legnagyobb kibocsátásáért Kína felel. A fosszilis tüzelőanyagokkal kapcsolatos műveletek során 2023-ban globálisan 170 milliárd köbméter metánt veszítettek el, ami több, mint Katar földgáztermelése.

Az olaj- és gázkitermelés metán szivárgási intenzitása igen eltérő. A legjobban teljesítő országok több mint 100-szor jobb eredményt érnek el, mint a legrosszabbak. Norvégiában és Hollandiában a legalacsonyabb a kibocsátási intenzitás. A közel-keleti országok, például Szaúd-Arábia és az Egyesült Arab Emírségek szintén viszonylag alacsony kibocsátási intenzitással rendelkeznek. Türkmenisztánnak és Venezuelának a legmagasabb. A magas kibocsátási intenzitás nem elkerülhetetlen; a magas működési normák, a szakpolitikai intézkedések és a technológia bevezetése kombinációjával költséghatékonyan kezelhető. Mindezek tekintetében a legjobb gyakorlatok jól kidolgozottak. [17].

### 3.3. A hulladékkezelés metán kibocsátása

A növekvő vásárlóerővel rendelkező, növekvő világnépesség a fogyasztás és a hulladéktermelés emelkedéséhez vezet. A legintenzívebben bővülő népességű országokban - a Szaharától délre fekvő Afrikában, Dél-Ázsiában, valamint a Közel-Keleten és Észak-Afrikában - a szilárd hulladékok elhelyezése gyakran kezeletlen szeméttelpek, ami növeli a közegészségügyi kockázatokat és a metánkibocsátást. 2020-ban csak a települési szilárd hulladéklerakókból származó, ember okozta globális metánkibocsátás 20 éves távlatban körülbelül 4,4 milliárd tonna CO<sub>2</sub> felmelegedéssel azonos felmelegedési hatással bírt. Ez körülbelül 950 millió személygépkocsi éves kibocsátásának felel meg. [16]

## 4. Az ágazatok metánkibocsátás csökkentési stratégiái

Az antropogén metán kibocsátás csökkentés innovatív technológiák adaptálásával valósítható meg. Az alábbi fejezetben a három kiemelt szektor kibocsátás csökkentésének egyes megoldásai kerülnek összefoglalásra, a teljesség igénye nélkül és a terjedelmi korlátok okán.

### 4.1. A mezőgazdasági ágazat metánkibocsátás mérséklésének megoldásai

Az országos szintű fellépés kritikus fontosságú a globális mezőgazdasági kibocsátások csökkentéséhez. Az ágazat hatékony mérséklési intézkedései azonban számos tényezőtől függenek, például régiótól és természeti környezettől, társadalmi-gazdasági szempontoktól, helyi táplálkozási szokásoktól, valamint a termelési rendszertől. (pl. legelő vagy istálló). Egyes megoldások esetében gyorsított és fokozott kutatásra van szükség az egyes folyamatok megvalósíthatóságának és költségeinek értékeléséhez.

Az alábbi megoldások jelentős mértékben hozzájárulhatnak a metán kibocsátás csökkentéséhez:

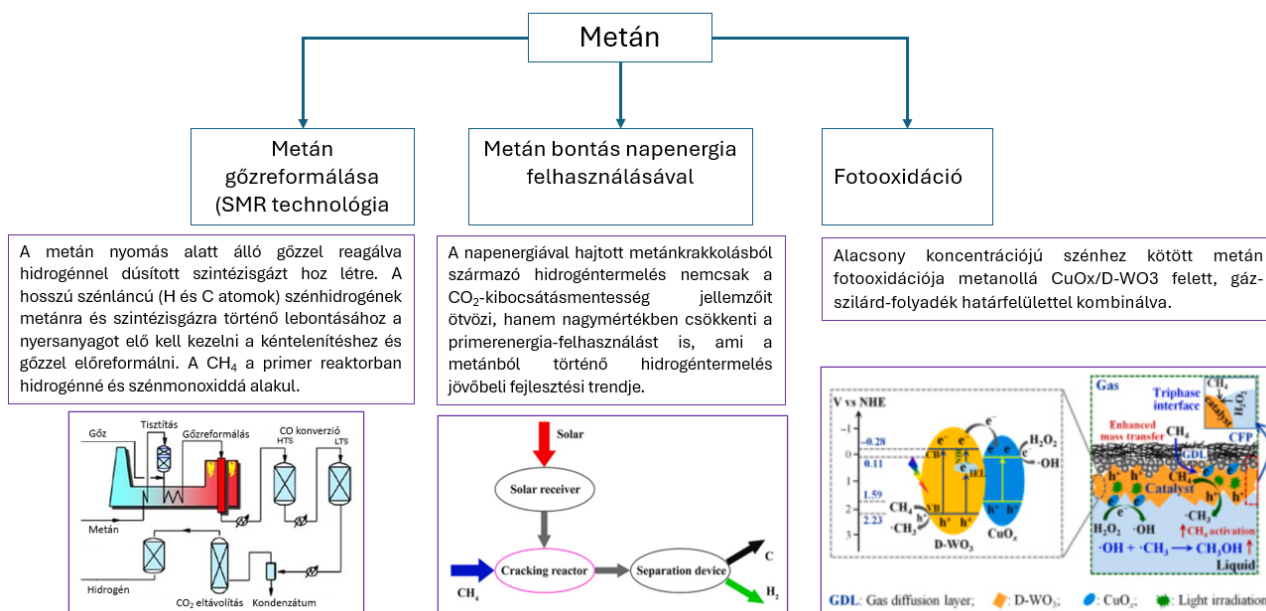
- A kérődző állatok termelékenységének és hatékonyságának növelése több jövedelmet biztosíthat a gazdáknak, ugyanakkor csökkentheti az egy állatra és/vagy egységnyi tejre vagy hústra jutó bélrendszeri metánkibocsátást.
- A bélben végbemenő erjedés csökkentése. Azok a stratégiák, amelyek takarmány-adalékanyagokat használnak az erjedés csökkentésére, a kutatás korai szakaszában vannak. A lehetséges adalékanyagok közé tartozik azonban a vörös hínár, a 3-nitrooxipropanol, a nitrátok, a zsírsav-kiegészítés, az illóolajok, az ionoforok és más takarmányok, gyógyszerek vagy kiegészítők. Ezenkívül az egyes kutatások olyan vakcinákat tesztelnek, amelyek a szarvasmarhák metanogenezisét okozó organizmusokat célozzák meg, manipulálják a kérődzők gyomrának mikrobiológiai közösségeit és szelektíven tenyésztik a kevesebb kibocsátást termelő állatokat.
- A trágyakezelés javítása. A száraz és nedves tárolási stratégiákkal való kísérletezés – például szalma, műanyag és szilárd burkolatok használata, az aalom anyagának megváltoztatása, valamint a nedves trágya adalékanyagainak hígítása és használata – mind kulcsfontosságú lehet a trágya metánkibocsátásának csökkentésében. Hatékony szerves hulladék eljárási megoldás lehet a hőmérséklet beállítása és a kémiai adalékanyagok használata, amelyek eredményesnek bizonyulnak a komposztálás során fellépő kibocsátások csökkentésében.
- A rizstermesztésből származó metánkibocsátás mérséklésében hatékonyak lehetnek az olyan rizsgazdálkodási stratégiák, mint a rizs hozamnövekedésének felgyorsítása, a rizsszalma eltávolítása az elárasztott földekről, az árvízi időszakok csökkentése és az alacsonyabb metán-dioxid-kibocsátású rizs nemesítése. Továbbá a jobb vízgazdálkodás, az alternatív nedves-száraz módszer, a nem vízigényes aerob rizstermesztés és a száraz vetés, szintén csökkentheti a rizstermelésből származó kibocsátást. Metánszint csökkenés érhető el a műanyag fóliás mulcsozással, az árpagénnel módosított rizs vetésével, hatékony műtrágyagazdálkodással is. [15]

### 4.2. Az energiaágazat metánkibocsátásának csökkentése

A többi ágazat mitigációs megoldásaival összehasonlítva az olaj- és gáziparból származó metán mérséklése viszonylag alacsony költséggel megoldható. Egyes intézkedések még pénzmegtakarítással is járnak, ha figyelembe vesszük a le nem fűvatott gázmennyiségek értékesítéséből származó többletbevételt. A Nemzetközi Energiaügynökség becslése szerint a mai technológiával globálisan 75%-kal, 50%-kal pedig nettó költség nélkül csökkenthető az olaj- és gázipari metánkibocsátás mennyisége. Már az 50%-os csökkentés is ugyanolyan hosszú távú éghajlati hatással járna, mintha Kínában bezárnák az összes szénerőművet. Jelenleg az alkalmazott technológiák széles körben kategorizálhatók metánleválasztási és -tárolási technológiákra, közvetlen égetésre és metán újra felhasználásra. Az olaj- és gáziparban a metánleválasztási és -tárolási műveletek részben hasonlóak a szén-dioxid-leválasztási és -tárolási

technológiákhoz. Ugyanakkor hasonló végrehajtási dilemmákkal szembesülhetnek az energiafogyasztás, az üzemeltetési költségek és a karbantartással kapcsolatos biztonsági kérdések terén, mint amelyek a széndioxid-leválasztási és -tárolási módszerekkel kapcsolatosak.

Előfordulhat, hogy a metán közvetlen elégetése nem elegendő, különösen híg metán-levegő áramlások esetén, ami extra széndioxid-kibocsátást, meg nem gyújtott metánszivárgást és lehetséges légszennyező kibocsátást eredményez, amelyet fokozatosan terveznek kivezetni. A fenti két technológiától eltérően a metán újra hasznosítása nagy potenciállal rendelkezik a vegyi áruk nyersolaj felhasználása nélküli előállítására és a metán által okozott környezetszennyezés csökkentésére vonatkozóan. A kutatók három innovatív módszert vizsgálnak a kiszivárgott metán befogására és felhasználására a környezeti hatások csökkentése és energiaforrásként történő felhasználása érdekében. Az alábbi útvonalak ígéretes megoldásokat kínálnak a metán hasznosítására. [18]



### 4.3. A metánkibocsátás visszaszorítása a hulladékgazdálkodás területén

A hulladékgazdálkodási hierarchia metángazdálkodásra való adaptálásával a hulladék értéklánc teljes vertikumában prioritással bírhatnak az egyes metáncsökkentési megoldások. Ezek közé tartozik a forrás-csökkentés, például az élelmiszer hulladék megelőzése, valamint a szerves anyagok komposztálásra, biogázzá vagy más hasznos felhasználásra történő átállás elősegítése. A hulladék rekultiválás ellenére a korábban deponált szerves anyagokból származó metán emissziója még évtizedekig fenyegetést jelent. Ezért olyan kiegészítő megoldásokra van szükség, amelyek a hulladéklerakók korszerűsítése, valamint a hulladéklerakók jobb kialakítása és üzemeltetése révén optimalizálják a metán megkötését, átfogó kibocsátás-ellenőrzéssel párosítva. Ha a hulladékot ugyanolyan értékes erőforrásként kezeljük, mint az energiát, akkor a csökkentés, az újra felhasználás és az újrahasznosítás révén profitálhatunk belőle. Az élelmiszer maradék, ha a hulladéklerakóba kerül, metánt termelve bomlik el, és a természetéhez felhasznált energia és tápanyagok örökre elvesz. Amennyiben anaerob lebontás vagy komposztálás útján kezeljük, akkor biogázt nyerhetünk az energia és a komposzt hasznosítása érdekében. Hatékonyabb megoldással szolgál az élelmiszer veszteségek csökkentése és a fel nem használt élelmiszerek jótékony továbbadása rászorulóknak, így nincs szükség a hulladék formában történő kezelésre. [16]

## 5. Konklúzió

A metánkibocsátás csökkentésére irányuló erőfeszítések az energetikai infrastruktúra fejlesztésétől a fenntartható mezőgazdasági gyakorlatokig és hulladékgazdálkodásig terjednek, amelyek mindegyike az üvegházhatású gázok éghajlatra gyakorolt hatásának enyhítését célozza. A zöld technológiák kulcsszerepet játszanak a természeti erőforrásokkal való gazdálkodás hatékonyságának növelésében és a metánkibocsátás visszaszorításában, hozzájárulva a fenntarthatóbb és környezettudatosabb jövőhöz. Ezek az innovatív technológiák a megújuló energiaforrásokat, az energiahatékonyságot és az erőforrás-megőrzést előtérbe helyező megoldások széles skáláját ölelik fel. A tiszta energiaforrások, például a nap-, szél- és vízenergia

kiaknázásával egy ország csökkentheti a fosszilis tüzelőanyagoktól való függőségét és enyhítheti az energiatermelés környezeti hatásait. Ezzel párhuzamosan az energiahatékony technológiák és gyakorlatok fejlődése lehetővé teszi számunkra, hogy optimalizáljuk az erőforrások felhasználását, miközben minimalizáljuk a hulladékot és a károsanyag-kibocsátást. Különösen a zöld technológiák rejtenek nagy lehetőségeket az ipari folyamatokból, a mezőgazdaságból és a hulladékgazdálkodásból gyakran eredő metánkibocsátás mérséklésében. Az olyan megoldások bevezetése, mint az anaerob rothasztók, amelyek metánt kötnek le a szerves hulladékból, és a precíziós mezőgazdasági módszerek, amelyek csökkentik a metántermelési gyakorlatokat a mezőgazdaságban, ígéretes megoldásokat kínálnak. A szélesebb erőforrás-gazdálkodási stratégiákba beépítve ezek a zöld technológiák nemcsak csökkentik a kibocsátást, hanem növelik az erőforrás-felhasználás hatékonyságát is. Az ilyen innovációk felkarolása nem csupán környezetvédelmi szükségszerűség, hanem egy fenntarthatóbb és ellenállóbb jövő felé vezető körültekintő út.

## Irodalom

- 1 IPCC, 2013. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1535.
- 2 United Nations Environment Programme (UNEP), 2022. *An Eye on Methane: International Methane Emissions Observatory 2022*. Nairobi.
- 3 Ratna, T.S., Akhter, T., Chowdhury, A., Ahmed, F., 2023. Unveiling the causal link between livestock farming, economic development, and methane emissions in Bangladesh: a VECM investigation. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*
- 4 Chen, D., Chen, A., Hu, X., Li, B., Li, X., Guo, L., Feng, R., Yang, Y., Fang, X., 2022. Substantial methane emissions from abandoned coal mines in China. *Environ. Res.* 214 (2), 113944.
- 5 Global Carbon Project, 2025. <https://www.globalcarbonproject.org/methanebudget/>
- 6 Revell, L.E., et al., 2016. The role of methane in projections of 21st century stratospheric water vapour. *Atmos. Chem. Phys.* 16 (20), 13067–13080.
- 7 Sloan, L.C., et al., 1992. Possible methane-induced polar warming in the early Eocene. *Nature* 357 (6376), 320–322.
- 8 Kirk-Davidoff, D.B., Schrag, D.P., Anderson, J.G., 2002. On the feedback of stratospheric clouds on polar climate. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2002gl014659>.
- 9 Lin, P., et al., 2017. Changes of the tropical tropopause layer under global warming. *J. Clim.* 30 (4), 1245–1258
- 10 Wuebbles, D.J., 2008. Oxygen cycle. In: Jørgensen, S.E., Fath, B.D. (Eds.), *Encyclopedia of Ecology*. Academic Press, Oxford, pp. 2609–2615.;
- 11 *Ozone in Our Atmosphere*, 2010. NOAA. <https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2010/twentyquestions/Q1.pdf>.
- 12 <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2024>
- 13 R. O. Yusuf et al., 2012. Methane emission by sectors: A comprehensive review of emission sources and mitigation methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, pp. 5059–5070
- 14 The United Nations Environmental Program, Climate and Clean Air Coalition (2022). *Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions*.
- 15 Climate and Clean Air Coalition: Methane emission mitigation in the agriculture sector <https://www.ccacoalition.org>
- 16 *Managing Methane in the Waste Sector*: <https://rmi.org/our-work/climate-aligned-industries/managing-methane-in-the-waste-sector/>
- 17 International Energy Agency: *Global Methane Tracker 2024*.
- 18 R. Tamilselvan; A Immanuel Selwynraj: Model development for biogas generation, purification and hydrogen production via steam methane reforming, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 50, Part B, 2 January 2024, Pages 211-225