



MAGYAR AGRÁR- ÉS  
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

---

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

METANOLGAZDASÁG: HÍD AZ ALACSONY SZÉN-  
DIOXID-KIBOCSÁTÁSÚ GAZDASÁGHOZ,  
MAGYARORSZÁGI VETÜLETEK

DOI: 10.54598/001390

KÉSZÍTETTE: TÓTH JUDIT

GÖDÖLLŐ

2021





**„Ma kell azon gondolkodnunk, amin a holnap technológiája alapszik”**

**Oláh György**

## Tartalomjegyzék

<b>1. BEVEZETÉS.....</b>	<b>6</b>
1.1. A téma aktualitása, jelentősége .....	6
<b>2. CÉLKITŰZÉSEK.....</b>	<b>9</b>
2.1. Kutatási hipotézisek .....	9
<b>3. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS.....</b>	<b>10</b>
3.1. A globális energiatermelés és -fogyasztás .....	10
3.2. Az üvegházhatású gázok légköri koncentrációja .....	15
3.3. Az EU energiastratégiája .....	17
3.3.1. A 2020-as célok megvalósulása.....	18
3.3.2. Az Európai Unió hosszú távú stratégiai jövőképe .....	21
3.3.3. Hidrogénstratégia a klímasemleges Európáért.....	24
3.4. A körforgásos gazdaság mint az üvegházhatásúgáz-kibocsátás csökkentésének kulcsfontosságú tényezője	24
3.4.1. Az EU körkörös gazdálkodási akcióterve .....	25
3.4.2. Az EU hulladékgazdálkodási irányelve .....	27
3.4.3. A hulladékok energetikai hasznosításának szerepe a körforgásos gazdaságban .....	29
3.4.4. A körkörös gazdaság indikátorai .....	31
3.5. A metanolgazdaság.....	34
3.5.1. A légköri szén-dioxid mennyiségének csökkentése CCU technológiával .....	35
3.5.2. A metanol mint vegyipari alapanyag .....	36
3.5.3. A metanol szerepe az energiarendszerben .....	38
3.5.4. A metanolgyártás útvonalai .....	44
3.5.5. A metanol szerepe a körkörös gazdaságban .....	45
<b>4. ANYAG ÉS MÓDSZER .....</b>	<b>50</b>
4.1. Az életciklus-elemzések .....	50
4.2. A magyarországi megújuló metanolt gyártó üzem lehetőségének vizsgálata .....	53
<b>5. EREDMÉNYEK .....</b>	<b>55</b>
5.1. Milyen hatása van az ÜHG-kibocsátásra a metanolgazdaságnak, illetve környezeti előnyökkel jár-e a magvalósítása .....	55
5.1.1. A metanol üzemanyag hatásai .....	55

5.1.2. CCU technológiák környezeti hatásai.....	57
<b>5.2. Magyarország alapanyag-ellátottsága a biometanol és e-metanol gyártásához.....</b>	<b>60</b>
5.2.1. Mezőgazdasági melléktermékek.....	60
5.2.2. Települési szilárd hulladék, depóniagáz, biogáz.....	61
5.2.3. Szén-dioxid-pontforrások.....	66
5.2.4. A megújuló hidrogén.....	70
<b>5.3. Az energiaszükséglet fedezése.....</b>	<b>70</b>
<b>5.4. Biometanol, e-metanol üzem optimális helyének kiválasztása.....</b>	<b>75</b>
5.4.1. Fotovoltatikus erőművek elhelyezkedése.....	75
5.4.2. Szén-dioxid-pontforrásokra alapozott metanol üzemek lehetséges helyszínei.....	77
5.4.3. Biometanol üzemek lehetséges helyszínei.....	80
<b>5.5. A biometanol és e-metanol gyártás gazdaságossági vetülete.....</b>	<b>81</b>
5.5.1. Anyag- és energiafelhasználás az erőművi és ipari füstgázokból kiinduló gyártás során.....	81
5.5.2. Anyag- és energiafelhasználás biomassza erőművel kapcsolt metanol üzem esetén.....	84
5.5.3. Szén-dioxid-kibocsátásra gyakorolt hatás.....	84
5.5.4. A gazdaságos biometanol és e-metanol gyártás perspektívája.....	85
<b>6. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....</b>	<b>91</b>
6.1. Hipotézisvizsgálat eredménye.....	91
6.2. Javaslatok.....	94
<b>7. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....</b>	<b>95</b>
<b>8. ÖSSZEFOGLALÁS.....</b>	<b>96</b>
<b>9. SUMMARY.....</b>	<b>98</b>
<b>10. MELLÉKLETEK.....</b>	<b>100</b>
M1. Irodalomjegyzék.....	100
M2. Ábrajegyzék.....	114
M3. Táblázatok jegyzéke.....	116
<b>KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....</b>	<b>117</b>

# 1. BEVEZETÉS

## 1.1. A téma aktualitása, jelentősége

Az emberiség történelme rendkívül szoros kapcsolatban áll az energiahordozókkal, az azoktól való függésünk több évezredes. Az erőforrások közül az energia mindig is az egyik legfontosabb volt, mert hozzájárult az emberi társadalmak fejlődéséhez és jólétéhez. Az emberiség történetének első kb. 4000 éve során alapvetően fát alkalmaztak energiaforrásként, vagyis a megújuló energia használata volt a jellemző. Az első jelentős váltás a szén használatára való áttérés volt, ami bizonyos iparágakban már a 18. században megtörtént, míg a fűtés esetében ez a 19. századra tehető (FOUQUET 2011). A szénforrások korlátozott mennyiségének felismerése és a belső égésű motorok megjelenése újabb váltást eredményezett a 19. század végén, amikor a kőolaj felhasználásának korszaka következett. A változásoknak mindig is két fő mozgatórugója volt: egyrészt az energiahordozók árának alakulása (például a fa tüzelőanyag ára 1650 és 1740 között jelentősen emelkedett), másrészt a technológiai fejlődés. A szén, majd a kőolaj alkalmazására való átállás zökkenőmentesen történt. A földgáz felhasználásának megjelenése azonban alapvető változásokat eredményezett: felgyorsult a szárazföldi szállítmányozás, valamint megtörtént a levegő szállítási célú meghódítása is. Az energiafelhasználás robbanásszerűen megemelkedett, s ez a tendencia azóta is tart.

Az energia fogyasztásának további nagymértékű emelkedése várható, mivel az ezt befolyásoló kulcsfontosságú tényezők ebbe az irányba hatnak, gondolok itt a Föld lakosságának, valamint az életszínvonalnak az emelkedésére. Általánosságban igaz, hogy ha az életminőség javul, akkor az egy főre jutó energiafogyasztás is nő. Ez utóbbi tulajdonképpen három tényező kombinációjaként értelmezhető: a népesség, az egy főre jutó GDP, továbbá a gazdaság energaintenzitása (azaz a GDP egy egységére alkalmazott energia). Az előrejelzések szerint 2040-ig az energiaigény abszolút értékben nő, bár a növekedési ütem százalékos arányban lassul. Kérdés, hogy a napjainkban játszódó energiaátmenet olyan zökkenőmentes lesz-e, mint az eddigiek. Ezt döntően befolyásolja a rendelkezésre álló kőolaj- és földgázkészletek nagysága, az üvegházhatású gázok hatása a Föld éghajlatára, valamint az, hogy az alternatív energiaforrásokhoz való hozzáférés versenyképes lesz-e. 1980-ban legkésőbb 2010-re jóslták a kőolajkészletek elfogyását, de 2010-ben még további 45 évre elegendő készletet prognosztizáltak. A földgázzal kapcsolatos előrejelzések is hasonlóak, 1980-tól 2010-ig kb. 48 évről mintegy 60 évre növekedett a készletek kimerülését jósoló mutató. Tehát a fogyasztásnövekedést ellensúlyozta, hogy az elmúlt évtizedekben gyors ütemben fedezték fel az új kőolajkészleteket, valamint a korábbi körülmények között még nem gazdaságosan kitermelhető telepek bányászata időközben gazdaságossá vált a technológiai fejlődésnek és a

megváltozott környezetnek köszönhetően. Jellegzetes példa erre, hogy az USA földgázexportórré vált a „nem konvencionális” földgáztelepek hasznosítása által. Feltételezhető, hogy az elkövetkező néhány évtizedben nem fognak kimerülni a kőolaj- és földgázkészletek, mivel új lelőhelyeket fedeznek fel, továbbá új kitermelési technológiákat alkalmaznak. A legnehezebb kérdés a kőolaj és a földgáz árának megőlése, mivel azt a politikai események nagymértékben befolyásolják (PÁPAY 2015). Az 1970-es évekbeli energiakrízis rádöbentette a világot, hogy egyes országok gazdasága mennyire kiszolgáltatott a kőolajat termelő és exportáló államoknak. Ezt a tény felismerve több ország lépéseket tett annak érdekében, hogy a kőolaj kiváltását célzó kísérletek, kutatások felgyorsuljanak. 1975-től több helyen folytak kísérletek kormányzati támogatással, s a kőolaj helyettesítésének problémája azóta is állandóan megjelenik a kísérleti, kutatási tevékenységekben. Napjainkban mindezt nemcsak a gazdasági függőség csökkentésének szándéka indokolja, hanem az a tény is, hogy a XXI. század egyik legnagyobb kihívása az éghajlatváltozásnak tulajdonítható problémák megoldása (SZLÁVIK 2007). Az ENSZ Klímaváltozási Konvenciójának (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) keretében 1997-ben létrejött a kiotói egyezmény, amelynek célja a légkör üvegházhatású gázkoncentrációjának stabilizálása volt, hogy a klímaváltozás és a globális felmelegedés előrelátható hatásait enyhíteni tudják (UNITED NATIONS 1997). Az egyezmény egyik hiányossága, hogy nem javasolt technológiai megoldást a probléma kezelésére, valamint csak a fejlett országok számára írt elő – többek között a kibocsátás szabályozásával kapcsolatos – 2012 végéig terjedő kötelezettségeket. A begyűjtött adatok alapján hamar nyilvánvalóvá vált, hogy globális léptékben a hosszú légtér tartózkodási idejű üvegházhatású gázok (ÜHG) kibocsátásai továbbra is ütemesen növekedtek. A fejlett gazdasággal rendelkező országok jelentős eredményeket értek el a CO<sub>2</sub>-kibocsátás csökkentésében, de ezt ellensúlyozza a (főként ázsiai) fejlődő gazdaságok kibocsátása, s így a nettó szén-dioxid-kibocsátás továbbra is növekszik.

A célok egyértelműek, azonban a problémák megoldásához vezető út még vitatott. A tudomány segít az új alapanyagok feltalálásában és felhasználásuk kimunkálásában, az új technológiák alkalmazásában, de még nem születtek meg az egyértelmű szakmai megoldások. A technológiai fejlesztések párhuzamosan haladnak több területen is:

- az energiaellátás terén a különböző megújuló energiák, valamint az energiatermelésre alkalmas magfúzió jelentős kutatási potenciállal bír;
- az elektromos járművek energiaellátásában az akkumulátor és a tüzelőanyag-cella versenyzik;
- a tüzelőanyag-cellák esetében a hidrogén- vagy a metanolüzemű alkalmazásokhoz kapcsolódó innovációk bírnak jelentős súllyal.



Az energiaágazat diverzifikálása egy megoldási lehetőség, s a szén-dioxid egy primer nyersanyaggá válhat, de ehhez számottevő és folyamatos kutatási erőfeszítésekre van szükség. A metanolgazdaság koncepciója és annak megvalósítása ígéretes lehetőség a globális problémák megoldására (KOTHANDARAMAN et al. 2017). A jövőbeli szakpolitikák felelősök abban, hogy a szén-dioxid hatékony és versenyképes alapanyag lesz-e, amely számos iparágban megjelenhet. Nem utolsó sorban pedig a társadalom felelőssége is, hogy a politikai döntéshozók megfontolják a tudományos eredményeket, és stratégiát építsenek fenntarthatóbb világunk megteremtéséért (KESZI SZEREMLEI – MAGDA 2015).

## 2. CÉLKITŰZÉSEK

A fosszilis tüzelőanyag felhasználási területeinek jelentős részét képesek leszünk alternatív forrásokból származó energiával helyettesíteni, ugyanakkor bizonyos területeken továbbra is szükség van a szénttartalmú termékekre, elég ehhez a közvetlen környezetünket alkotó tárgyakra gondolni. A szénttartalmú alapanyagok használata mind az energetikában, mind a műanyaggyártásban még hosszú ideig jelen lesz, bár új technológiai útvonalak fognak megjelenni. Az új technológiák elterjedését segíti, ha a bennük rejlő kockázatokat, valamint a környezeti hatásait felmérjük és megismerjük. Az életciklus hatáselemzés (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) a környezetbe való beavatkozások közvetlen és közvetett hatásait igyekszik minél pontosabban meghatározni. A kutatásom arra irányul, hogy életciklus hatáselemzés segítségével meghatározzam a metanolgazdaság technológiai folyamataihoz társuló környezeti terhelés mértékét a rendelkezésre álló szakirodalom alapján. További kutatási célom feltárni a metanolgazdaság koncepciójának kapcsolódási pontjait az Európai Unió energiastratégiájához, a körkörös gazdasághoz, és a klímapolitikai célokhoz, valamint a metanol tulajdonságai alapján bemutatni a lehetséges felhasználási területeket a jövő gazdaságában és energiarendszerében a releváns szakirodalom alapján. További célom, hogy felmérjem a megújuló metanol gyártásának hazai potenciális alapanyagait, valamint a versenyképes metanolgyártáshoz szükséges körülményeket.

### 2.1. Kutatási hipotézisek

H<sub>1</sub> hipotézis: A metanol felhasználása környezeti előnyökkel jár, a megfelelő technológia és energiaforrások alkalmazásával előállított metanol a globális felmelegedés elleni fellépésben eredményesen alkalmazható.

H<sub>2</sub> hipotézis: Magyarország rendelkezik a megújuló metanol gyártásához szükséges alapanyagokkal, elsősorban a kommunális hulladék, a szennyvíz és a biomassza felhasználása terén.

H<sub>3</sub> hipotézis: Magyarország energiatermelése nem biztosítja a megújuló metanol előállításához szükséges karbonsemleges villamos energiát.

H<sub>4</sub> hipotézis: Magyarországon a megújuló metanol gyártása a jelenlegi paraméterek mellett gazdasági előnyökkel nem jár, de az energiatermelés átalakulásával ez változhat.

### 3. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

RICHARD ERRETT SMALLEY (2005) kémiai Nobel-díjas tudós 2003-ban felvázolt tíz, az emberiség számára kiemelkedően fontos, az elkövetkező 50 évben megoldandó problémát:

1. Energiaellátás
2. Vízellátás
3. Élelmiszerellátás
4. Természeti környezet megvédése
5. Szegénység megszüntetése
6. Terrorizmus és háborúk kiküszöbölése
7. Betegségek elleni küzdelem
8. Oktatás korszerűsítése
9. Demokrácia biztosítása
10. Túlnépesedés megállítása (DINYA 2007).

A felsorolás egyben egy rangsort is képvisel, tehát a legnagyobb kihívás a megfelelő mennyiségű, tiszta forrásból származó energia előállítása. A kihívások szorosan összefüggnek egymással, a fenntarthatóság, a globális klímaváltozás és az energia problémakörének holisztikus megközelítése segíthet a problémák megoldásában (DINYA 2010).

#### 3.1. A globális energiatermelés és -fogyasztás

Az energiahordozók területét érintő váltások mindig is hosszabb időt igényeltek, amit magyaráz egyrészt a megfelelő technikai háttér kialakításának időigénye, másrészt a nagy tömegű tőke hosszú időtartamra való befektetésének szükségessége. Az elmúlt néhány évben azonban számos olyan változás következett be, amely gyorsítja a folyamatot. Ezek közé sorolható az észak-amerikai palaolaj- és palagázmezők várakozásokon felüli, gyors ütemű kitermelése, továbbá a megújuló villamos energia költségeinek gyors csökkenése. Ez utóbbiban vezető szerepet játszik a szél- és a napenergia termelésének dinamikus növekedése (NEWELL et al. 2016). A globális energiarendszerekben bekövetkező változásokra figyelmeztetnek azok az előrejelzések, amelyeket több szervezet is évente elkészít. A 2040-ig terjedő időszakra vonatkozó prognózisokból származó adatokat tartalmaz az 1. táblázat.

1. táblázat: A globális energiafogyasztással kapcsolatos előrejelzések néhány kiemelt adata

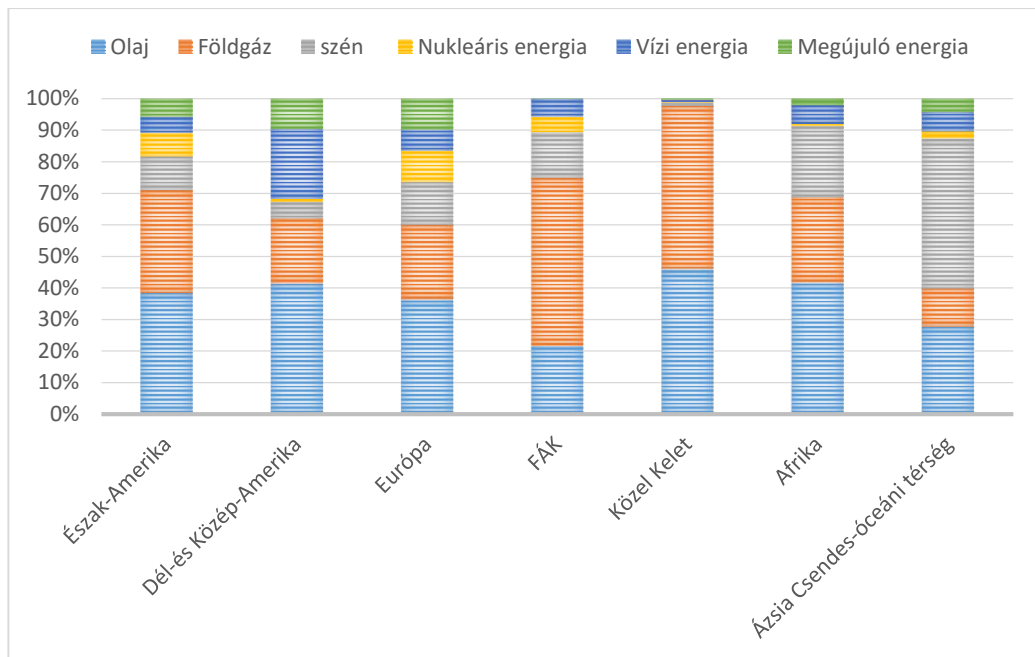
<b>Előrejelzés</b>	<b>A globális energiafogyasztás növekedése</b>	<b>A nem OECD országok energiafogyasztásának növekedése</b>	<b>Az energiaszektorra I kapcsolatos CO<sub>2</sub>-kibocsátás növekedése</b>
<b>EIA International Energy Outlook 2017 2015 és 2040 között</b>	28%	41%	évi 0,6%
<b>BP Outlook 2018 2016 és 2040 között</b>	35%	61%	évi 0,4%
<b>Exxon Mobil 2017 Outlook for Energy: A View to 2040 2015 és 2040 között</b>	24%	42%	10%-os növekedés a 2015-ös szinthez képest

Forrás: Saját szerkesztés az U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (2017); BP (2018); EXXONMOBIL (2017) alapján

Az előrejelzések bizonytalansága három tényezőnek köszönhető:

- kérdés, hogy a globális és regionális gazdaság tovább növekedik-e, s milyen mértékben;
- a globális és regionális népesség milyen ütemben bővül;
- s az energiaintenzitás milyen mértékben változik.

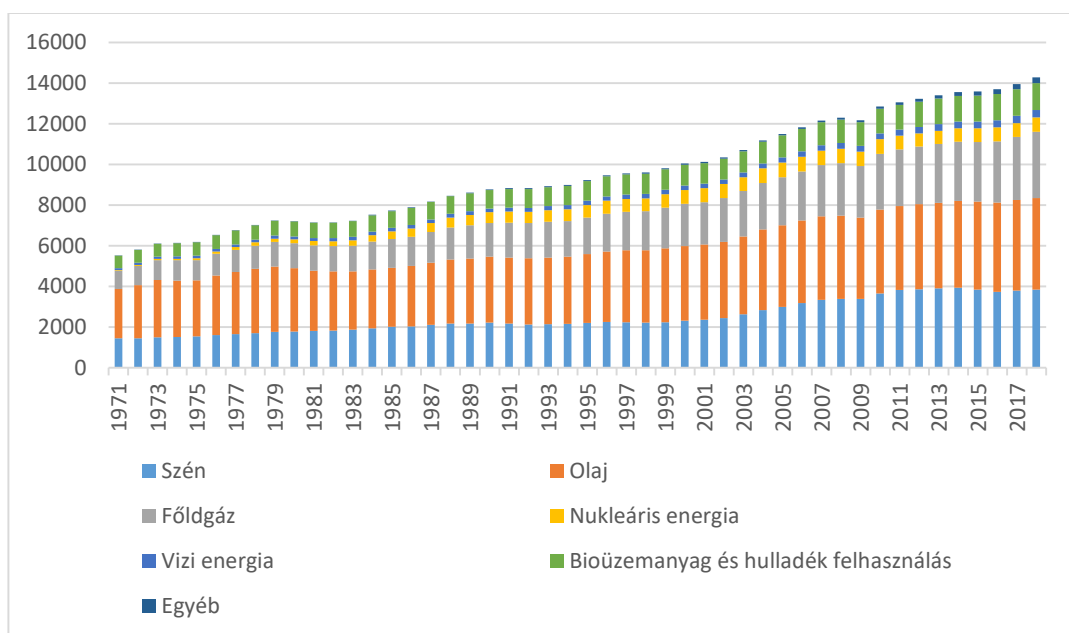
A prognózisok bizonytalanságát az is mutatja, hogy a 2000-es évek elején készült forgatókönyvek a megújuló energiák nagyobb arányú felhasználását jósolták erre az évtizedre, mint ami megvalósult. A Nemzetközi Energiaügynökség a globális energiafogyasztásból a megújuló energiák 30%-os arányát jelezte előre 2050-ig, míg a világ egyik legnagyobb olajtársasága, a Shell egyenesen 50%-os arányt vizionált. A forgatókönyvekben a 2000-es évek közepére 30-50%-os részesedés szerepelt. Ehhez képest a rendelkezésre álló adatok szerint a megújuló energia 2014-ben a globális végső energiafogyasztás 19,2%-át adta. Ebből a hagyományos biomassza, amely elsősorban a fejlődő országok főzésre és fűtésre használt energiáját jelenti, mintegy 8,9%-ot tett ki, a bioüzemanyagok pedig csupán 0,8%-os részesedéssel bírtak (REN21 2017). A 2019-es energiafogyasztás arányait az 1. ábra szemlélteti, amely szerint messze a várakozások alatti a megújuló energiák felhasználása a világon.



1. ábra: Regionális energiafogyasztás 2019-ben

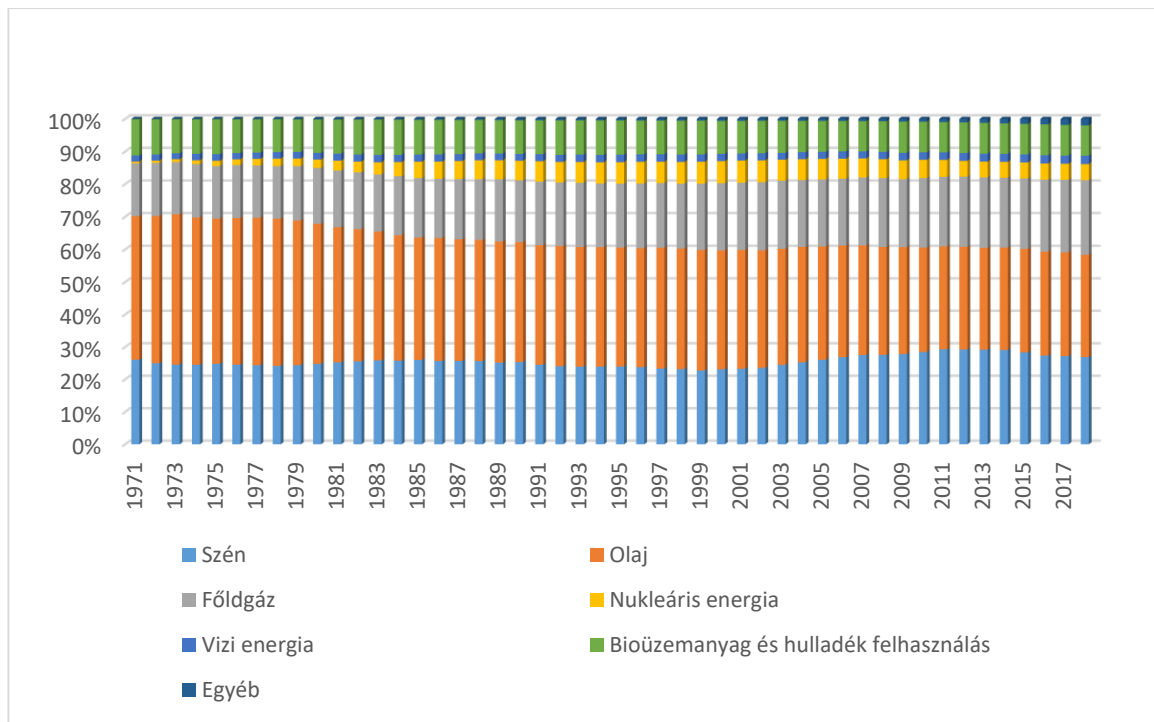
Forrás: Saját szerkesztés BP (2020) alapján

Az előrejelzések arra alapoztak, hogy a 2000-es évek elején a megújuló energiatermelés gyorsan növekedett. A 2. ábrán és a 3. ábrán azt mutatom be, hogy bár a megújuló energia használata gyorsan növekszik, annak aránya a teljes végső energiafogyasztásban nem nő ilyen ütemben, mivel minden forrás – fosszilis és megújuló – a keresletnek megfelelően nőtt, így a teljes százalékos részesedés nagyjából változatlan maradt.



2. ábra: Az elsődleges energiaellátás alakulása globálisan

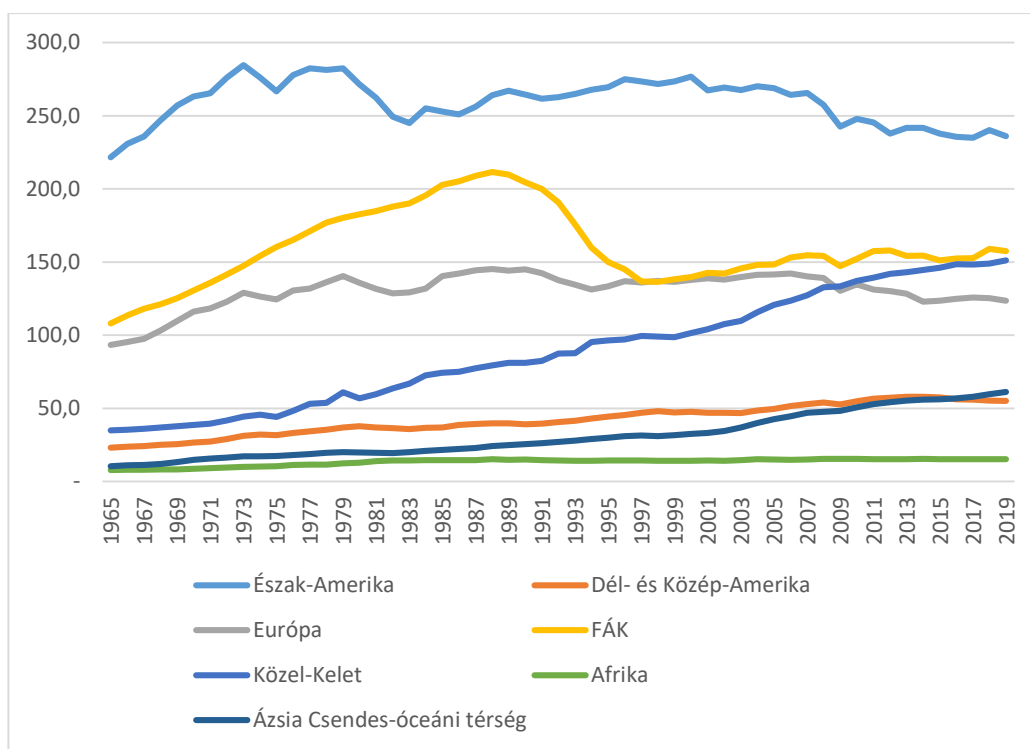
Forrás: Saját szerkesztés IEA (2019) alapján



3. ábra: Az elsődleges energiaellátás százalékos megoszlása globálisan

Forrás: Saját szerkesztés BP (2020) alapján

A 4. ábra szemlélteti, s az előrejelzések az mutatják, hogy az energiaigény növekedésének legnagyobb része várhatóan nem OECD-országokból származik. Ennek az az oka, hogy ezekben az országokban gyors népességyarapodás tapasztalható. A Föld lakosságának 2019 és 2050 közötti növekedését elsősorban a szubszaharai országok, másodsorban pedig a közép- és dél-ázsiai országok népességyarapodása okozza. Az előrejelzések szerint 52%-ban az első régió, s 25%-ban a második régió járul hozzá a bővüléséhez (UNITED NATIONS 2019). Az energiaigény növekedésének további magyarázata a nem OECD-országok várhatóan erőteljes gazdasági növekedése, valamint az, hogy a forgalomba hozott energiához szélesebb rétegek férnek hozzá.



4. ábra: Egy főre eső energiafogyasztás régióként (GigaJ/fő)

Forrás: Saját szerkesztés BP (2020) alapján

A globális energiafogyasztás mértékének és összetételének fő meghatározója a jövőben a közlekedési ágazat lesz, melynek energiaigénye sokkal dinamikusabban növekszik, mint a többi ágazaté. Ezt a növekvő járműlétszám és energiafelhasználás magyarázza, amit az energiahatékonyság növekedése nem tud semlegesíteni. A közlekedési ágazat nagymértékben támaszkodik a fosszilis tüzelőanyagokra, amelyet jól szemléltet, hogy 2019-ben a közlekedés volt a felelős az energiafogyasztással kapcsolatos globális üvegházhatású gázkibocsátás közel 25%-áért (REN21 2020).

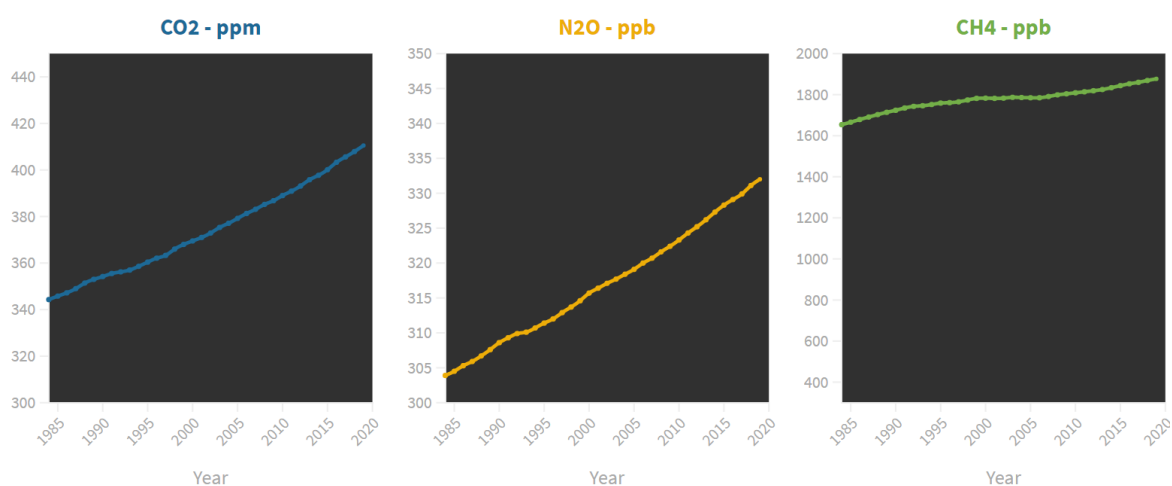
Globálisan tekintve a várakozások szerint a szén-dioxid-kibocsátás növekedésének üteme csökken az 1990 és 2015 közötti szinthez képest, s ez az energiahatékonyság növekedésének, valamint a megújuló energiaforrások felhasználásában mutatkozó előretörésnek köszönhető.

Annak ellenére, hogy a megújuló energia és az atomenergia a világ leggyorsabban növekvő energiaformái, a fosszilis tüzelőanyagok várhatóan továbbra is a globális energiaigény jelentős részét fogják fedezni. A legoptimistábbak az európai energiaügyi szakértők, akiknek 90%-a úgy gondolja, hogy a globális energiaszükséglet fedezésére több mint 60%-ban megújuló energiát fogunk használni 2050-ben (REN21 2017).

### 3.2. Az üvegházhatású gázok légköri koncentrációja

Az emberiség életmódjához köthető, környezetre gyakorolt hatások tekintetében vezető szereppel bírnak az élelmiszerfogyasztással, a lakhatással és a mobilitással kapcsolatos területek (TUKKER et al. 2006). Az anyagfelhasználáson túl az üvegházhatású gázok kibocsátása okoz jelentős problémát (KEREKES 2007). Svante Arrhenius svéd vegyész már 1895-ben kiszámolta, hogy ha a légköri szén-dioxid koncentrációja az emberi tevékenységek következtében a kétszeresére nőne, akkor a Föld átlagos felszíni hőmérséklete 5-6°C-kal emelkedne meg.

Az ipari forradalom korszaka előtt a szén-dioxid koncentrációja néhány ezer éven át stabilan 280 ppm körüli értéket mutatott, de ez 1750 óta folyamatosan növekszik (PRENTICE et al. 2000). A Hawaii szigetén lévő Mauna Loa vulkán csúcsának közelében egy hosszú távú kísérletsorozatban 1958 óta folyamatosan követik a levegő szén-dioxid-tartalmát. Ez a hely 4100 méterrel a tengerszint felett van, távol a nagy civilizációs központoktól, így itt valóban a Föld egészére jellemző, globális változásokat mutathatnak ki. A mérések története során a napi átlagos koncentráció először 2013. május 9-én lépte túl a 400 ppm-es (0,04%-os) határértéket, s a 2015-ös év volt az, amelyben 400 ppm-et meghaladó értéket mutatott a szén-dioxid globális légköri átlagkoncentrációja egész éven keresztül. Az 1750-es évekbeli ipari forradalom óta globális viszonylatban az üvegházhatású gázok közül a szén-dioxid mennyiségének növekedése 148%-os, a metáné 260%-os, a dinitrogén-oxidé pedig 123%-os volt 2019-ben, ahogy azt az 5. ábra mutatja. Az előrejelzések szerint a növekedés 2020-ban tovább folytatódott, a COVID-19 hatásainak ellenére (WMO 2021).



5. ábra: Üvegházhatású gázok légköri koncentrációjának változása

Forrás: WMO (2021)

Az üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedését elsősorban antropogén hatások okozzák. A fosszilis, szénalapú energiahordozók felhasználása a légkörben lévő szén-dioxid mennyiségének



növekedését eredményezi, s kisebb mértékben hozzájárul a metán koncentrációjának növekedéséhez is (POPP 2014). Az emberi tevékenységhez köthető teljes szén-dioxid-kibocsátást a tevékenység végeredményeként foghatjuk fel, s ezen a feltételezésen alapul a Yoichi Kaya professzor által 1990-ben javasolt mutató, amely az ÜHG kibocsátását az elégetett fosszilis tüzelőanyag mennyiségének és típusának függvényeként értelmezi. A „Kaya Identity” szerint a teljes szén-dioxid-kibocsátást négy tényező határozza meg:

- a népesség (N);
- az egy főre jutó GDP (GDP/N);
- az energaintenzitás (E/GDP);
- az energiaellátás szénintenzitása (C/E) (KAYA 1990).

Az elégetett tüzelőanyag mennyiségét meghatározza a populáció mérete, a társadalom életszínvonala. Az egy főre jutó GDP az életszínvonal jellemzője, mivel az alacsony egy főre jutó GDP-vel rendelkező országok lakosai kevésbé képesek kielégíteni az alapvető szükségleteiket (TUCKER 2019).

A „Kaya Identity” segítségével egyszerűen kifejezhető a szén-dioxid emisszió, mely a következő képlettel számolható:

$$C = N \times \frac{GDP}{N} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{C}{E}$$

2015. december 12-én elfogadták a Párizsi Megállapodást, amely 2016. november 4-én lépett életbe (UNITED NATIONS 2016). A klíma-megállapodás célja, hogy 2100-ig az átlaghőmérséklet változása a +2 °C-t ne haladja meg, sőt törekedjenek arra az államok, hogy 1,5 °C alatt maradjon ez az érték. A megállapodás világossá teszi, hogy a kibocsátásokat jelentősen mérsékelni kell, de konkrétumokat nem tartalmaz, a résztvevő országok pontos vállalásai csak a következő években kerülnek egyénileg meghatározásra. A fejlődő országok számára növekvő mértékű támogatást fognak biztosítani a fejlettek a kibocsátás szabályozásával, az alkalmazkodással, ezek tervezésével és az ezekről szóló nemzeti beszámolóikkal kapcsolatos feladataik ellátásához (FARAGÓ 2016). A „Kaya Identity” alkalmas a Párizsi Megállapodás végrehajtásának nyomon követésére, mivel minden komponense mérhető mutatókra bontható, továbbá különböző szinteken, különböző időtartamok esetén is alkalmazható (PETERS et al. 2017).

A megállapodás egy olyan fordulópontot jelez, amely az alacsony szén-dioxid-kibocsátású gazdaság felé vezet, s amelyet a technológiai, energetikai, pénzügyi ágazatokban folytatódó innováció segít.

### 3.3. Az EU energiastratégiája

Az Európai Energia Charta az első olyan dokumentum, amely a teljes energetika területén igyekszik elősegíteni az összeurópai együttműködést. Ezt 1991-ben írták alá, s az önellátás, a szabad piac és a környezetvédelem gondolatai jelennek meg benne. 2000-ben került elfogadásra a Zöld Könyv, amely a következő kérdéseket veti fel:

- a versenyképesség és az energetikai függőség összefüggése;
- az állam szerepe az energetikában a szabad versennyel szemben;
- az EU-n kívüli szállítók politikai kezelése;
- szállítási útvonalak biztosítása;
- stratégiai tartalékképzés;
- az újszerű megújuló technológiák a konvencionális technológiák által;
- klímaváltozás;
- energiahatékonyság;
- bioüzemanyagok;
- épületek fűtése;
- a vasúti közlekedés respektjének visszaállítása;
- közös tervezés az európai országokban.

2005-ben az olaj világszerte emelkedése erősítette annak igényét, hogy az Európai Unió belül kialakuljon egy egységes, hosszú távú energiapolitika. Az Európai Bizottság ennek hatására 2005-ben és 2006-ban jelentette meg a Zöld Könyvet (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2005), (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2006a) az energiahatékonyságról, illetve a fenntartható energiaellátásról, a versenyképességet és biztonságot szolgáló európai stratégiáról, majd a közösségi energiapolitikát máig meghatározó dokumentumot, az Energiahatékonysági cselekvési tervet (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2006b). Az Európai Tanács 2007-ben meghatározta a 2020-ra elérendő energiapolitikai és klímavédelmi céljait, amelyeket a zöld könyvekben meghatározott szakpolitikai programokra alapozott, és beillesztette az Európa 2020 stratégiába az Erőforrás-hatékony Európa kezdeményezéshez. Az energiapolitika célkitűzései a fenntarthatóságra, a versenyképességre és az ellátás biztonságára fókuszálnak: az üvegházhatású gázok kibocsátásának 20 százalékos csökkentése az 1990-es szinthez képest, a megújuló energiaforrások részarányának 20%-ra emelése a teljes energiafelhasználáson belül, valamint az energiahatékonyság 20%-os növelése 2020-ig (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2010). Az Európai Unió célkitűzése az, hogy ezek a számok átlagosan teljesüljenek, tehát nem kell minden tagállamnak külön-külön elérnie azokat. Ennek következményeként jelentős különbségek vannak az egyes tagállamok vállalásait tekintve. A

megújuló energia felhasználásának nagyobb részarányát vállaló országok húzóerővel bírnak a többiek számára, így sehol sincs 10% alatti vállalás. Még Málta is vállalta a 10%-os részesedést, annak ellenére, hogy 2005-ben még egyáltalán nem használtak megújuló energiát.

2. táblázat: A megújuló energiaforrásokból származó energia részaránya az energia bruttó végső fogyasztásában

<b>Ország</b>	<b>2005</b>	<b>2020</b>
<b>Svédország</b>	39,8	49,0
<b>Lettország</b>	32,6	40,0
<b>Finnország</b>	28,5	38,0
<b>Ausztria</b>	23,3	34,0
<b>Portugália</b>	20,5	31,0
<b>Észtország</b>	18,0	25,0
<b>Románia</b>	17,8	24,0
<b>Dánia</b>	17,0	30,0
<b>Szlovénia</b>	16,0	25,0
<b>Litvánia</b>	15,0	23,0
<b>Franciaország</b>	10,3	30,0
<b>Bulgária</b>	9,4	16,0
<b>Spanyolország</b>	8,7	20,0
<b>Lengyelország</b>	7,2	15,0
<b>Görögország</b>	6,9	18,0
<b>Szlovákia</b>	6,7	14,0
<b>Csehország</b>	6,1	13,0
<b>Németország</b>	5,8	18,0
<b>Olaszország</b>	5,2	17,0
<b>Magyarország</b>	4,3	13,0
<b>Írország</b>	3,1	16,0
<b>Ciprus</b>	2,9	13,0
<b>Hollandia</b>	2,4	14,0
<b>Belgium</b>	2,2	13,0
<b>Egyesült Királyság</b>	1,3	15,0
<b>Luxemburg</b>	0,9	11,0
<b>Málta</b>	0,0	10,0
<b>EU-27</b>	8,5	20,0

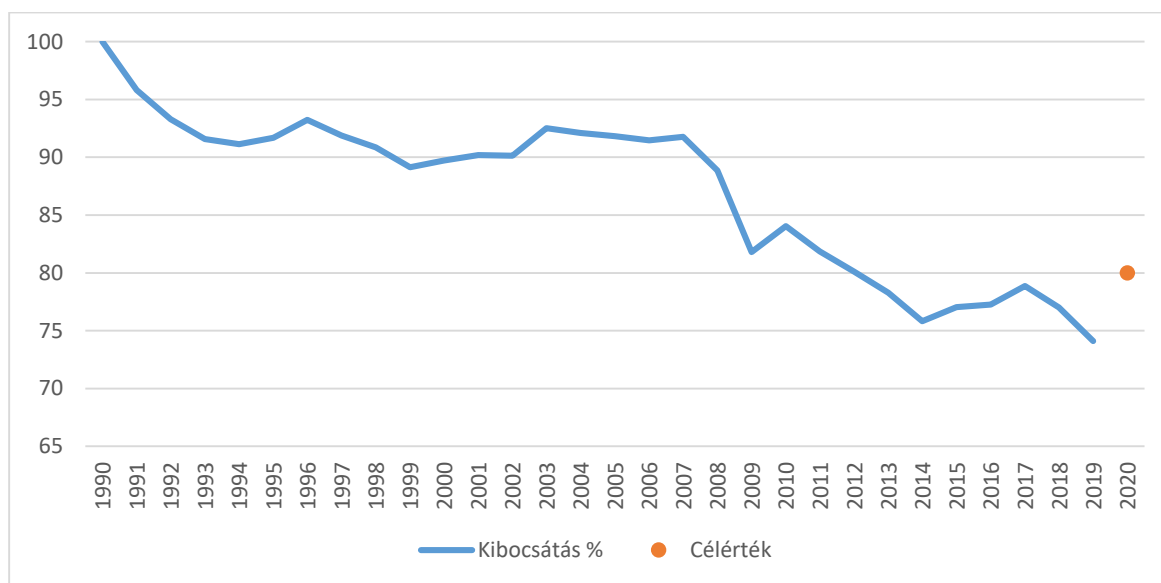
Forrás: EURÓPAI PARLAMENT (2009)

### 3.3.1. A 2020-as célok megvalósulása

Az üvegházhatású gázkibocsátás csökkentése, a megújuló energiák és az energiahatékonyság terén meghatározott uniós célok 2020-ra szinte maradéktalanul teljesültek, tehát az EU és a tagállamok elégséges intézkedéseket hoztak a célok eléréséhez.

### 3.3.1.1. Az üvegházhatást okozó gázok kibocsátása

2014-re az EU egésze az 1990-es szinthez képest 22,9%-kal csökkentette az üvegházhatást okozó gázok kibocsátását (6. ábra), tehát teljesítette a kitűzött célt. A csökkenés elsősorban az alacsony szén-dioxid-kibocsátású tüzelőanyagok, különösen a megújuló energiaforrások felhasználásának növekedéséből ered, amely ellensúlyozza az elsődleges energiafogyasztás növekedését. A hulladékágazatban az alacsonyabb szén-dioxid-kibocsátású kezelési eljárások nagyobb teret nyertek, a mezőgazdaságban pedig csökkent az állományszám, így jelentősen hozzájárultak a kívánt cél eléréséhez (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2016a).



6. ábra: Az üvegházhatást okozó gázok kibocsátása, EU-28, 1990-2018

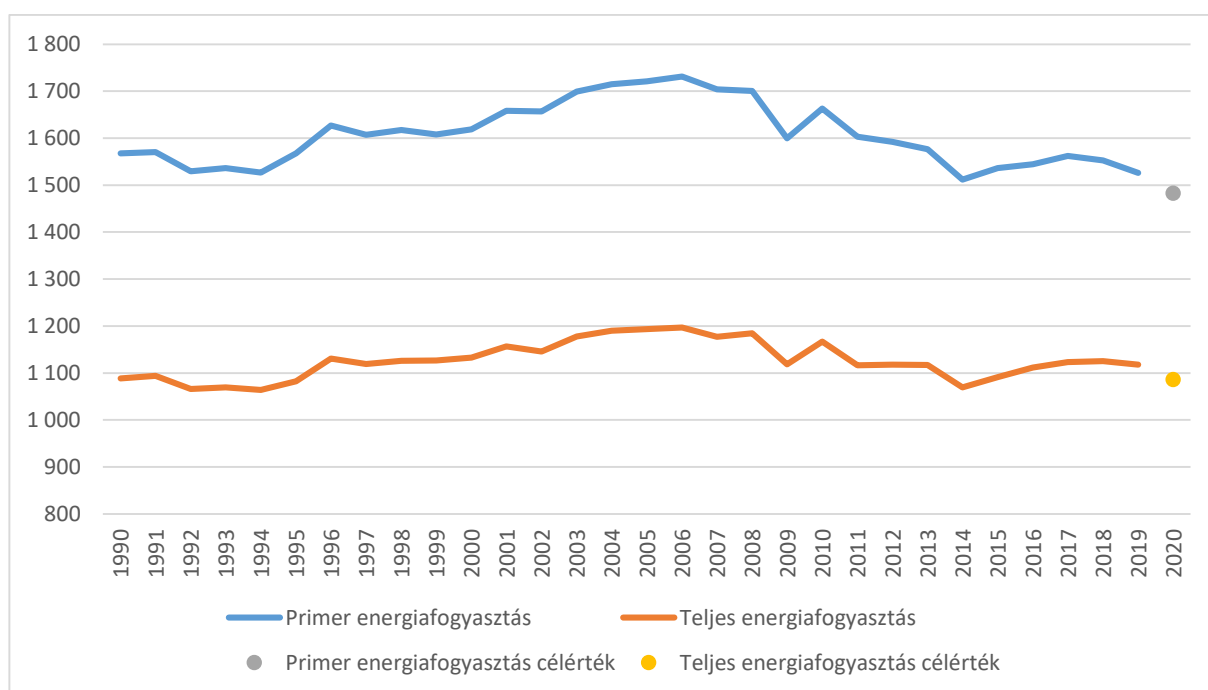
Index 1990 = 100

Forrás: EUROSTAT (2021a)

A 2020-as célkitűzések megvalósítása során az egyik legnagyobb eredmény, hogy a gazdasági növekedést nem követte az ÜHG kibocsátásának növekedése: 1990 és 2018 között a gazdaság 61%-kal nőtt, miközben a kibocsátás 23%-kal csökkent (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2019). A 2020-as célkitűzéseken túlmutat a párizsi klíma-megállapodásban foglalt vállalások teljesítése. Az Európai Unió uniós szinten 2030-ra 30%-os csökkentést fogadott el a 2005-ös évi adatokhoz képest. A közös kötelezettségvállalási rendelet nemzeti célkitűzéseket határoz meg, melynek értéke 0%-tól 40%-ig terjed. Magyarország esetében az üvegházhatású gázok 7%-os csökkentése az elvárás 2030-ig (EURÓPAI PARLAMENT 2018).

### 3.3.1.2. Az energiahatékonyság növelése

Az energiahatékonyság növelésének célértékét 2014-re megközelítette az EU egésze: 4,0%-kal kevesebb primer energiát fogyasztott, mint 1990-ben, és 12,0%-kal kevesebbet, mint 2005-ben. A 2008-2009-es válság hatására jelentősen visszaesett az energiafogyasztás, s csak a 2010-es rendkívül hideg tél okozta energiaigény-növekedés jelentett kiugrást. 2011-től folyamatos csökkenés tapasztalható az energiafogyasztásban, amelyet magyaráz a reál GDP csökkenése. 2014-ben viszont 1,4%-os reál GDP növekedés történt, ennek ellenére az energiafogyasztás tovább csökkent, amelyet a bevezetett energiahatékonysági politikának lehetett tulajdonítani (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2016a). 2015-től viszont a tendencia megfordult: 2018-ban 2,6%-kal több energiát fogyasztott az EU, mint 2014-ben, bár 10,4%-kal kevesebbet, mint 2006-ban. A 2020-as cél eléréséhez a végső energiafogyasztás esetén 3,4%-os csökkenésre van szükség, míg a primer energiafogyasztás tekintetében 4,4%-os csökkentést kell elérni, amint azt a 7. ábra mutatja (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2020a).



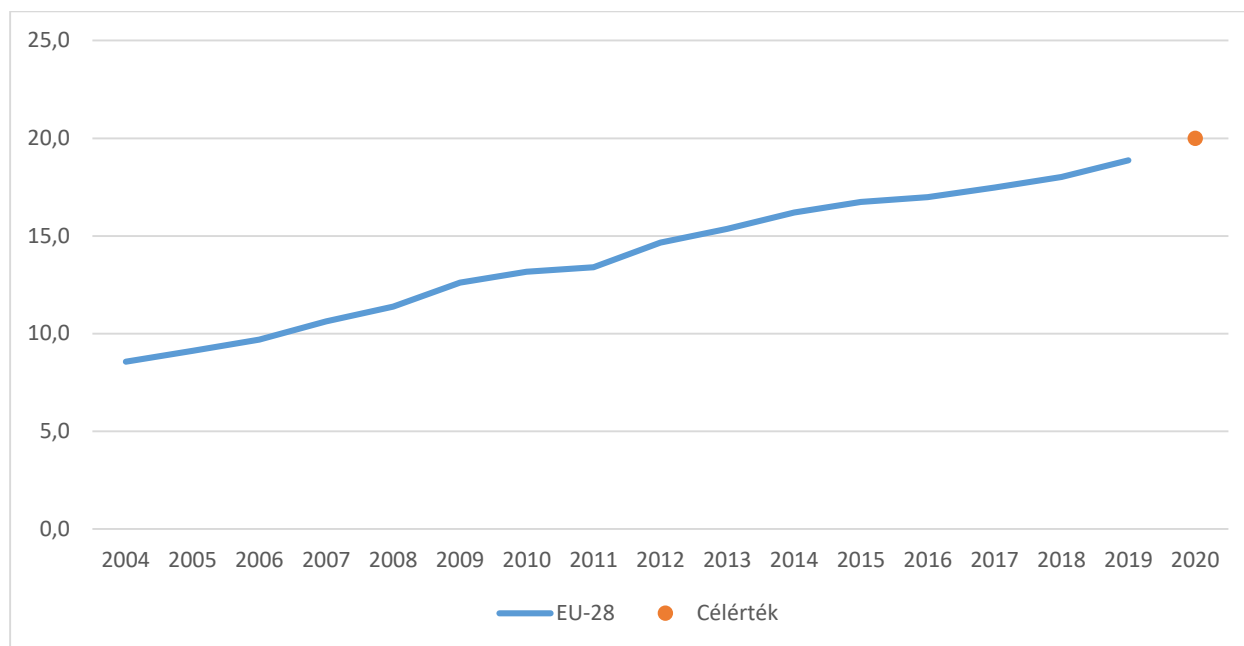
7. ábra: Elsődleges energiafogyasztás és végső energiafogyasztás (millió tonna olajegyenérték), EU-28, 1990-2018

Forrás: EUROSTAT (2021a)

### 3.3.1.3. A megújuló energia részaránya

Az Európa 2020 stratégia harmadik célkitűzése, hogy 2020-ra a megújuló energia részarányát a bruttó végső energiafogyasztásban 20%-ra kell emelni. A 8. ábrán követhető, hogy 2004 óta folyamatosan növekszik a megújuló energia mennyisége, 2004 és 2014 között ennek részaránya

szinte megduplázódott, s 2014-re elérte a 16%-os részesedést. A növekedésnek két mozgatórugója van. Egyrészt fontos a megújuló energiával kapcsolatos technológiák támogatási rendszere, azaz a betáplálási díjak, az adókedvezmények, az adójóváírások és a kvótarendszerek. Másrészt jelentős a megújuló energiaforrások költségeinek csökkenése azáltal, hogy a termelési volumen növekedett és a technológia fejlődött. Az európai kutatás és innováció kulcsfontosságú ágazatává vált a megújuló energia ágazata.



8. ábra: A megújuló energia részaránya a bruttó végső energiafogyasztásban, EU-28, 2004-2018

Forrás: EUROSTAT (2021a)

Ha az EU tagországait vizsgáljuk a megújuló energia felhasználása tekintetében, akkor jelentős különbségek figyelhetők meg. Ezek az eltérések már a 2020-as célértékek vállalásánál is jelentkeztek. Mindez nem meglepő, hiszen a rendelkezésre álló természeti erőforrások változatosak, például a vízerőművek építésének lehetőségei és a biomassza hozzáférhetősége. A különbségekhez természetesen a nemzeti éghajlati eltérések és az energiapolitikák sikeressége is hozzájárul. Mindenképpen figyelemre méltó eredmény, hogy 2005 és 2014 között az EU valamennyi tagországa megnövelte a megújuló energia arányát a végső energiafogyasztásban, továbbá 2004 és 2018 között ez a részaránya több mint kétszeresére nőtt, s elérte a 18,0%-ot. 2019-ben szinte teljesült az Európa 2020 stratégia 20%-os megújuló energia célkitűzése, hiszen 27 EU tagállam értékeit tekintve 19,7%-os arányt tapasztalhattunk (EUROSTAT 2021a)

### 3.3.2 Az Európai Unió hosszú távú stratégiai jövőképe

A jelenlegi uniós energiapolitika célja elérni a fenntartható fejlődés, a versenyképesség és a fenntarthatóság közötti egyensúlyt. A megvalósítást segítő kulcsfontosságú feladat az egyes

tagállamok közötti együttműködés fokozása, valamint az energiapiacra a megújuló energiaforrások teljes integrációját akadályozó tényezők felszámolása.

A 2014-ben elfogadott éghajlat- és energiapolitika keret négy fontos célkitűzést tartalmaz:

- 2030-ra az 1990-es szinthez képest legalább 40%-kal csökkenteni kell az üvegházhatást okozó gázok kibocsátását az Unióban;
- a felhasznált energia legalább 27%-a megújuló energiaforrásokból származzon uniós szinten;
- az energiahatékonyság 27%-os javítása a 2030-ra előre jelzett energiafogyasztáshoz képest;
- egy kifogástalanul működő és összekapcsolt belső energiapiac kialakítása (EURÓPAI TANÁCS 2014).

2020-ban az Európai Tanács új kötelező uniós célkitűzést hagyott jóvá, amely szerint 2030-ra az 1990-es szinthez képest legalább 55%-os Unión belüli nettó csökkentést kell elérni az üvegházhatást okozó gázok kibocsátásában. Ez az érték 15 százalékponttal magasabb, mint a 2014-ben meghatározott.

Az Európai Unió jelenlegi energiapolitikája három stratégiai elvre épül:

- a szükséges energia fenntartható forrásból származzon;
- az ellátás biztonságának megvalósítása;
- versenyképesség és a versenyképesség az energiaágazat tekintetében (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2019a).

Az Európai Bizottság 2019. december 11-én jelentette meg Az európai zöld megállapodás című közleményét, melynek célja az éghajlat- és környezetvédelmi kihívások kezelése, s amely egyben új növekedési stratégiát vázolt fel az Unió számára: „az EU-t olyan igazságos és virágzó társadalommá alakítani, amely modern, erőforrás-hatékony és versenyképes gazdasággal rendelkezik, ahol 2050-re megszűnik az üvegházhatást okozó gázok nettó kibocsátása, és ahol a gazdaság növekedése nem erőforrásfüggő.” (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2019b). A 9. ábra a zöld megállapodás elemeit szemlélteti (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2019b).



9. ábra: Európai zöld megállapodás

Forrás: EURÓPAI BIZOTTSÁG (2019b)

Az európai zöld megállapodás környezetvédelmi és éghajlat-politikai célkitűzéseit támogatja, a megvalósítás gyorsítását szolgálja a nyolcadik környezetvédelmi cselekvési program, amelyet 2020 októberében tettek közzé.

A nyolcadik környezetvédelmi cselekvési program célkitűzései:

- az ÜHG-kibocsátás 2030-ra vonatkozó céljának és az éghajlat-semlegességnek 2050-ig történő elérése;
- az alkalmazkodóképesség növelése, az ellenálló képesség erősítése és az éghajlatváltozással szembeni sérülékenység csökkentése;
- előrelépés a regeneratív növekedési modell felé, a gazdasági növekedés elválasztása az erőforrások felhasználásától és a környezet pusztulásától, valamint a körforgásos gazdaságra való áttérés felgyorsítása;
- a szennyezésmentességre való törekvés megvalósítása, ideértve a levegőt, a vizet és a talajt is, valamint az európaiak egészségének és jólétének védelme;
- a biológiai sokféleség védelme, megőrzése és helyreállítása, valamint a természeti tőke (nevezetesen a levegő, a víz, a talaj és az erdő, az édesvíz, a vizes élőhelyek és a tengeri ökoszisztémák) fejlesztése;



- a termeléssel és a fogyasztással kapcsolatos környezeti és éghajlati nyomás csökkentése (különösen az energia, az ipari fejlesztés, az épületek és az infrastruktúra, a mobilitás és az élelmiszerellátás területén) (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2020b).

### **3.3.3. Hidrogénstratégia a klímasemleges Európáért**

A hidrogéngazdaságra való átállás az Európai Unió COVID-19 utáni gazdaságélénkítési csomagjának kiemelt jelentőségű alkotója. A NextGenerationEU helyreállítási csomagot az európai zöld megállapodás vezérli, s támogatja a tiszta energiával kapcsolatos új beruházásokat (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2020c). A hidrogéngazdaság megvalósításának két fő mozgatórugója van: az első, hogy az Európai Unió jelenleg körülbelül 9,7 millió tonna hidrogént használ fel évente, amelynek dekarbonizálását meg kell valósítani; a második pedig a hidrogén kulcsfontosságú szerepe a jövőbeni energiarendszerekben. Mind az ipar, mind a közlekedés rugalmas energiahordozója a hidrogén, mivel alkalmas olyan ágazatok energiával való ellátására, amelyek esetében a villamosításra nincs lehetőség, és tárolást tud biztosítani az ingadozó megújulóenergia-áramok kiegyensúlyozására, továbbá hozzájárul az üvegházhatást okozó gázok és a részecskekibocsátás csökkentéséhez (HYDROGEN ROADMAP EUROPE 2019). A technológiai fejlődést és a termelési költségek csökkenését követve az átmenet fokozatos megvalósítása a cél. A 2020-2024 közötti első szakasz stratégiai célkitűzése, hogy 1 millió tonna megújuló hidrogén termelésére legyen képes az Európai Unió. A 2025–2030 közötti második szakaszban a hidrogénnek az integrált energiarendszer szerves részévé kell válnia, valamint a megújuló hidrogéntermelési kapacitásnak el kell érnie a 10 millió tonnát. A 2030 és 2050 közötti harmadik szakaszban kiforrott és széles körben alkalmazott hidrogéntechnológiákkal kell rendelkezni (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2020d).

### **3.4. A körforgásos gazdaság mint az üvegházhatásúgáz-kibocsátás csökkentésének kulcsfontosságú tényezője**

A „Global Resources Outlook 2019” jelentés szerint 1970 óta a Föld népessége megduplázódott, az ásványvagyon kitermelése megháromszorozódott, s ez időszakban nem volt hosszan tartó stagnálás vagy csökkenés a globális anyagigény terén. Az erőforrások ilyen mértékű felhasználása felelős az üvegházhatást okozó gázok teljes kibocsátásának feléért, a biológiai sokféleség csökkenésének és a vízhiánynak pedig több mint 90%-áért. A globális gazdaság jelenlegi kihívása az anyag- és energiatermelékenység javítása, mert a termelés korlátozó tényezője nem a munkaerő, hanem a természeti erőforrások és a környezeti hatások. A gazdasági fejlődéssel összefüggő környezeti hatások csökkentésében alapvető szerepe van a körforgásos gazdaságnak, melynek átfogó célkitűzése a természeti erőforrások általános felhasználásának és a hulladékképződésnek a jelentős csökkentése (IRP 2019; KORHONEN et al. 2018; MAINA et al. 2017).

### 3.4.1. Az EU körkörös gazdálkodási akcióterve

2015 decemberében az Európai Bizottság elfogadta a körforgásos gazdasággá alakulást elősegíteni hivatott dokumentumcsomagot, azzal a céllal, hogy az Európai Unió nemzetközi versenyképessége növekedjen, és arra ösztönözze a vállalatokat és a fogyasztókat, hogy az erőforrások felhasználása gazdaságosabban történjék. A körkörös gazdaság három alapelve:

- a természeti tőke megóvása és fejlesztése a kimerülő készletek szabályozott használatán és a megújuló erőforrások áramának egyensúlyán keresztül;
- az erőforrás-kihozatal optimalizálása a termékek, alkatrészek, anyagok körforgása révén, maximalizálva a technikai és biológiai ciklusban való részvételüket;
- a negatív externáliák minimalizálása, a toxikus anyagok eliminálása, helyettesítése vagy mérséklése (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2015).

A körkörös gazdaság célja, hogy mélyrehatóan átalakítsa az erőforrások felhasználásának gyakorlatát. A lineáris fogyasztásgazdaság modellen alapuló struktúrákat olyan új rendszerekké kívánja változtatni, ahol az erőforrásokat újrahasznosítják, termelési ciklusban tartják, így lehetővé válik a hosszabb ideig tartó felhasználásuk és értékteremtésük. A 10. ábra szemlélteti a körforgásos gazdaság modelljét.



10. ábra: A körkörös gazdaság modellje

Forrás: VADÁSZ 2016

2020-ban elfogadásra került a körforgásos gazdaságra vonatkozó új cselekvési terv, amely egy jövőorientált menetrendet biztosít a tisztább és versenyképesebb Európa megvalósításához,

miközben minimalizálja az emberekre és a vállalkozásokra nehezedő terheket. A dokumentum célja, hogy felgyorsítsa az európai zöld megállapodás által megkövetelt átalakulást, támaszkodva a 2015 óta végrehajtott körkörös gazdaságra vonatkozó fellépésekre (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2020e).

A körkörös gazdaságban a termelési, fogyasztási és hulladékkezelési folyamatokat össze kell kapcsolni, és az erőforrások felhasználási hatékonyságának javítása révén a hulladékot erőforrásként kell értékelni. Az EU gazdasága számára jelentős veszteség, hogy a hulladékarományokban a másodlagos nyersanyagok mennyisége viszonylag alacsony. A közös európai célkitűzés szerint 2025-re a kommunális hulladék legalább 55%-át újra kell hasznosítani, majd ezt az arányt fokozatosan tovább emelnék, s 2035-re a 65%-ot kívánják elérni. A csomagolóanyagokból származó hulladékokra még magasabb célértékeket határoztak meg: 2025-re 65%-át, 2030-ra pedig 70%-át kell újrahasznosítani. Ezzel együtt a hulladéklerakás mértékét is visszaszorítanák, 2035-re a kommunális hulladék legfeljebb 10%-a kerülhet hulladéklerakókba.

3. táblázat: A kommunális hulladék kezelése a tagállamokban

	<b>Kommunális hulladék (kg/fő, 2018)</b>	<b>Az újrahasznosított vagy komposztált hulladék aránya (% , 2017)</b>	<b>Hulladéklerakás a településeken (% , 2017)</b>
<b>EU28</b>	489	46	24
<b>Dánia</b>	766	46	1
<b>Málta</b>	640	6	93
<b>Ciprus (2016-os adat)</b>	640	16	82
<b>Németország</b>	615	68	1
<b>Luxemburg</b>	610	48	7
<b>Írország (2016-os adat)</b>	567	41	26
<b>Ausztria</b>	579	58	2
<b>Hollandia</b>	511	54	1
<b>Franciaország</b>	527	43	22
<b>Finnország</b>	551	41	1
<b>Görögország (2016-os adat)</b>	497	19	80
<b>Olaszország</b>	499	48	26
<b>Egyesült Királyság (2014-es adat)</b>	482	45	28
<b>Portugália</b>	508	28	50
<b>Szlovénia</b>	486	58	13

<b>Litvánia</b>	464	48	33
<b>Spanyolország</b>	475	33	54
<b>Svédország</b>	434	47	0
<b>Belgium</b>	411	54	1
<b>Lettország</b>	407	23	31
<b>Bulgária</b>	423	35	62
<b>Horvátország</b>	432	24	75
<b>Magyarország</b>	381	35	49
<b>Észtország</b>	405	28	20
<b>Szlovákia</b>	414	30	61
<b>Csehország</b>	351	38	48
<b>Lengyelország</b>	329	34	42
<b>Románia</b>	272	14	71

Forrás: EUROSTAT 2020a

A hulladékcsökkentés, a környezetbarát terméktervezés és az újbóli felhasználás az európai vállalkozások számára bruttó 600 milliárd euró megtakarítást jelenthet, és 2-4%-kal csökkentheti az üvegházhatású gázok kibocsátását (EURÓPAI PARLAMENT 2015). A körkörös gazdaság sikerének egyik elengedhetetlen feltétele a minőségi újrahasznosítás, s ez olyan piaci bizalmat eredményezhet, amelynek következtében az elsődleges nyersanyagok helyettesítésének hányada jelentősen növekedhet.

### 3.4.2. Az EU hulladékgazdálkodási irányelve

„Az irányelv célja a környezet és az emberi egészség védelme azáltal, hogy hangsúlyozza a helyes hulladékgazdálkodási, hulladékhasznosítási és -újrafeldolgozási módszerek erőforrásokra nehezedő teher csökkentése szempontjából vett jelentőségét, továbbá javítani kíván e módszereken” (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2008). A hulladékgazdálkodás összetett terület, amely túlmutat a megelőzésen, a gyűjtésen és a kezelésen, szélesebb körben érinti a társadalmi és gazdasági fejlődést. A kormányzati előírások, a politikai döntések és az erőforrás-gazdálkodás segíti a környezet megóvását, biztosítja a természeti erőforrások átlátható és észszerű felhasználását.

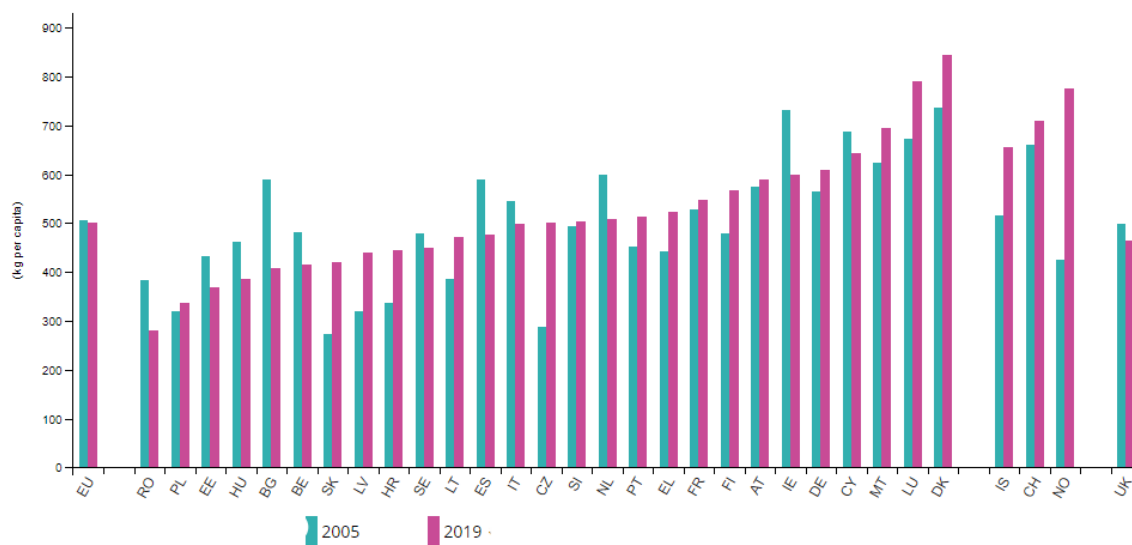
Az európai hulladékgazdálkodás sarokköve a hulladékhierarchia kidolgozása és alkalmazása, amely egyben a körkörös gazdaságra való áttérést is szolgálja. Ez egy ötlépcsős rendszer, ahol a legoptimálisabb lehetőségnek a megelőzés tekintendő, a hulladéklerakó pedig a hierarchia alját foglalja el, mivel ez a környezet számára kevésbé kívánatos:

- megelőzés;
- újrahasználatra való előkészítés;

- újrafeldolgozás;
- egyéb (például energetikai) hasznosítás;
- ártalmatlanítás (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2008).

Annak ellenére, hogy az EU hulladékgazdálkodási irányelve a megelőzést preferálja, 2014-ben 2,5 milliárd tonna szemét keletkezett. 2005 és 2019 között 4 kg-mal csökkent az egy főre eső hulladéktermelés Európában, de 16 államban az egy főre jutó kommunális hulladék mennyisége 1995 és 2019 között nőtt, amint ezt a 11. ábra mutatja. Kimagasló éves átlagos növekedési ütem pl. Szlovákiában, Máltán, Lettországban és Dániában figyelhető meg, míg csökkenést mutatott Bulgária, Románia és Észtország. 2019-ben az EU 27 átlaga évi 502 kg/fő volt, Magyarország 387 kg/fő értékkel ettől jobban teljesített.

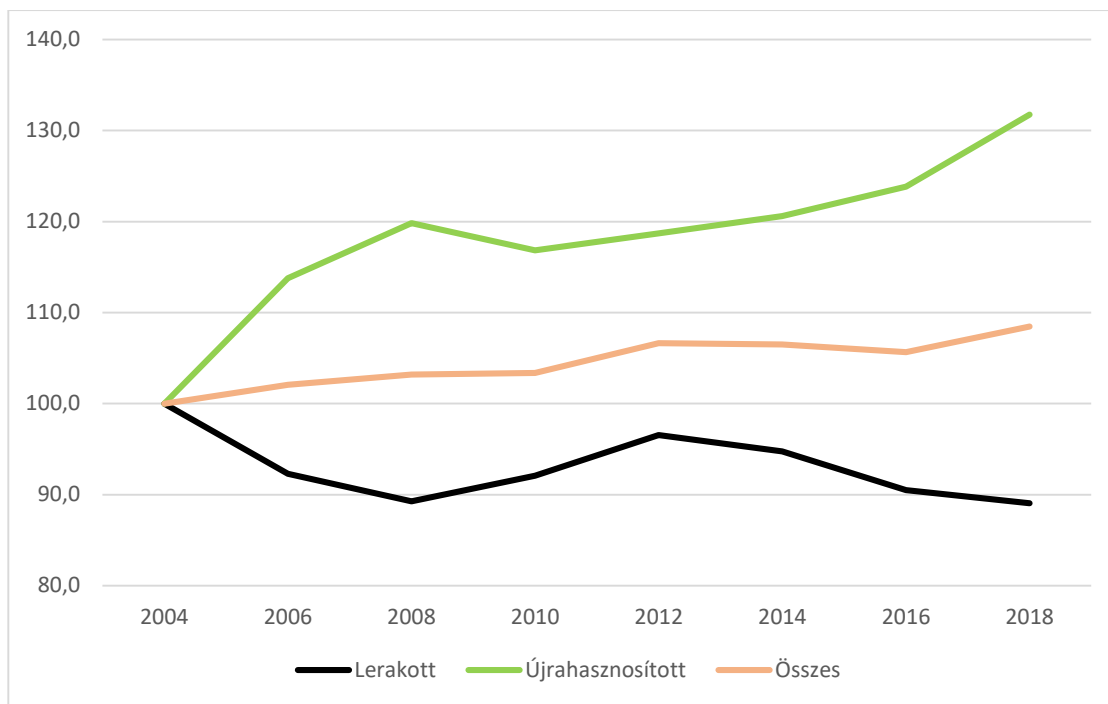
A hulladék összmennyiségének alakulását magyarázza, hogy az európai társadalom életszínvonala nőtt, több terméket értékesítenek, az árukat rövidebb használati időre tervezik, valamint sokféle egyszer használatos és eldobható termék kerül forgalomba.



11. ábra: Az egy főre jutó települési hulladék mennyisége országonként 2005-ben és 2019-ben

Forrás: EUROSTAT (2020a)

Bár az Európai Unió országaiban termelődő kommunális hulladék összmennyisége növekszik, a hulladéklerakókba kerülő rész csökken, amint ez a 12. ábrán látható. A 2004 és 2018 közötti időszakban a lerakás közel 10%-kal csökkent, s ennek eredményeképpen a hulladéklerakókban elhelyezett kommunális hulladék aránya az 1995. évi 64%-ról 2016-ban 24%-ra csökkent (EUROSTAT 2018).



12. ábra: Az EU-28 országainak összesített kommunális hulladékkezelése, egy főre vonatkoztatva 2004 és 2018 között

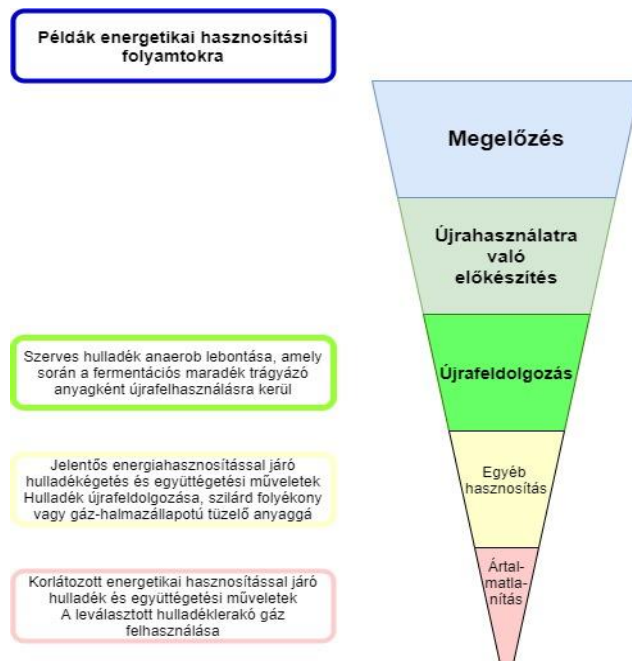
Forrás: EUROSTAT (2020b)

### 3.4.3. A hulladékok energetikai hasznosításának szerepe a körforgásos gazdaságban

Az energetikai hasznosítási folyamatok igen különböző hulladékkezelési műveleteket foglalnak magukban, s fontos szerepet játszhatnak a körforgásos gazdaságra való áttérésben. A fő energetikai hasznosítási folyamatok:

- a hulladék égetőműben (például erőműben), valamint a cement és a mész előállításánál történő együttégetése;
- a hulladékégetés kifejezetten erre szolgáló létesítményekben;
- a biológiailag lebomló hulladék anaerob lebontása;
- a hulladékból előállított szilárd, folyékony vagy gáz halmazállapotú tüzelőanyagok gyártása; valamint
- egyéb eljárások, beleértve a pirolízis vagy gázosítás szakaszát követő közvetett égetést.

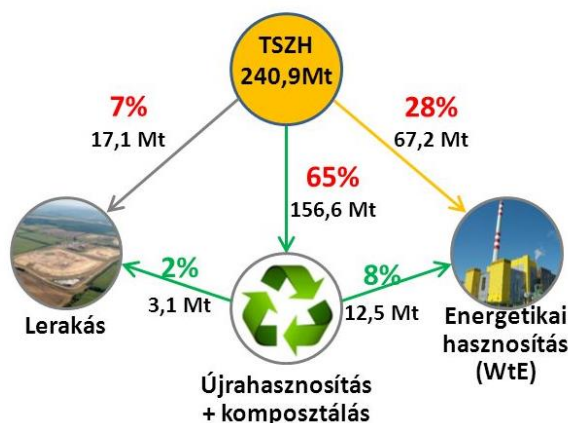
A 13. ábra szemlélteti az egyes energetikai hasznosítási folyamatok uniós hulladékhierarchiában elfoglalt helyét.



13. ábra: A hulladékhierarchia és az energetikai hasznosítási folyamatok

Forrás: EURÓPAI BIZOTTSÁG (2017)

A hulladékok energetikai hasznosítását így a minőségi újrafelhasználást kiegészítő eljárásának is tekinthetjük. Ez hozzásegít a körforgásos gazdaság eléréséhez, azaz a hasznosítási kör tényleges zárásához azáltal, hogy a hulladéktüzelésű erőművekben hasznosulhat a szennyezettség miatt minőségi újrafeldolgozásra alkalmatlan hulladék, valamint a szelektíven gyűjtött hulladékok utóválogatása és újrahasznosítása során visszamaradó rész (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2017).



14. ábra: A Körkörös Gazdaság 2030. évi célkitűzéseinek elérése mellett az energetikai hasznosítás várható aránya és mennyisége

Forrás: STENGLER 2016

A lerakás minimális szintre csökkentése az anyagában történő és az energetikai hasznosítás együttes alkalmazásával érhető el, amint azt a 14. ábra szemlélteti. A környezeti fenntarthatósági célok

elérése és a körkörös gazdaság megvalósulásának feltétele, hogy a hulladéklerakást a lehető legkisebb mértékben alkalmazzuk.

Az elmúlt években Európában és Kínában előtérbe kerültek a fenntartható hulladékgazdálkodáshoz kapcsolódó gondolkodásmódot tükröző kutatások. A körkörös gazdasági elvek alapján működő hulladékgazdálkodás a társadalom számára környezeti, társadalmi és pénzügyi szempontból is számos előnnyel bír (SANTALA et al. 2017).

#### **3.4.4. A körkörös gazdaság indikátorai**

A körkörös gazdaság pillére, hogy az erőforrás-felhasználás hatékonyságának növelése a zárt anyagkörök révén csökkenti az anyagkitermelést, a hulladék ártalmatlanítását és a környezeti terhelést (GHISELLINI et al. 2016). A megnövekedett erőforrás-hatékonyság a termelés és a fogyasztás szintjének emelkedését eredményezheti, amely ellensúlyozhatja a környezeti előnyöket (ZINK – GEYER 2017). Elengedhetetlen, hogy a körkörös gazdaság és környezeti fenntarthatóság kapcsolata nyomon követhető legyen, annak ellenére, hogy ez kihívást jelent a körkörös gazdaság komplex és transzdiszciplináris jellege miatt. A mérésre alkalmas mutatók és módszertanok kidolgozása még a kutatás korai szakaszában vannak. A körkörös gazdaság követésére eddig kidolgozott mutatók sokfélék, nemcsak az ágazatoktól, a földrajzi helyzettől, hanem az azt alkalmazó szervezet vagy kormány céljától, a megcélzott közönségtől is függenek.

Az Európa gazdaságának fenntarthatóbbá történő átalakítására, valamint körkörös gazdaság cselekvési terv végrehajtására irányuló folyamatos erőfeszítéseinek részeként az Európai Bizottság 2018 januárjában új intézkedéscsomagot fogadott el, amelynek része egy nyomon követési rendszer alkalmazása, amelynek a körforgásos gazdaság felépítésére tett erőfeszítéseket kell tükröznie. Egyetlen indikátorral lehetetlen megfelelően visszaadni a körforgásos gazdaságra való átállás összetettségét és számos aspektusát, ezért a nyomonkövetési keretrendszerben egy sor releváns mutató kerül kidolgozásra. A monitoring rendszer 10 indikátort tartalmaz, amelyeknek a segítségével az erőforrások, a termékek és szolgáltatások minden életciklus szakasza lefedhető, s megjeleníthető a körforgásos gazdaság négy aspektusa: a termelés és fogyasztás; a hulladékgazdálkodás; a másodlagos nyersanyagok; a versenyképesség és innováció, amint azt a 4. táblázat szemlélteti (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2018).

4. táblázat: A körforgásos gazdaságra vonatkozó mutatók a nyomonkövetési keretrendszerben



Szám	Megnevezés	Relevancia
<b>Termelés és fogyasztás</b>		
1	Az EU önellátó képessége a nyersanyagok tekintetében	A körforgásos gazdaságnak elő kell segítenie a nyersanyagokkal, különösen a kritikus fontosságú nyersanyagokkal kapcsolatos ellátási kockázatok kezelését.
2	Zöld közbeszerzés	A közbeszerzés a fogyasztásban jelentős arányt képvisel, és a körforgásos gazdaság hajtómotorja lehet.
3	Hulladékkeletkezés	A körforgásos gazdaságban a hulladékkeletkezés minimálisra csökken.
3a	Az egy főre eső települési hulladék mennyisége	
3b	Hulladéktermelés a fő ásványi hulladékok kivételével a GDP arányában	
3c	A keletkezett hulladék százalékos aránya a főbb ásványi hulladékok kivételével a hazai anyagfogyasztáshoz képest	
4	Élelmiszerhulladék	Az élelmiszerek kidobása negatív környezeti, éghajlati és gazdasági hatásokkal jár.
<b>Hulladékgazdálkodás</b>		
5	Teljes újrafeldolgozási arány	Az újrahasznosítás arányának növelése a körforgásos gazdaságra való átállás része.
5a	A települési hulladék újrahasznosítási aránya	
5b	Az összes hulladék újrahasznosítási aránya a főbb ásványi hulladékok kivételével	
6	Az egyes hulladékáramok újrafeldolgozási aránya	A hulladékokról szóló keretirányelv; a hulladéklerakókról szóló irányelv; konkrét hulladékáramokra vonatkozó irányelvek.
6a	Az összes csomagolási hulladék újrahasznosítási rátája	
6b	Műanyag csomagolási hulladék újrahasznosítási rátája	
6c	Fa csomagolási hulladék újrahasznosítási rátája	

6d	Elektronikus és elektromos berendezések újrafeldolgozási aránya	
6e	A biohulladék újrahasznosítási rátája	
6f	Az építési és bontási hulladék újrahasznosítási rátája	
<b>Másodlagos nyersanyagok</b>		
7	Az újrahasznosított anyagok hozzájárulása a nyersanyagok iránti kereslethez	A körforgásos gazdaságban általános, hogy a másodlagos nyersanyagokból állítanak elő új termékeket.
7a	A másodlagos anyagfelhasználás aránya egy adott nyersanyagra	
7b	A körkörös anyagfelhasználás aránya	
8	Az újrafeldolgozható nyersanyagok kereskedelme	Az újrafeldolgozható anyagok kereskedelme a belső piac jelentőségét és a körforgásos gazdaságban való globális részvétel fontosságát tükrözi.
<b>Versenyképesség és innováció</b>		
9	Magánberuházások, munkahelyek és bruttó hozzáadott érték	Ez a körforgásos gazdaságnak a munkahelyteremtéshez és a növekedéshez való hozzájárulását tükrözi.
9a	Tárgyi eszközökbe történő bruttó beruházás	
9b	Foglalkoztatottak száma	
9c	A termelési tényezők költségén számított hozzáadott érték	
10	Szabadalmak	A körforgásos gazdasághoz kapcsolódó innovatív technológiák javítják az EU globális versenyképességét.

Forrás: EURÓPAI BIZOTTSÁG (2018)

HELANDER és munkatársai (2019) vizsgálták a körkörös gazdaság indikátoraiként fellelhető mutatókat, s megállapították, hogy a mutatók többsége egyetlen tevékenységre, vagy az anyag vagy a termék életciklusának egy részére vonatkozik. Ez magában hordozza annak a veszélyét, hogy a környezetre gyakorolt nyomás nem kerül kifejezésre. Javaslataink szerint a CE-mutatókat ki kell egészíteni a környezeti terhelést kifejező mutatókkal. Európai szinten több kezdeményezés irányul a már meglévő mutatók segítségével a körforgásos gazdaság megvalósulását kifejező mutatók kidolgozására, valamint specifikus új mutatók megalkotására (VERCALSTEREN et al. 2018).

Számos kutató szerint az LCA módszer, illetve az erre épülő rendszer a legalkalmasabb a körkörös gazdaság nyomon követésére, az alkalmazott mutatók sokféleségének és a részletes elemzésnek köszönhetően, annak ellenére, hogy az eredmények értelmezése szakértelmet igényel (ELIA et al. 2017; LONCA et al. 2018).

Az 1990-es évek elején jelent meg a környezetgazdálkodásban használatos életciklus fogalom és az 1992-es Riói Konferencián már olyan eszköznek tekintették, amely a környezeti menedzsment feladatok széles köréhez alkalmazható, valamint a környezeti fenntarthatóság lényegi elemeit hangsúlyozza (TÓTHNÉ SZITA 2008). A termékek környezeti hatásának vizsgálatára az Európai Bizottság döntése alapján az LCA a legalkalmasabb eszköz, amelynek módszertani harmonizálását segítik az Európai LCA Platform létrehozásával (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2016b). Az életciklus-elemzés lehetővé teszi a termékek, folyamatok, modellek környezetre gyakorolt hatásainak számszerű vizsgálatát és összehasonlíthatóságát mérőszámok alapján, az ISO szabványok által meghatározott módszer szerint. Az LCA erőssége, hogy a termék életének minden fázisban összegyűjti a környezeti hatásokra vonatkozó adatokat, majd azokat összegzi. Az összesített eredményeket értelmezi, majd súlyozza és értékeli a környezeti hatások jelentősége szempontjából. A kapott eredményeket egyszerűsített mutatókba sűrítve, könnyen átlátható formában jeleníti meg. Az LCA segítségével összehasonlíthatóak a nyílt és zárt láncú technológiák. A következő formula segítségével eldönthető, hogy a zárt láncú modell alkalmazása előnyösebb-e a nyílt láncú megoldásnál.

$$LCSA_{\text{Nyílt}}(eLCA + LCC + SLCA) \geq LCSA_{\text{Zárt}}(eLCA + LCC + SLCA)$$

LCSA: életciklus fenntarthatósági értékelés

eLCA: környezeti életciklus elemzés

LCC: életciklus költségelemzés

SLCA: társadalmi életciklus elemzés (TÓTHNÉ SZITA 2017)

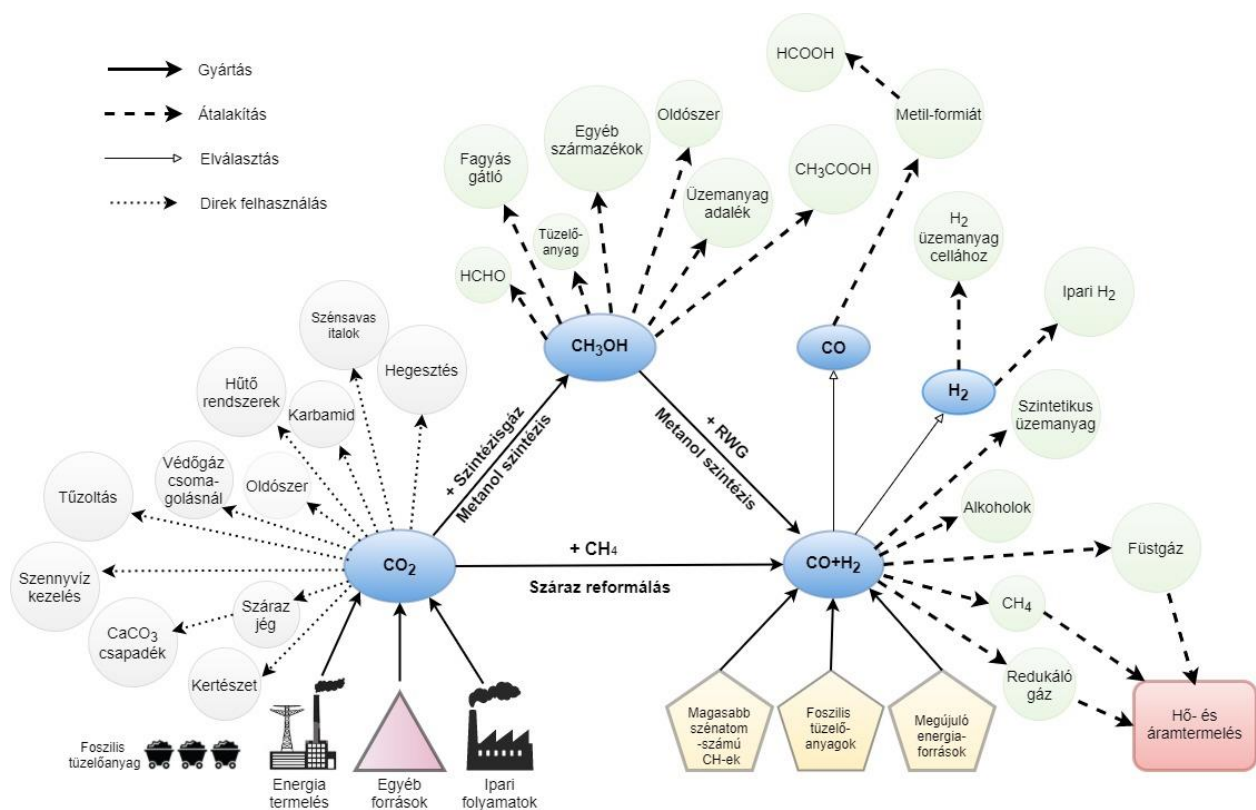
### 3.5. A metanolgazdaság

1990-ben a Nobel-díjas Oláh György a fosszilis források helyettesítésére a metanolgazdaság koncepcióját javasolta, amely egy új megközelítést jelentett a csökkenő olaj- és földgáz- (és végül szén-) készletektől való függőség mérséklésére, s megoldást javasolt a túlzott szén-dioxid-kibocsátás okozta globális felmelegedés problémára. Átfogó és fenntartható megoldást kínál a fosszilis üzemanyagok hosszú távú kiváltására a szén-dioxid kémiai újrafeldolgozásával megújuló metanolon keresztül, alternatív energiaforrások, például napenergia, szél-, víz-, geotermikus és

atomenergia felhasználásával. A metanol felhasználása igen sokrétű: alkalmazható energiátároló közegként, üzemanyagként, illetve üzemanyag-adalékként, valamint széles körben alkalmazott vegyipari alapanyag. A metanolgazdaság lényege, hogy azokon a területeken, ahol a felhasználás során nem lehet közvetlenül a villamos hálózatból elektromos áramot felvenni, ott a metanolt alkalmazzák közbenső energiahordozóként, tehát maga a „metanolgazdaság” nem termel energiát. A metanol, illetve a belőle gyártott dimetil-éter kényelmesen és biztonságosan tárolja az energiát (OLAH et al. 2007).

### 3.5.1. A légköri szén-dioxid mennyiségének csökkentése CCU technológiával

Az antropogén szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére többféle lehetősége van az emberiségnek: javítható az energiafelhasználás hatékonysága, kifejleszthetők alternatív energiaforrások, vagy egy másik csökkentési lehetőség a fosszilis energiahordozók elégetése során keletkező szén-dioxid befogása és földalatti tárolása (CCS, Carbon Capture and Storage). A légköri szén-dioxid-koncentráció csökkentésére, a kibocsátás mérséklésére többféle, egymást kiegészítő megközelítés lehet a megoldás. A CCS technológia létjogosultságát alátámasztja, hogy nagy mennyiségű szén-dioxidot kell a légkörből eltávolítani, illetve a kibocsátását megakadályozni, de ennek a módszernek kiegészítője kell, hogy legyen a CCU (Carbon Capture and Use/Utilisation) technológia, amely hozzáadott értéket képvisel, s a klímaváltozás enyhítésének kulcsfontosságú eszközévé válhat (STYRING 2019). A CCU technológiák alkalmazásának segítségével potenciálisan évi 3,7 Gtonna szén-dioxid megkötése lehetséges, amely a jelenlegi éves kibocsátás 10%-a. További előnyei, hogy „zöld” munkahelyeket teremt, valamint gazdasági értéket is, amely csökkenti az alkalmazásának költségeit (PAN et al. 2015). A CCU technológia energiaigényének kitermelése a vidéki területekre koncentrálódhat, ezáltal segíti új munkahelyek megteremtését, a vidéki lakosság foglalkoztatását (MAGDA 2011a). A szén-dioxid közvetlen felhasználására számos példa van: az élelmiszeriparban üdítőitalok gyártása; habosító anyag; hűtőközeg. A közvetlen felhasználás mennyiségi igénye eltörlül a fosszilis energiahordozók elégetése során képződött mennyiségével szemben, ezért a befogott szén-dioxid hasznos termékekké való átalakítása stratégiai jelentőséggel bír a fenntartható fejlődés vonatkozásában. A 15. ábra szemlélteti a lehetséges alkalmazási területeket: műanyaggyártás, építőanyag-gyártás, vegyipari termékek és ökoüzemanyagok előállítása pl. metán és metanol (MILANI et al. 2015). A legnagyobb mennyiségben gyártott 5 vegyi anyag (etén, propén, benzol, karbamid, butadién) előállításához éves szinten az egy év alatt kibocsátott szén-dioxid csupán 3%-át kellene felhasználni, ezért fontos további alkalmazási lehetőségek felkutatása. A szintetikus üzemanyagok gyártása kiemelkedően ígéretes terület, mivel éves szinten a kibocsátott szén-dioxid legalább 23%-ának megkötésére képes (DOWSON - STYRING 2017).



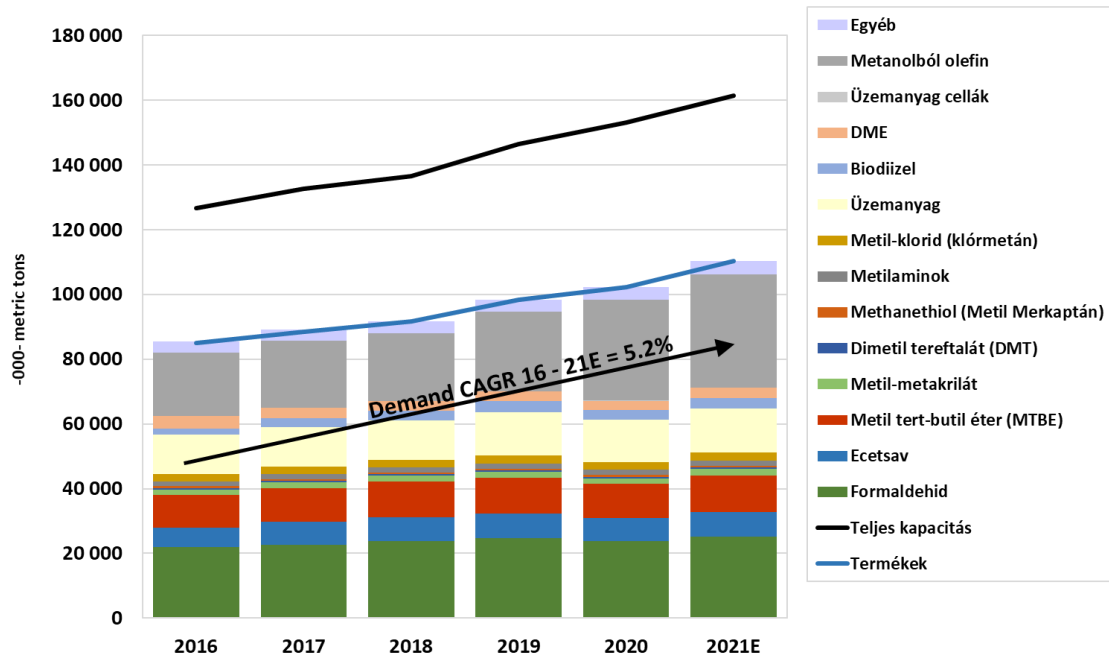
15. ábra: A szén-dioxid-felhasználás lehetséges folyamatai, termékei

Forrás: MILANI et al. (2015)

### 3.5.2. A metanol mint vegyipari alapanyag

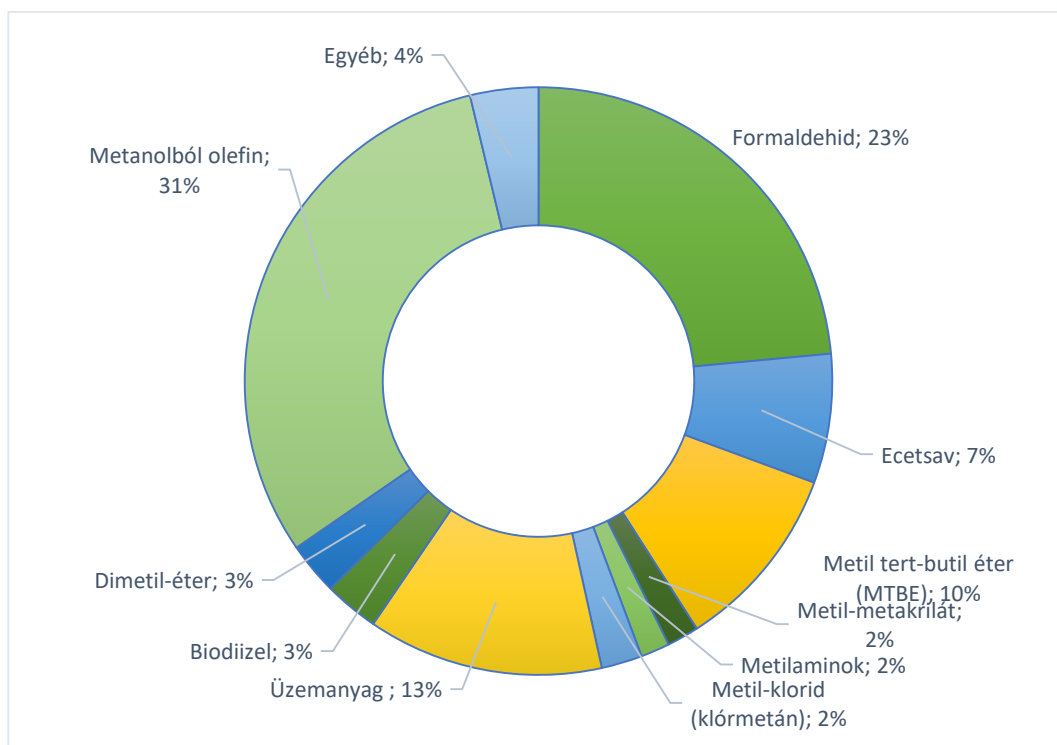
A metanol a mindennapi élet szerves része, mivel megtalálható a műanyagokban, szintetikus szálakban, üzemanyagokban, gyantákban, festékekben, ragasztókban, oldószerekben, szőnyegpadlóknál, szigetelőknál, hűtőközegekben, forgácslapokban. A világ metanolfogyasztása évről évre növekszik, amint ezt a 16. ábra szemlélteti.

A 2020. évi összes metanolfelhasználás megoszlását szemlélteti a 17. ábra. Látható, hogy a metanol közel 50%-át vegyipari alapanyagként alkalmazzák, melyek közül kiemelkedő a formaldehid, az ecetsav, a metil-tercier-butiléter gyártására használt mennyiség. A metanolfogyasztás növekedése nagymértékben a metanoltól olefin gyártási technológia terjedésének köszönhető. A technológiát az 1970-es évek végén, az 1980-as évek elején dolgozták ki, de az utóbbi években kezdtek jelentősebb mértékben alkalmazni. 2014-ben 9,1 millió tonna metanolt használtak fel erre a célra, 2020-ban már 31,202 millió tonnát, s 2021-re 35 millió tonna fölötti fogyasztást jósolnak. A metanoltól olefin gyártás során etilént és propilént állítanak elő, melyek fontos műanyagok monomerjei (GOGATE 2019).



16. ábra: A globális metanol-felhasználás

Forrás: MMSA (2020)



17. ábra: A metanol felhasználásának megoszlása

Forrás: MMSA (2020)

### 3.5.3. A metanol szerepe az energiarendszerben

Az elmúlt években paradigmaváltás történt a metanol használatában. 2012-ben a metanoltermelés 85%-át a vegyiparban használták fel (OTT et al. 2012), ez azonban gyorsan változik, és a metanol felhasználása az energiaágazatban a metanolfogyasztás több mint 40%-át teszi ki (METHANOL INSTITUTE s.a.).

#### *Üzemanyag belső égésű motorokban*

A metanol közvetlenül használható üzemanyagként, tulajdonságai nagymértékben hasonlítanak a benzinére. Az 5. táblázat három üzemanyagként használatos anyag tulajdonságait tartalmazza, s jól tükrözi, hogy a metanol magas oktánszámmal rendelkezik, öngyulladás hőmérséklete szintén magas, így motorhajtóanyagként jól használható. Hátránya, hogy az energiasűrűsége kisebb, mint a benziné és az etanolé. További hátránya, hogy mérgező, valamint égésekor a láng színtelen. Ez utóbbi könnyen kiküszöbölhető metanol-benzin elegy alkalmazásával.

5. táblázat: A metanol, az etanol és a benzin tulajdonságainak összehasonlítása

Tulajdonság	Metanol	Etanol	Benzin (oktán)
Moláris tömeg (g/mol)	32	46,06	114
Oktánszám	110	90-130	97
Forráspont (°C)	64,70	78,30	~130
Fagyáspont (°C)	-97,8	-114	-40
Öngyulladás hőmérséklet (°C)	464	365	257
Energiasűrűség (GJ/m <sup>3</sup> )	17	21	32

Forrás: Saját szerkesztés LAW et al. (2013) alapján

A megújuló erőforrások felhasználásával gyártott biometanol rendkívül kedvező értékeket mutat a szén-dioxid-kibocsátás csökkentése terén, amennyiben motor-hajtóanyagként használják. A 6. táblázat mutatja, hogy míg a kukoricából gyártott etanol felhasználása többlet szén-dioxid-kibocsátással jár, addig a különböző technológiák alkalmazásával nyert biometanol 65%-tól akár 95%-ig terjedő csökkenést is eredményezhet (LAW et al. 2013).

6. táblázat: A bioüzemanyagok szén-dioxid-megtakarítása

Alternatív üzemanyag	Szén-dioxid csökkentésének mértéke a hagyományos üzemanyaghoz képest, %
Biodízel	84
Etanol kukoricából gyártva	-0,2
Etanol cukornádból gyártva	26
Depóniagáz	89

Metanol- BioMCN	78
Metanol- Blue Fuel Energy	65-84
Metanol- Carbon Recycling International	85
Metanol- Chemrec	95
Metanol- VärmlandsMetanol	80-90

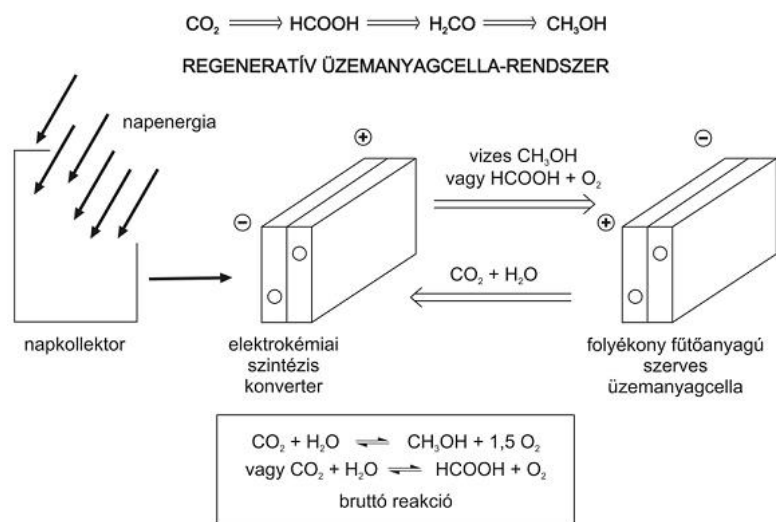
Forrás: Saját szerkesztés LAW et al. (2013) alapján

A metanol cetánszáma alacsony, így dízelmotorokban nem alkalmazható, viszont a metanolból előállított dimetil-éter igen kedvező tulajdonságú, gázolajat helyettesítő anyag. A metanolt gyakran használják biodízel előállítására (EICHLERA et al. 2015). 2011-ben a biodízel előállítása a teljes metanolfogyasztásnak a 6%-át képviselte. A biodízel előállítására felhasznált metanol mennyisége 2020-ban meghaladta a 3 millió tonnát (OTT et al. 2012; METHANOL INSTITUTE s.a.).

### ***Metanolt felhasználó üzemanyagcellák***

A jövő metanolüzemű autókban nem a belső égésű motorok alkalmazásában gondolkodnak, hanem abban, hogy villanymotor és tüzelőanyag-elem hajtja őket. Az üzemanyagcella olyan elektrokémiai galvánelem, amely képes a benne lévő üzemanyag kémiai energiáját közvetlenül elektromos energiává átalakítani. Az üzemanyagcellák és galvánelemek között az a fő különbség, hogy az üzemanyagcellák áramtermelő rendszerek, míg az elemek általában tárolóeszközök. További eltérés, hogy míg a galvánelemek esetében az üzemanyag felhasználása után az elemet (vagy akkumulátort) ki kell cserélni (vagy fel kell tölteni), addig az üzemanyagcellákat új üzemanyaggal folyamatosan el lehet látni. Direkt metanollal működő tüzelőanyag-cellák (DMFC) esetén az üzemanyag a folyékony halmazállapotú metanol, melynek működését a 18. ábra mutatja be. A tüzelőanyag-elemben lényegében a metanol szokatlanul alacsony hőmérsékletű égése zajlik le, vagyis a levegő oxigénjével a metanolból víz és szén-dioxid keletkezik. A tüzelőanyag-elemből az égéskor felszabaduló energiát hő helyett elektromos áramként nyerik ki. A DMFC-ben lejátszódó kémiai folyamat egy megfordítható kémiai reakció, azaz a metil-alkohol állítható elő szén-dioxidból közvetlenül, nincs szükség az előzetes vízbontásra a metanol előállításához. A regeneratív üzemanyagcellában a szén-dioxidot és a vizet elektrokatalitikus úton oxigéntartalmú üzemanyaggá, pl. metanollá lehet alakítani (OLÁH – ÁNISZFELD 2002).

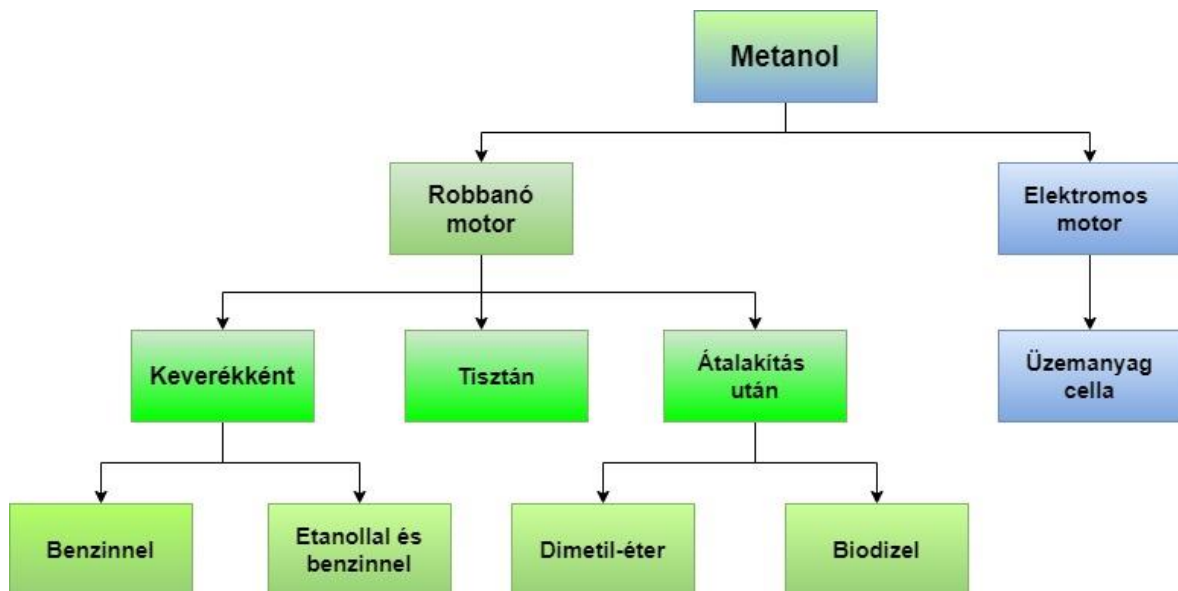




18. ábra: Direkt metanollal működő tüzelőanyag-cella felépítése

Forrás: OLÁH – ÁNISZFELD (2002)

A metanolos üzemanyagcellák sokoldalúak, és különféle területeken felhasználhatók, mint például távközlés, megszakítás nélküli tápegységek, járműipar. Számos demonstrációs, s néhány kereskedelmi projekt létezik metanolos üzemanyagcella hasznosítására. A járműiparban gyakran akkumulátorokkal kombinálva alkalmazzák mind a közúti, mind a vízi közlekedésben (ARAYA et al. 2020). Az üzemanyagcella az elsődleges áramforrás, amelyet a metanol táplál, s egy kiegészítő akkumulátor biztosítja a támogatást pl. dinamikus terhelésnél, hidegindításnál. Ha az energiaigény alacsonnyá válik, az üzemanyagcellából származó áram újratölti az akkumulátort. Ez a hibrid elrendezés lehetővé teszi az üzemanyagcella magas hatékonyságú működését, miközben javítja az üzemanyagcella élettartamát (SHIH, 2018). A fejlesztések gyors ütemét mutatja, hogy várhatóan 2021-ben már megvásárolható lesz a Gumpert Nathalie sportautó, egy metanolos üzemanyagcellás hibrid autó, amely 800 km hatótávolsággal rendelkezik, s 3 perc alatt újratölthető az üzemanyagtartálya (MOTOR AUTHORITY, 2020). A 19. ábra összefoglalja a metanol felhasználási lehetőségét a szárazföldi közlekedésben.

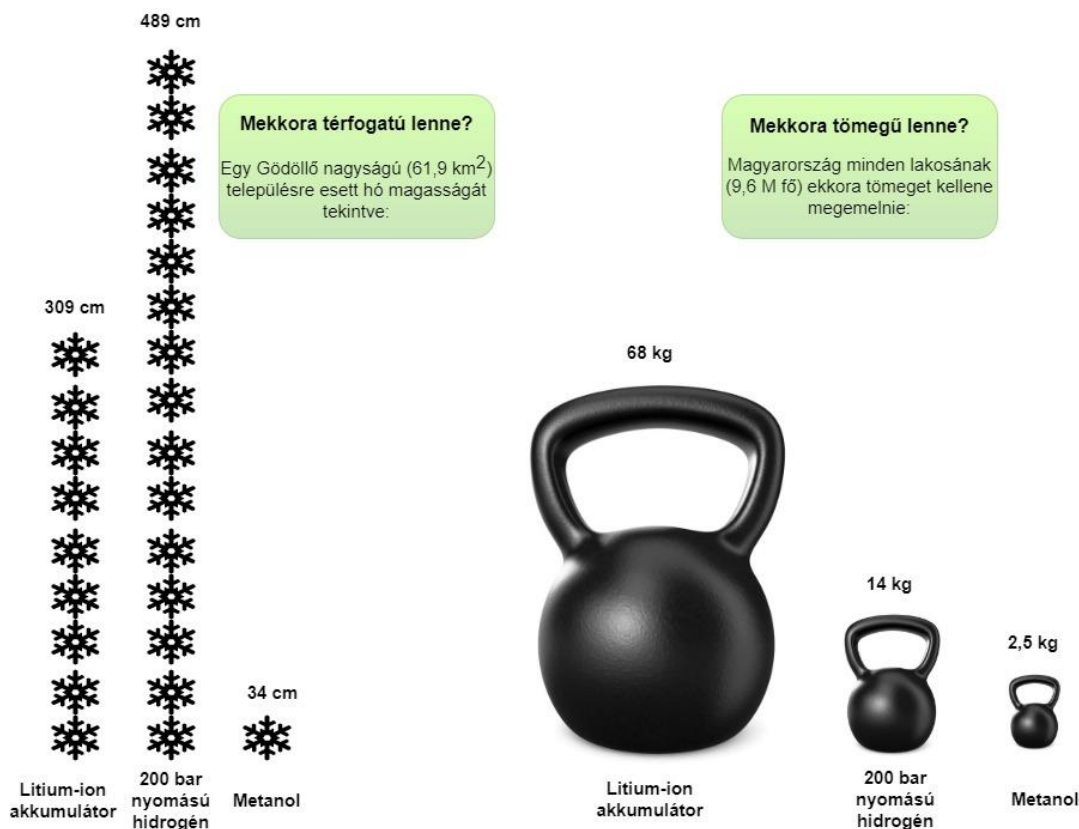


19. ábra: A metanol üzemanyagként való felhasználása

Forrás: Saját szerkesztés

### ***Power-To-X***

A megújuló energiaforrások felhasználásának elterjedésével egy komoly nehézséget kell áthidalni, nevezetesen az időjárás, illetve a napszakok függvényében szakaszos, ingadozó teljesítményű energiaszolgáltatást. A folytonos ellátáshoz a felhasználás idejéig szükség van átmeneti energiatárolásra. Jelenleg a nagy léptékű energiatárolást mechanikus formában, például víztározók segítségével, illetve elektrokémiai energiatárolással, tölthető akkumulátorokkal oldják meg. Az energiatárolás minden típusának megvannak a maga előnyei és hátrányai. A mechanikus energiát alkalmazók kiforrott technológiával rendelkeznek, de magas kezdeti beruházási költségek és a földrajzi korlátok jellemzik. Az elektrokémiai tárolás nagy hatékonyságú, de rövid tárolási időtartamot biztosít. A kémiai anyagokban való energiatárolást hosszú tárolási idő jellemzi, de alacsonyabb a hatásfoka. Az akkumulátorok tömeges alkalmazása felveti a fémek ellátásbiztonságával kapcsolatos kérdéseket. A lítium az egyik legfontosabb fém, amelyik ellátási biztonság kockázatossága közel kritikus, továbbá bányászata jelentős környezeti károkat, vízszennyezést eredményez. További probléma a földrajzi elhelyezkedés, mivel az első számú lelőhelye Chile, amit Ausztrália, Argentína és Kína követ, míg a fém felhasználási megoszlása: Kína 50%, Dél-Korea 20%, Japán 20%, USA 8% (BÁRSONY 2020). A Power-To-X technológiák elengedhetetlenek az energiatárolás megoldásában. Az energiabiztonság szempontjából fontosak a stratégiai energiatartalékok, de sem az akkumulátorok, sem a hidrogén alapú tárolás nem alkalmas erre a feladatra (SHIH 2018), amint ezt a 20. ábra szemlélteti.

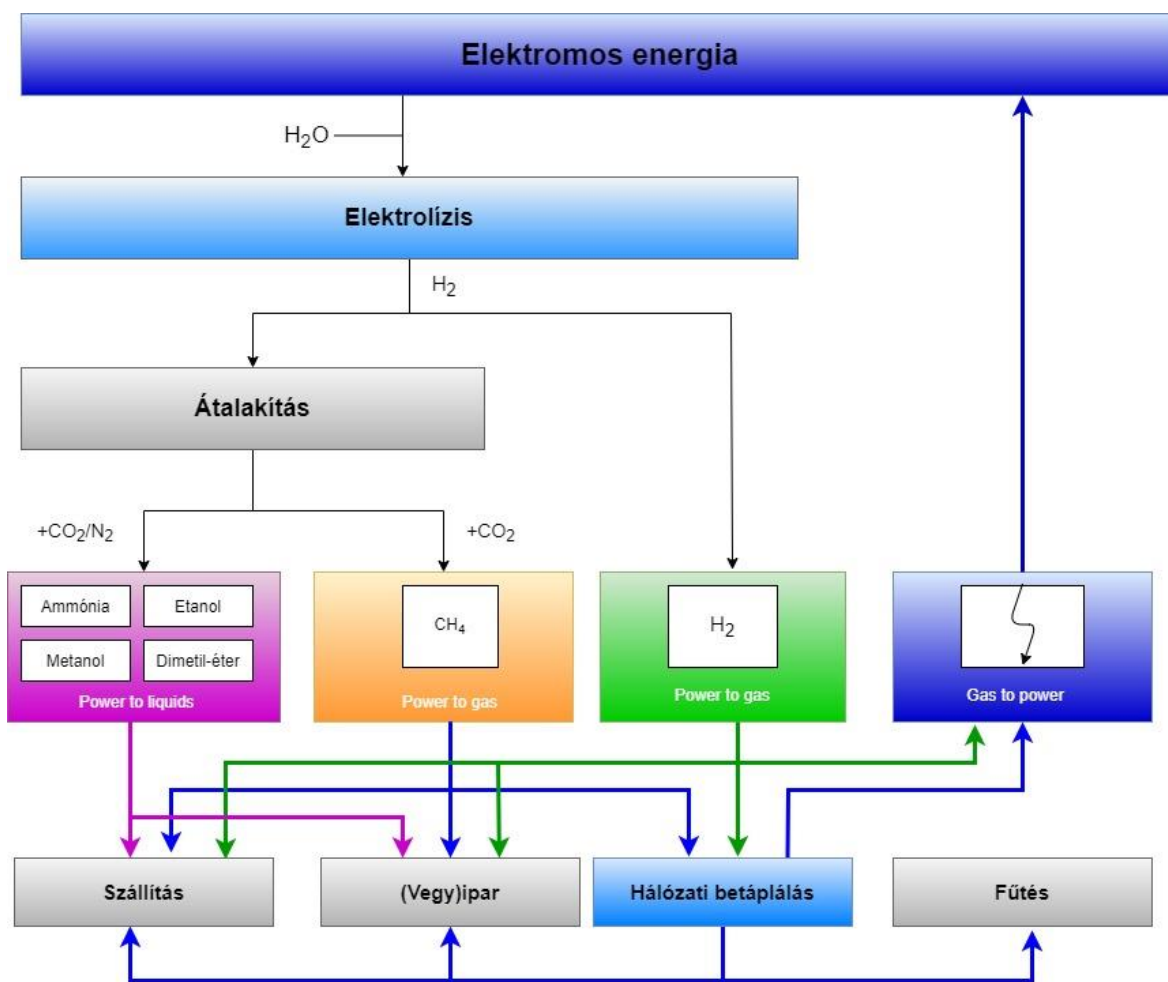


20. ábra: 2050-ben várhatóan 3 óra időtartam alatt felhasznált energia (94 TWh) tárolása akkumulátor, hidrogén és metanol formájában

Forrás: Saját készítés SHIH (2018) adatai alapján

A Power-To-X technológiák összefoglalják azokat a folyamatokat, amelyek során a megújuló forrásból származó elektromos energiát olyan anyag előállítására használják, amely energiatároló funkcióval bír. Ezt a koncepciót a 21. ábrán mutatom be.

Ezek a technológiák az energia tárolásának és szállításának kényelmes módjai olyan régiókban, ahol a hálózati kapcsolatok gyengék, mint pl. vidéki és elszigetelt területeken. A Power-To-X koncepcióban a leggyakrabban az X-et hidrogénnel, metanollal, esetleg metánnal helyettesítjük. Ennek megfelelően a hidrogéngazdaság koncepciója és a metanolgazdaság koncepciója az utóbbi évtizedekben egymás mellett formálódik. A hidrogéngazdaságban a közbenső energiahordozó szerepét az elemi hidrogén tölti be. A hidrogén kiváló energiatároló, égetése során csak víz képződik az energia mellett.



21. ábra: A Power-To-X technológiák

Forrás: Saját készítés DNV GL alapján

A hidrogénalapú gazdaság elméletben nagyon vonzó, mivel a víz bontásának és képződésének folyamatára épít, de a gyakorlati megvalósítás igen nehézkes (BOSSSEL, 2006). Ez az anyag számos olyan tulajdonsággal rendelkezik, ami kevésbé teszi vonzóvá a hidrogéngazdaság elterjedését. A hidrogén egy nehezen cseppfolyósítható gáz, míg a metanol egy folyadék, s a nagy mennyiségű hidrogén kezelése komoly technikai kihívást jelent: nehéz biztonságosan tárolni, szállítani és szétosztani. A hidrogén térfogategységre számított energiasűrűsége (0,0097 GJ/m<sup>3</sup>) töredéke a metanol energiasűrűségének. Komprimálásával és cseppfolyósításával növelhető a hidrogén energiasűrűsége, de a folyamat nagy energiaigényű, s ez veszteséget jelent a hidrogén energiataralmából (MAYER – KRISTON, 2011). A metanol jobb energiátároló, mint a jelenlegi legjobb hidrogéntároló technológiák, nevezetesen a nagy nyomású tárolás kompozit palackokban (legfeljebb 300 bar) és fémhidridekben. A 7. táblázat a hidrogén és a metanol tárolásának összehasonlítását mutatja az energiasűrűség, a tárolási hatékonyság és a nettó energiasűrűség szempontjából.

7. táblázat: Hidrogén és metanol tárolási hatékonyságának összehasonlítása

Tárolási mód	Energiasűrűség MJ/kg	Tárolási hatékonyság %	Nettó energiasűrűség MJ/kg
H <sub>2</sub> kompozitban (300 bar)	119,9	0,60	0,72
H <sub>2</sub> fém hidridekben	119,9	0,65	0,78
H <sub>2</sub> metanolban	119,9	6,9	8,27
Metanol műanyag tartályban	19,9	95	18,90

Forrás: LARMINIE – DICKS (2013)

A hidrogén tárolásának kihívására a hidrogéntartalmú vegyületekben való tárolás lehet a válasz. Ilyen anyagok a metanol, az ammónia, a hangyasav, amelyek kiforrott gyártási technológiákkal és meglévő infrastruktúrákkal rendelkeznek. A metanolra nem csupán a hidrogén alternatívájaként tekinthetünk, hanem hidrogéntároló anyagként is (ANDERSSON – GRÖNKVIST 2019).

### 3.5.4. A metanolgyártás útvonalai

A metanolt először 1661-ben állította elő Robert Boyle. Ezt az időpontot akár a biometanol gyártása kezdetének is tekinthetjük, mivel Boyle a metanolt a fa száraz lepárlásával nyerte. Az 1920-as évekig a fa volt a metanolgyártás alapanyaga, amit a szén követett, s az 1940-es évektől kezdve a földgázalapú termelés is megkezdődött. Ma a metanolgyártás szinte kizárólag szintézisgáz alapú, amely három részfolyamatra bontható:

- szintézisgáz előállítása;
- metanolszintézis;
- a nyers metanol feldolgozása.

A szintézisgáz előállítására sokféle alapanyag használható:

- földgáz, amelynek a legnagyobb a részesedése a metanoltermelésből;
- kőszén, amely a kínai metanolgyártás fő alapanyaga;
- kőolaj és származékai;
- erőművek által termelt hulladék szén-dioxid;
- kokszoló gáz;
- kommunális és mezőgazdasági hulladék;
- biomassza;
- biodízel, bioetanol gyártásának mellékterméke stb.

A sokféle alapanyag ellenére a jelenlegi metanoltermelés közel 65%-ban földgáz, 35%-ban kőszén, s 0,2%-ban biomassza, kommunális hulladék alapú (CHATTERTON 2019). A 8. táblázat összefoglalja a jellemző metanol előállítási módokat.

8. táblázat: Metanol előállítási módok

Alapanyag	Folyamat	Referencia
Szintézisgáz	$\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$ $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	BEHRENS et al. (2012)
Szintézisgáz	Kétlépéses szintézis 1. $\text{CH}_3\text{OH} + \text{CO} \rightarrow \text{HCOOCH}_3$ 2. $\text{HCOOCH}_3 + 2\text{H}_2 \rightarrow 2\text{CH}_3\text{OH}$	PALEKAR et al. (1993)
Metán	Direkt oxidáció $\text{CH}_4 + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$	SUSHKEVICH et al. (2017)
Metán	Enzimológiai folyamat	HWANG et al. (2014)
CO <sub>2</sub> (léggör)	Elektrokémiai folyamat $\text{CO}_2 + \text{H}_2 / \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$	GARROW (2015)

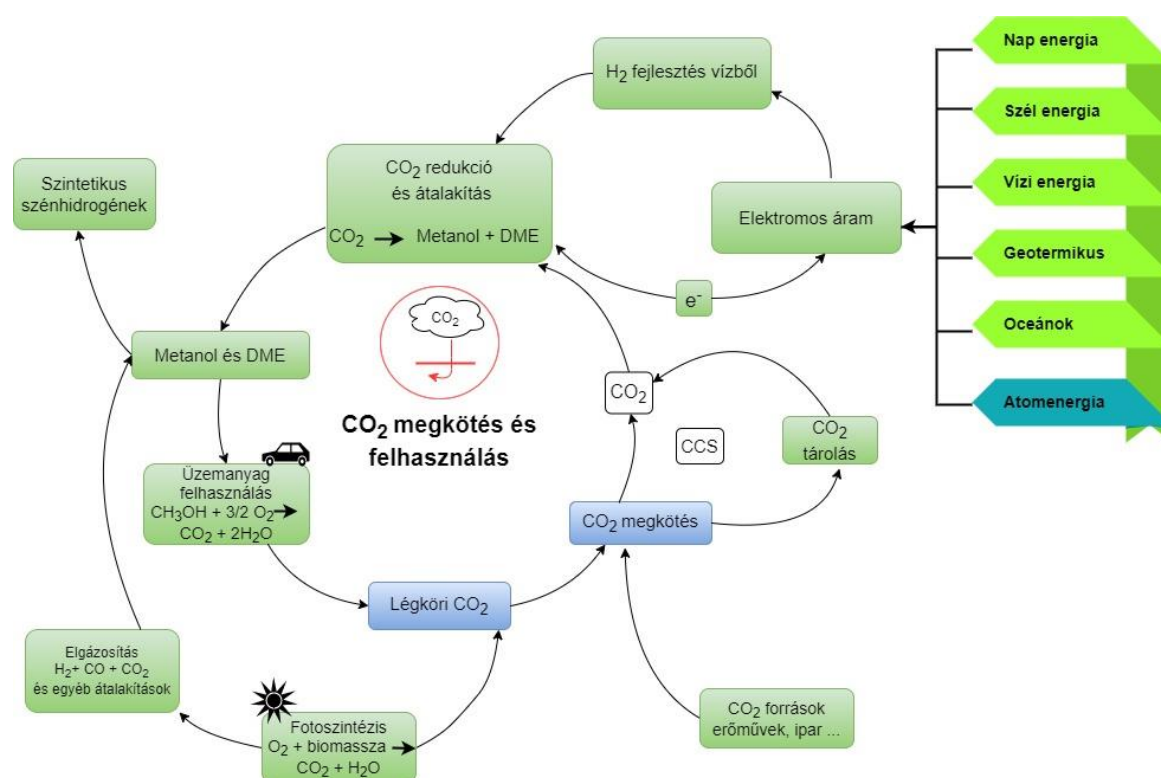
Forrás: Saját szerkesztés a megadott források alapján

A mai igényeknek megfelelő felhasználására irányuló kutatások reneszánszukat élik, hiszen egyre növekszik a folyékony üzemanyagra irányuló kereslet. Az új nyersanyagok és technológiák kutatását a növekvő energiaigény és a környezeti fenntarthatóság szolgálata vezérli. Jól szemlélteti a kutatási érdeklődést, hogy a napenergia-vezérelt szén-dioxid-átalakítás témában a Web of Science adatbázisban 2014-ben 987 cikk jelent meg. A növekedés folyamatos, olyannyira, hogy 2019-ben 2689 cikk jelent meg a témában. A kutatások harmonizálnak a kormányzati törekvésekkel is. Az Egyesült Államokban 2010-ben alakult a Joint Center for Artificial Photosynthesis, melynek célja csupán vízből és szén-dioxidból a napfény segítségével üzemanyagok előállítása nagy hatékonysággal. Az Európai Unióban a Horizon 2020 program fogja össze a napenergiával vezérelt szén-dioxidból kiinduló kémiai folyamatokhoz kapcsolódó kezdeményezéseket az European Chemical Society közreműködésével (HE – JANÁKY, 2020).

### 3.5.5. A metanol szerepe a körkörös gazdaságban

A körkörös gazdaság filozófiája a természeti folyamatok elvére épít. Az ökoszisztémák úgy kapcsolódnak egymáshoz, hogy hálózatok hálózatait hozzák létre, körfolyamatokon keresztül áramoltatják az energiát és a tápanyagot, így semmi sem pazarlódik el (PAULI 2010). A nem újrahasznosítható anyagok még jelentős energiát tárolnak, s ennek a kinyerése, valamint tárolása a célunk. Az energetikai hasznosítás során keletkező hamunak és gáznemű anyagoknak másodlagos nyersanyaggá kell válniuk. Az erőművek által termelt szén-dioxid körforgása, újrahasznosítása,

amelyre eddig csak a természetben volt példa, jelentős kutatási, innovációs terület, ami segíti az üvegházhatású gázok nettó kibocsátását. A legegyszerűbb alkohol, a metanol Fischer-Tropsch szintézisen alapuló gyártásának alapanyagai a szén-dioxid és a hidrogén, így egyszerűen adódott a gondolat, hogy a szén-dioxid megkötése metanolgyártás útján történjen. A 22. ábra szemlélteti a „the carbon loop” zárását azáltal, hogy az erőművek szén-dioxidjának megkötése útján megújuló és fenntartható metanol keletkezik, melyet felhasználva a felszabaduló CO<sub>2</sub> hatékonyan visszavezethető (OLAH et al. 2018).



22. ábra: A metanolgazdaság szerepe az antropogén szén ciklusban

Forrás: OLAH et al. (2018)

A különféle előállítási folyamatokban keletkezett metanol jelölésére nincs általánosan használt, illetve elfogadott nomenklatura; eltérés tapasztalható a különböző időpontokban megjelent publikációkban. Dolgozatomban a Methanol Institute által javasolt megnevezéseket használom. A „megújuló metanolt” (Renewable methanol) megújuló energia felhasználásával gyártják két útvonalon, s ez alapján a „biometanol” és az „e-metanol” megkülönböztetése történik. A biometanolt biomasszából állítják elő, melyek közül az erdészeti és mezőgazdasági hulladék, a települési hulladék, a szennyvízből nyert biogáz, a papíripar hulladékai, melléktermékei jelentősek. Az e-metanol zöld hidrogénből és olyan szén-dioxidból gyártják, amelyet ipari, erőművi füstgázokból, vagy közvetlenül a levegőből vonnak ki (DAC technológia), illetve biomassza

segítségével (BECCS technológia) kötötték meg a légkörből. A BECCS technológia alkalmazása során a szén-dioxid keletkezhet pl. a bioetanol gyártás melléktermékeként. Kiemelkedő jelentőségű, hogy a biometanol gyártása megújuló nyersanyagokat használ, nem élelmiszercélú növényeket, szerves hulladékokat. A mezőgazdasági termelés során rengeteg szerves hulladék termelődik (GERGELY – MAGDA 2011). A legnagyobb hulladékképződés a kávé termelését kíséri, mivel a kávébab betakarítása után a teljes biomassza 99,8%-a válik hulladékká. Az egyesült államokbeli vizsgálatok azt mutatják, hogy egységnyi ipari, bányászati, mezőgazdasági hulladékkezelés hetvenszer költségesebb, mint a kommunális hulladék kezelése. A mezőgazdasági termelést kísérő hulladék jellemzően a biomassza, valamint a munkához szükséges műanyagok (pl. fólia), illetve az állattartáshoz kapcsolódó trágyalé. Számos kutatás foglalkozik a biomasszából történő metanol gyártással (GÜLLÜ – DEMIRBAS., 2001; KUMABE et al. 2008; HASEGAWA et al. 2010).

A kommunális hulladék esetén a minőségi újrahasznosításra alkalmatlan hulladék lerakását helyettesítheti, ha metanol előállítására használják, s közben a hulladék energetikai hasznosításakor képződő szén-dioxid visszaforgatása is megvalósul (MAGDA- TÓTH 2019). Számos egyetemen és kutatóintézetben folyik a metanol előállításához kapcsolódó kutatás. A megvalósult és a közeljövőben induló nagyobb projekteket tartalmazza, továbbá egy magyarországi kísérletet mutat be a 9. táblázat.

9. táblázat: Biometanolt és e-metanolt előállító projektek

Metanol gyártója	Alapanyag	Kapacitás	Forrás
<b>Biometanolt előállító üzemek</b>			
<b>Enerkem Alberta Biofuels, Kanada</b>	nem újrahasznosítható, nem komposztálható települési szilárd hulladék	évi 100 000 tonna szilárd hulladék feldolgozása	ENERKEM (2020)
<b>VärmlandsMetanol Ltd., Svédország</b>	erdészeti hulladék, fa apríték	évi 130 millió liter metanol termelése	VÄRMLANDSMETANOLAB (2017)
<b>BioMCN, Hollandia</b>	glicerín, ami a biodízel gyártásának mellékterméke	évi 250 millió liter metanol termelése	DEKKER – LANTING (2009)
<b>Chemrec, Svédország</b>	papírgyártás melléktermékei	évi 180 millió liter metanol termelése	CHEMREC (2017)
<b>Södra, Svédország</b>	faforgácsból extrakciós eljárással	évi 5 250 tonna	SÖDRA (2021)
<b>Enerkem, Spanyolország</b>	nem újrahasznosítható, nem komposztálható települési szilárd hulladék	évi 375 000 tonna szilárd hulladék feldolgozása,	ENERKEM (2020)



		270 millió tonna metanol	
<b>Enerkem Varennes Biofuels, Kanada</b>	erdészeti hulladék, nem újrahasznosítható, nem komposztálható települési szilárd hulladék	200 000 tonna hulladék	ENERKEM (2020)
<b>ENI Refinery, Livorno, Olaszország</b>	szilárd hulladék	évi 115 000 tonna	ENI (2021)
<b>Alberta Pacific Kanada</b>	keményfa	évi 2 000 tonna	ALBERTA PACIFIC (2020)
<b>AkzoNobel, Van Gansewinkel, Air Liquide, AVR, Enerkem, Hollandia</b>	nem újrahasznosítható, nem komposztálható települési szilárd hulladék	tervek szerint évi 360 000 tonna hulladék, 270 millió liter metanol	ENERKEM (2020)
<b>Perstorp, Svédország</b>	biometán	tervek szerint évi 200 000 tonna metanol	PERSTORP (2021)
<b>LowLand Methanol, Hollandia</b>	fa hulladék, szilárd települési hulladék	évi 120 000 tonna metanol	LOWLANDS METHANOL B.V. (2021)
<b>BASF, Németország</b>	biometán	nincs adat	BASF (2018)
<b>ENIN Környezetipari Klaszter, Magyarország</b>	szilárd kommunális hulladék, szennyvíziszap és biomassza hulladék	tervek szerint évi 6-7 000 tonna hulladék	BAI, A. (2013)
<b>E- metanolt előállító üzemek</b>			
<b>Carbon Recycling International, Izland</b>	geotermikus úton kibocsátott CO <sub>2</sub> , de alkalmas iparilag kibocsátott CO <sub>2</sub> használatára	évi 5 millió liter a metanoltermelés jelenleg, de a tervek szerint 50 millió tonna lesz	CRI (2017)
<b>Blue Fuel Energy, Kanada</b>	ipari forrásokból származó CO <sub>2</sub>	tervek szerint évi 570 millió tonna metanol termelése	BLUE FUEL ENERGY (2018)
<b>Dalian Institute of Chemical Physics, Kína</b>	ipari forrásokból származó CO <sub>2</sub>	évi 1 000 tonna metanol	CHINESE ACADEMY OF SCIENCE (2020)

Forrás: Saját szerkesztés a megadott források alapján

A táblázat tükrözi, hogy a biometanol gyártásának technológiája érettebb fázisban van az e-metanol technológiához képest. E-metanol gyártása jelenleg 3 üzemben történik, melyek közül elsőként a

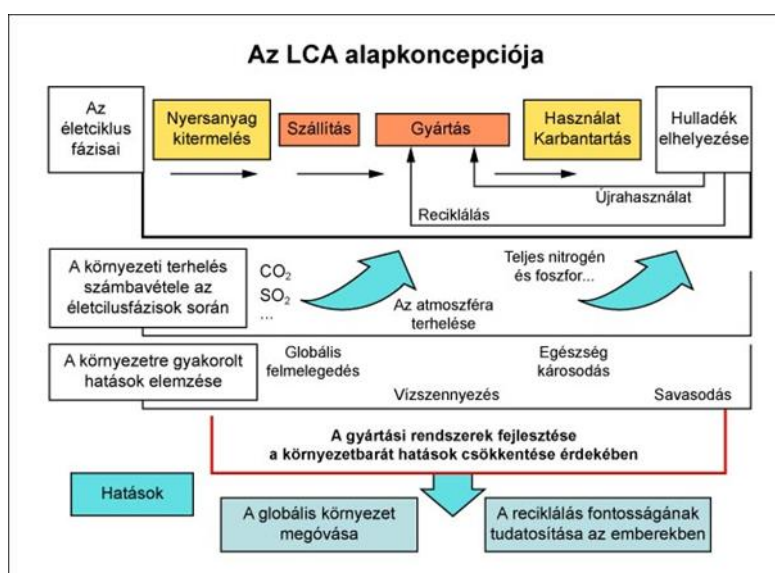
„George Olah Renewable Methanol Plant” (Izland, 2011) kezdte el működését, s utolsóként pedig a Dalian Institute of Chemical Physics (Kína, 2020) üzeme, de a következő 5 évben akár 10 üzem is bekapcsolódhat a gyártásba. A demonstrációs projektek tekintetében az e-metanolhoz kapcsolódó projektek száma kétszer annyi, mint a biometanolhoz kapcsolódóké, tehát jelentős kutatási potenciál összpontosul a DAC és BECCU technológiák alkalmazására (IRENA AND METHANOL INSTITUTE 2021).

## 4. ANYAG ÉS MÓDSZER

Az alábbi fejezet a dolgozat hipotézisnek sorrendjében mutatja be azon tudományos módszertanokat, amelyek a feltevések teszteléséhez szükségesek.

### 4.1. Az életciklus-elemzések

Az életciklus fogalma Schumpeter (1939) munkássága által került be a közgazdaságtanba, mint az innovációhoz kapcsolódó fogalom, amely valamely termék, termékcsoporthoz előállításának kezdetétől, illetve piacon való megjelenésétől a gyártás befejezéséig, ill. a piacról való kikerüléséig tart. A környezetgazdálkodásban használatos életciklus fogalom az 1990-es évek elején jelent meg, és az 1992-es Riói Konferencián már olyan eszköznek tekintették, amely a környezeti menedzsment feladatok széles köréhez alkalmazható, valamint a környezeti fenntarthatóság lényegi elemeit hangsúlyozza, amint ezt az 23. ábra szemlélteti. (TÓTHNÉ SZITA 2008).



23. ábra: Az életciklus-elemzés (LCA) alapelve

Forrás: KISS (2013)

Az EU Integrált Termékpolitika (IPP) alapvető elve, hogy minden termék valamilyen módon környezeti degradációt okoz, akár a gyártás során, akár a használat alkalmával, akár az ártalmatlanítás miatt. A termékek életciklusai hosszú és bonyolult folyamatok lehetnek: a természeti erőforrások kitermelésétől a tervezésükön, gyártásukon, összeszerelésükön, forgalmazásukon, értékesítésükön és felhasználásukon át a hulladékként történő végleges elhelyezésükig. A termékek környezeti hatásának vizsgálatára az Európai Bizottság döntése alapján az életciklus-elemzés (LCA) a legalkalmasabb eszköz, amelynek módszertani harmonizálását segítik az Európai LCA Platform létrehozásával (EURÓPAI BIZOTTSÁG 2016b). Ez az elemzés lehetővé teszi a termékek, folyamatok, modellek környezetre gyakorolt hatásainak számszerű vizsgálatát és

összehasonlíthatóságát mérőszámok alapján, az ISO szabványok által meghatározott módszer szerint.

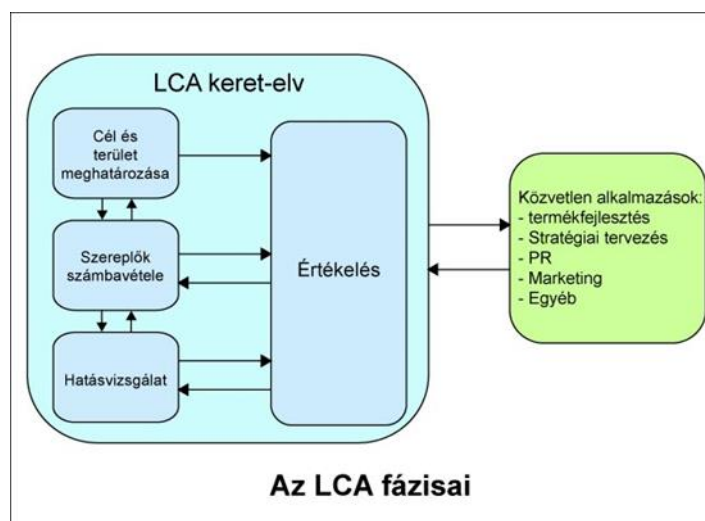
Az ISO 14040 szabvány alapján az életciklus-elemzés a következőképpen definiálható: „a termékkel kapcsolatos környezeti tényezők és potenciális hatások értékelésének olyan módszere, amely leltárt készít a termékkel kapcsolatos folyamatok rendszerének bemenetéről és kimeneteiről; kiértékeli az ezekkel kapcsolatos potenciális környezeti hatásokat; értelmezi a leltári elemzésnek és a hatásértékelés fázisainak eredményeit a tanulmány céljainak figyelembevételével.” (MSZ EN ISO 14040)

Az életciklus-elemzésre a következő ISO szabványok vonatkoznak:

- ISO 14040:2006 Környezetközpontú irányítás – Életciklus-értékelés – Alapelvek és keretek (ISO 14040:2006);
- ISO 14044:2006 Környezetközpontú irányítás. Életciklus-értékelés. Követelmények és útmutatók (ISO 14044:2006).

Az életciklus-értékelés vizsgálat négy szakaszra bontható, melyet a 24. ábra szemléltet. A négy szakasz:

1. A cél és a rendszerhatárok kijelölése: a pontos cél és tárgy meghatározása összhangban a felhasználási szándékkal.
2. A leltáranalízis: bemeneti/kimeneti adatok jegyzéke, amely a vizsgált rendszerre vonatkozik.
3. A hatásbecslés: biztosítsa a további információt a termelési rendszer életciklus-értékelésének a megállapításához.
4. Az értékelés, értelmezés: segít a döntéshozatalban (BAKOSNÉ 2016).



24. ábra: Az életciklus-elemzés fázisai

Forrás: KISS (2013)

Az ISO 14040:2006 szabvány szerinti egyik leggyakrabban alkalmazott hatásértékelő módszer a CML 2001. A 10. táblázat mutatja be, hogy a környezeti hatásokat több hatáskategóriára osztották fel, s az így keletkező környezeti mutatók egy mutatóvá aggregálhatók (GUINÉE 2002).

10. táblázat: A környezeti hatások hatáskategóriái

Hatáskategóriák	Referencia
Globális felmelegedésre gyakorolt hatások	kg CO <sub>2</sub> -egyenérték
Savasodási potenciál	kg SO <sub>2</sub> -egyenérték
Eutrofizációs potenciál	kg Foszfát-egyenérték
Humán toxicitási potenciál	kg DCB-egyenérték
Fotokémiai ózonképződési potenciál	kg Etilén-egyenérték
Ózonréteg vékonyodása	kg CFC11-egyenérték
Erőforrások csökkenése	kg SB-egyenérték
Földi ökototoxicitás	kg DCB-egyenérték
Tengervízi ökototoxicitás	kg DCB-egyenérték
Édesvízi ökototoxicitás	kg DCB-egyenérték

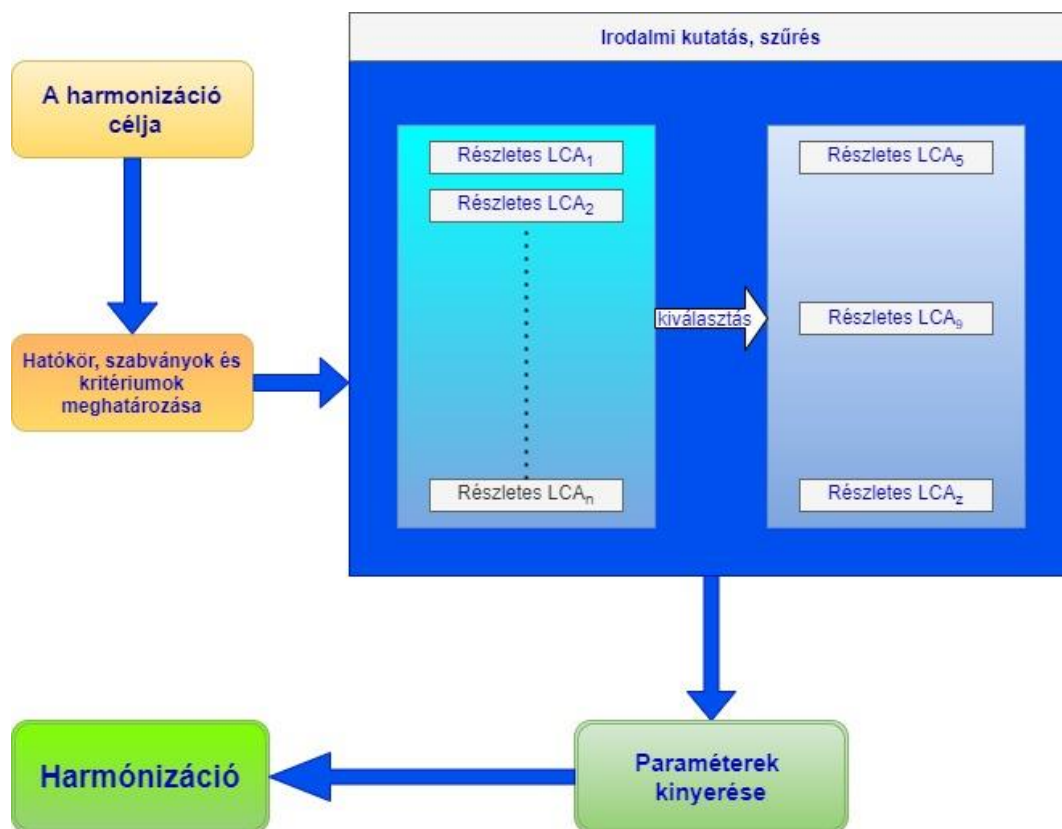
Forrás: GUINÉE (2002) alapján

Az LCA erőssége, hogy a termék életének minden fázisában összegyűjti a környezeti hatásokra vonatkozó adatokat, majd azokat összegzi. Az összesített eredményeket értelmezi, majd súlyozza és értékeli a környezeti hatások jelentősége szempontjából. A kapott eredményeket egyszerűsített mutatókba sűrítve, könnyen átlátható formában jeleníti meg.

A fosszilis üzemanyagok helyettesítését célzó kutatások és az új technológiák bevezetésének elengedhetetlen része az életciklus-elemzések elvégzése. A CO<sub>2</sub> alapanyagként való használata igen hatékony eszköz lehet a globális szén-dioxid-koncentráció csökkentésében, a fosszilis energiahordozóktól való függőség mérséklésében, de a kidolgozott technológiák környezetre gyakorolt hatásainak számbavétele szükségszerű, annak érdekében, hogy rávilágítson arra, hogy az adott technológiai út valóban segíti-e a fenntarthatósági célok megvalósulását. Az elemzések elvégzését pont az nehezíti, ami a metanolgazdaság erőssége, azaz hogy a metanolgártás alapanyagai számtalan forrásból származhatnak, s a folyamat során felhasznált energia szintén lehet fosszilis eredetű, nukleáris energia vagy valamilyen megújuló energia.

Az LCA-eredmények halmazának elemzése alkalmas arra, hogy könnyebben értelmezhetővé váljanak a korábbi LCA-k. Az elemzés lehetővé teszi a vizsgálatok összehasonlítását, segít beazonosítani a környezeti hatások fő mozgatórugóit, csökkenti a becslések bizonytalanságát (HEATH – MANN, 2012). Az LCA-eredmények halmazának elemzését megelőzi egy harmonizációs folyamat, amit a 25. ábra szemléltet. Az első lépés a harmonizáció céljának

meghatározása, s ez egy olyan keretet biztosít, amely a későbbi szakaszokban alkalmazott módszereket, folyamatokat megszabja. A második lépésben a vonatkozó tanulmányok áttekintése és szűrése következik. A harmonizálandó tanulmányok tartalma nagymértékben meghatározza az elemzés hatókörét és megfelelő szűrési kritériumok alkalmazását (WARNER et al. 2010; PAKURÁR et al. 2020). Ezután következik a releváns paraméterek kinyerése, majd a harmonizáció.



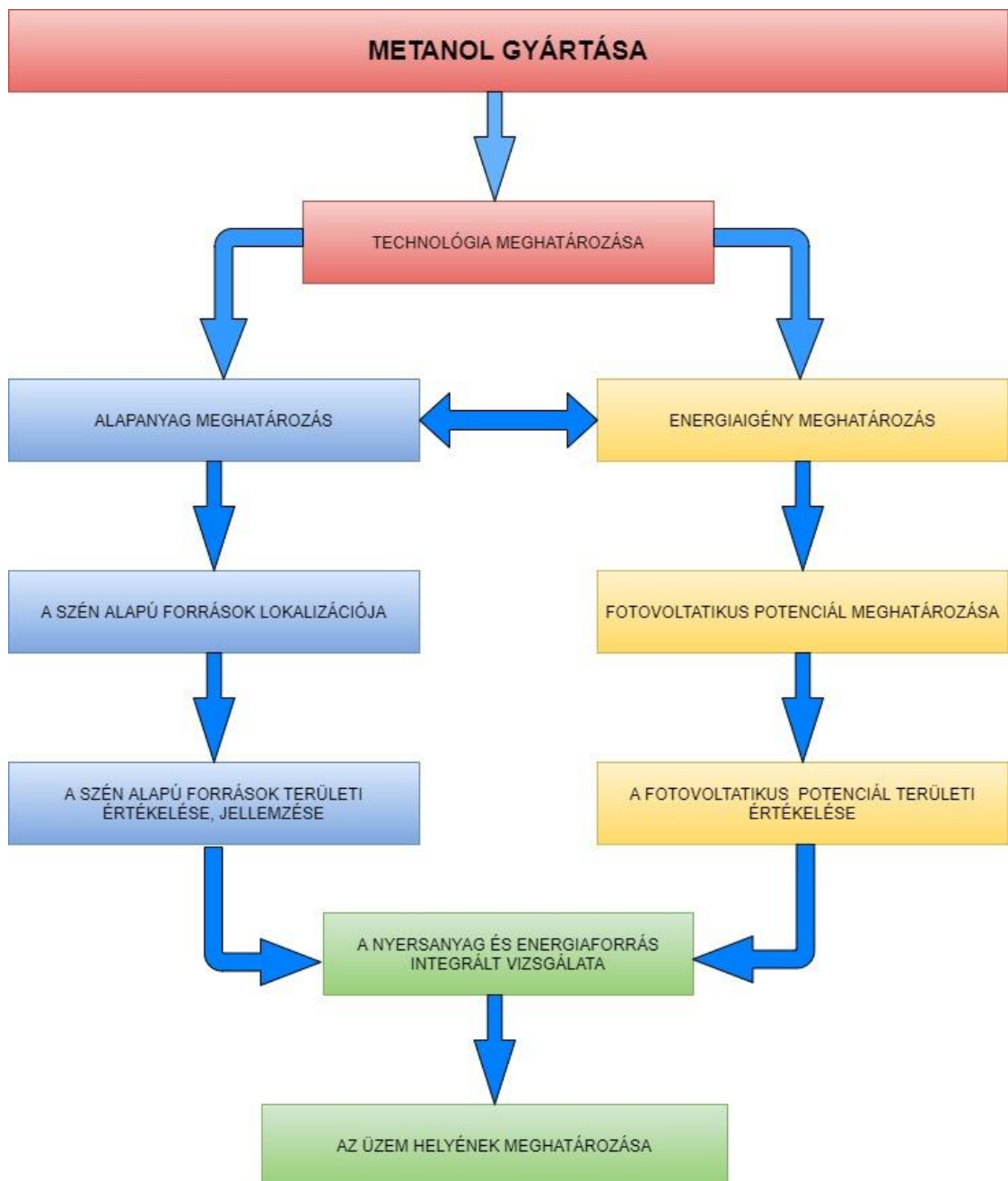
25. ábra: Az életciklus-elemzések harmonizációs folyamata

Forrás: Saját szerkesztés WARNER et al. (2010) alapján

A vonatkozó tanulmányok azonosítása és gyűjtése a világ egyik legjelentősebb hivatkozáskereső multidiszciplináris adatbázisának, a Scopus, felhasználásával történt.

#### 4.2. A magyarországi megújuló metanolt gyártó üzem lehetőségének vizsgálata

A megújuló metanol-üzem létesítésének kérdése komplex megközelítést igényel. A környezeti fenntarthatóság mellett vizsgálni kell műszaki, a gazdasági és pénzügyi aspektusokat is. Az értékelés hierarchikus, a műszaki megvalósíthatóság előfeltétele a gazdasági megvalósíthatóságnak, amely a pénzügyi megvalósíthatóságot determinálja (TAKÁCS et al. 2012). A műszaki megvalósíthatóság vizsgálatát a 26. ábra mutatja be. A gazdasági lehetőségek vizsgálata a nemzetközi szakirodalomban fellelhető paraméterek adaptációjával a magyarországi körülményekhez igazítva történt.



26. ábra: Metanol üzem helyének meghatározása

Forrás: Saját szerkesztés

A megújuló metanol-üzem létesítéséhez kapcsolódó kérdések megválaszolása a vonatkozó szakirodalom valamint a hazai és a nemzetközi adatbázisok adatainak felhasználásával történt. Ilyen adatbázisok: Országos Környezetvédelmi Információs Rendszer, Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt., Európai Szennyezőanyag-kibocsátási és Hulladékszállítási Nyilvántartás, International Renewable Energy Agency, EurObserv'ER, KSH, Eurostat.

## 5. EREDMÉNYEK

Az alábbi fejezet mutatja be a felállított hipotézisek vizsgálatának eredményeit, melyek a gyűjtött adatok elemzésén alapulnak az előző fejezetben ismertetett módszerek használatával.

### 5.1. Milyen hatása van az ÜHG-kibocsátásra a metanolgazdaságnak, illetve környezeti előnyökkel jár-e a magvalósítása

A globális metanolellátási láncok és a környezeti hatások rendszerszintű vizsgálata szükséges ahhoz, hogy a metanolgazdaság megvalósulása valóban a fenntarthatósági célok elérését szolgálja.

#### 5.1.1. A metanol üzemanyag hatásai

A világ legnagyobb metanoltermelőjeként Kína sokkal jobban előrehaladt a metanolgazdaság kialakítását illetően, mint bármely más ország, s ezt erős kormányzati támogatás is segíti. 2009-ben a kínai kormányzat a 85% metanol-benzin (M85) üzemanyag keverék nemzeti szabványát vezette be, elősegítve ezzel a metanolüzemű járművek használatának elterjedését. Kínában egyelőre nem a metanolgazdaság céljainak megfelelő metanolgyártás folyik, azaz biometanol előállítása, hanem három fosszilis alapanyagból termelik: szénből, kokszológázból (COG) és földgázból. Vizsgálták, hogy a metanolalapú üzemanyag használata milyen környezeti terhelést jelent. A tanulmányban a "well-to-wheel" (WtW, azaz forrástól a kerékig) elnevezésű módszert alkalmazták, amely magába foglalta a metanol gyártását a szükséges katalizátorok, segédanyagok felhasználásának figyelembe vételével, a metanol üzemanyag kutakra való szállítását, valamint az M100 üzemanyag használatát. Megállapítást nyert, hogy a domináns, szénalapú technológiával gyártott metanol magasabb környezeti terhekkel jár, mint a benzin használata. A környezeti terhelés a nagyobb energia- és vízfogyasztásban mutatkozott meg, valamint az üvegházhatású gázok és a kén-dioxid kibocsátásában. A kínai kormányzat által támogatott kokszológáz-alapú technológia környezeti szempontból kedvezőbb, mint a szénalapú, de a benzinhoz képest kedvezőtlenebb (YAO et al. 2018).

A „well-to-wheel” elemzést alkalmazva CHAPLIN (2013) különböző európai alapanyagok esetén vizsgálta a biometanol üzemanyag üvegházhatású gáz kibocsátását, amelyet a 11. táblázat foglal össze.

A táblázatban a jelenlegi fejlettségű technológiai utaknak megfelelő értékek szerepelnek, de az elemzés hosszú távú előrejelzés szerint 1,74 g CO<sub>2e</sub>/MJ mérséklődik az üvegházhatásúgáz-kibocsátás, ami 98%-os csökkenést jelent a benzin és dízel használatához képest.



11. táblázat: „well-to-wheel” üvegházhatást okozó gázok kibocsátása

Alapanyag	ÜHG-kibocsátás (CO <sub>2e</sub> /MJ)
Nyers glicerin, a biodízelgyártás mellékterméke	30,59
Papírgyártás mellékterméke (black liquor)	3,00
Energiaültetvény növényei	7,32
Erdészeti, faipari hulladékfa elgázosítása	5,32
Biogáz	34,04
Fosszilis forrás (összehasonlításra az EU által elfogadott technológiai út)	83,8

Forrás: CHAPLIN (2013) alapján

Az üzemanyagok hosszabb távú stratégiáját támogatva a Dán Technológiai Intézetben 3 energiaforrás használatát vizsgálták a közúti közlekedésben: E5: 5% etanolt tartalmazó benzin; M85: 85% metanolt tartalmazó benzin; akkumulátor. Az eredményeket a 12. táblázat mutatja.

12. táblázat: Dán elektromos, metanolüzemű és benzinüzemű autók összehasonlítása

	E5	M85	Elektromos
<b>Az autógyártás kibocsátása</b>	5.600 kg CO <sub>2eq.</sub>	5.600 kg CO <sub>2eq.</sub>	8.800 kg CO <sub>2eq.</sub>
<b>150 000 km út megtételének kibocsátása</b>	19.650 kg CO <sub>2eq.</sub>	5.250 kg CO <sub>2eq.</sub>	6.000 kg CO <sub>2eq.</sub>
<b>Életciklus alatti kibocsátás</b>	25.250 kg CO <sub>2eq.</sub>	10.850 kg CO <sub>2eq.</sub>	14.800 kg CO <sub>2eq.</sub>
<b>Üzemanyag és energia út</b>	kukorica fermentáció és földgáz	trágyából származó biogáz	dán villamos energia mix

Forrás: Saját szerkesztés WINTHER (2019) alapján

Dániában a villamos energia előállítása igen kevésbé terheli a környezetet, mindössze 56 g CO<sub>2eq</sub>/MJ, s ilyen paraméterek mellett is a metanol a legkisebb ÜHG-kibocsátású üzemanyag a vizsgáltak közül. Ha az EU villamos energia mixét tekintjük, ami 129 g CO<sub>2eq</sub>/MJ, akkor a metanol felhasználása még további környezeti előnyt mutat (WINTHER 2019).

A kén-dioxid, a nitrogén-oxidok és az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére irányuló együttes erőfeszítések jelentős változást igényelnek a tengeri szállítmányozás terén is. A hajózási társaságok számára az egyik lehetőség, hogy változtatnak a felhasznált üzemanyagon. Hajó üzemanyagaként Svédországban vizsgálták a cseppfolyósított földgáz (LNG), a cseppfolyósított biogáz (LBG), a metanol és a biometanol környezeti hatásait. Az életciklus-elemzés kimutatta, hogy a földgáz, illetve a földgázból gyártott metanol az éghajlatváltozás megelőzésének szempontjából

nem kedvezőbb, mint a dízelolaj üzemanyag, csupán a szállítás közbeni környezeti terhelés csökken. A biomasszából előállított metán és metanol felhasználása egyforma mértékben csökkentheti a hajózás hatását az éghajlatváltozásra (BRYNOLF et al. 2014).

### 5.1.2. CCU technológiák környezeti hatásai

A CCU technológiák azt a képet kelthetik, hogy a légkörből vagy az erőművek füstgázából származó szén-dioxid felhasználása alapanyagként egyértelműen környezetbarát, hiszen csökkenti a légkörben található szén-dioxid mennyiségét. A CCU technológiák kidolgozása, alkalmazása intenzív kutatói aktivitást mutat. A fenntarthatóság szempontjából legkedvezőbb megoldások azonosításához elengedhetetlen, hogy az egyes utak környezetre gyakorolt hatása összehasonlítható legyen, számokban kifejeződjön, továbbá a meglévő folyamatokhoz képest tükröződjön az új technológiák előnye. A teljes életciklus alatt azonos kémiai szerkezetű és összetételű termék esetén a környezetre gyakorolt hatás megállapítására elegendő összehasonlítani a nyersanyagok beszerzési útvonalait és a gyártási folyamatot (ZIMMERMANN et al. 2018).

A 13. táblázat a különböző biometanol és e-metanol technológiai utak „cradle-to-gate” életciklus-elemzéseit foglalja össze a globális felmelegedésre gyakorolt hatásmutató tekintetében. Ez a mutató, amely az ÜHG-kibocsátásra gyakorolt hatást kifejezi, s valamennyi tanulmányban fontos elemként szerepel.

13. táblázat: „Cradle-to-gate” életciklus elemzések eredményei

Folyamat	Hidrogén-forrás	Szén-forrás	Elektromos áram	Globális felmelegedésre gyakorolt hatások kg CO <sub>2</sub> -egyenérték	Globális felmelegedésre gyakorolt hatások kg CO <sub>2</sub> -egyenérték fosszilis forrás esetén	Referencia
Szén-dioxid direkt hidrogénezése	metán gőz-reformálása	nincs kifejezett forrás	electricity supply (EU-27 in 2020)	7,3–8,4	5,3- 5,7	STERNBERG et al, 2017
Szén-dioxid direkt hidrogénezése	elektrolízis	levegő	szél	0,5	0,8	HOPPE et al. 2018
Szén-dioxid direkt hidrogénezése	elektrolízis	biogáz	szél	0	0,8	HOPPE et al. 2018

<b>Szén-dioxid direkt hidrogénezése</b>	elektrolízis	cement-üzem	szél	-0,1	0,8	HOPPE et al. 2018
<b>Szén-dioxid direkt hidrogénezése</b>	elektrolízis	lignit-erőmű	szél	0	0,8	HOPPE et al. 2018
<b>Szén-dioxid direkt hidrogénezése</b>	elektrolízis	hulladék égetése	szél	0,1	0,8	HOPPE et al. 2018
<b>Szén-dioxid direkt hidrogénezése</b>	elektrolízis	biomassza fermentálása	szél	0,3	erre nincs adat, de a Cradle-to-grave analízis alapján sokkal magasabb	MATZEN - DEMIREL, 2016
<b>Szén-dioxid direkt hidrogénezése</b>	elektrolízis	erőmű	szél	-1,45	0,79 irodalmi hivatkozás	AL-KALBANI et al. 2016
<b>Szén-dioxid direkt hidrogénezése</b>	elektrolízis	erőmű	nap (PV)	-1,14	0,79 irodalmi hivatkozás	AL-KALBANI et al. 2016
<b>Szén-dioxid direkt hidrogénezése</b>	elektrolízis	erőmű	földgáz	5,02	0,79 irodalmi hivatkozás	AL-KALBANI et al. 2016
<b>Szén-dioxid direkt hidrogénezése</b>	elektrolízis	erőmű	szén	9,72	0,79 irodalmi hivatkozás	AL-KALBANI et al. 2016
<b>SOEC eljárás, azaz szén-dioxid és víz koelektrolízise</b>	elektrolízis	erőmű	szél	-1,22	0,79 irodalmi hivatkozás	AL-KALBANI et al. 2016
<b>SOEC eljárás, azaz szén-dioxid és víz koelektrolízise</b>	elektrolízis	erőmű	nap (PV)	-1,10	0,79 irodalmi hivatkozás	AL-KALBANI et al. 2016
<b>SOEC eljárás, azaz szén-dioxid és víz koelektrolízise</b>	elektrolízis	erőmű	földgáz	2,09	0,79 irodalmi hivatkozás	AL-KALBANI et al., 2016
<b>SOEC eljárás, azaz szén-dioxid és víz koelektrolízise</b>	elektrolízis	erőmű	szén	4,38	0,79 irodalmi hivatkozás	AL-KALBANI et al. 2016
<b>szintézisgázból (S2P eljárás)</b>	WGS reaktorból	nincs kifejezett forrás	nap	-1,71	0,67	KIM et al. 2011
<b>Szintézisgázból (S2P eljárás)</b>	WGS reaktor	nincs kifejezett forrás	hagyományos	1,87	0,67	KIM et al. 2011

<b>Szén-dioxid direkt hidrogénezése</b>	elektrolízis	cement-gyár	ENTSO-E európai energiakeverék	1300	2800	MEUNIER et al. 2020
<b>Integrált acél és metanol gyártás</b>	elektrolízis	acélgyár	ESDP 2030	$2,98 \cdot 10^{10}$	$2,09 \cdot 10^{10}$	THONEMA NN- MAGA, 2020
<b>Integrált acél és metanol gyártás</b>	elektrolízis	acélgyár	szél	$1,219 \cdot 10^{10}$	$2,09 \cdot 10^{10}$	THONEMA NN- MAGA, 2020

Forrás: Saját szerkesztés a megadott források alapján

A táblázat megmutatja, hogy az LCA tanulmányok célja a CCU technológia összehasonlítása egy referencia folyamattal, de a különböző CCU folyamatok összehasonlítása nehézkes vagy akár lehetetlen.

Megállapítom, hogy a biometanol és e-metanol előállítási utak esetén sem a szénforrás, sem a hidrogénforrás nem meghatározó az ÜHG-kibocsátás szempontjából, s valamennyi eljárás kedvezőbb lehet a globális felmelegedésre gyakorolt hatások tekintetében, mint a földgáz alapú metanolgyártás. A folyamatok ÜHG kibocsátását a gyártási folyamat során felhasznált villamos energia forrása határozza meg. A fosszilis alapú villamos energia használata nem jelent környezeti előnyt a metanol előállításánál a referenciához képest, sőt még az EU 27 villamos energia mix alkalmazása sem. Megújuló energiaforrások segítségével előállított hidrogén és bármely forrásból származó szén-dioxid folyamattól függetlenül egy alacsonyabb szintű globális felmelegedésre gyakorolt hatású metanolgyártást eredményez.

Az ÜHG-kibocsátás csökkentése érdekében a technológiák kidolgozásánál, illetve kiválasztásánál a megújuló energiaforrások használata elengedhetetlen követelmény, de GONZALEZ-GARAY és munkatársai (2019) szerint mindenképpen figyelembe kell venni az energiafelhasználás, az édesvíz és a földhasználat mértékét, ha környezetre gyakorolt valós hatást ki szeretnénk fejteni.

Vizsgálatom eredménye, hogy a megfelelő technológiával gyártott biometanol és e-metanol a fenntarthatóságot szolgáló üzemanyag, amelyet a jelenlegi szállító és elosztó hálózat használatával lehet eljuttatni a fogyasztókhöz, így az üzemanyag-felhasználás szerkezetének rövid időn belüli változtatására képes. Nincs szükség új szállítási technológiák és újfajta elosztó állomások kidolgozására, ezért alkalmas a gyors és hatékony beavatkozásra a szén-dioxid-kibocsátás csökkentésének érdekében.

## 5.2. Magyarország alapanyag-ellátottsága a biometanol és e-metanol gyártásához

Oláh György Nobel-díjas kémikus úgy gondolta, ha Izlandon megoldható lett az, hogy metanolt gyártsanak, akkor Magyarország is rendelkezik a gyártáshoz szükséges környezeti adottságokkal. Elképzelése szerint az országban található palagázra lehet ezt alapozni, amely egy fosszilis forrás, így használata nem jár környezeti előnnyel (HVG 2013). A következőkben azt vizsgálom, hogy milyen alapanyagok szolgálják a megújuló metanol gyártását hazánkban.

### 5.2.1. Mezőgazdasági melléktermékek

Günther Fischer és munkatársai által 2010-ben publikált tanulmány alapján az európai országok közül Magyarország kiemelkedő potenciállal bír a biomassza hasznosítása terén (FISCHER et al. 2010). A maximálisan elérhető elméleti 2600-2700 PJ energiával szemben a hazai szakértők becslései széles határok között mozognak. A biomassza potenciál tekintetében a legmagasabb 328 PJ/év, a legalacsonyabb pedig 100 PJ/év érték, amit reálisan kihasználhatónak gondolnak (BÜKI 2009; GKM 2008; HAJDÚ 2006). A jelenlegi felhasználás óriási lemaradásban van az elméleti lehetőséghez képest, de a körkörös gazdaság alapelveit figyelembe véve a melléktermékek energetikai hasznosítását célszerű előnyben részesíteni. Melléktermék mindig keletkezik, aminek felhasználása környezetvédelmi, gazdasági és energetikai szempontból is fontos, továbbá az energiarendszer kialakítása során tárolhatósága és adagolhatósága miatt egy kiegyenlítő szerepet képes betölteni (DINYA 2018; MAGDA 2011b; POPP et al. 2021; SZENDREI et al. 2016).

SZALAY (2018) kutatása alapján az egyes még hasznosítható mezőgazdasági melléktermékek éves mennyiségét és kiemelkedő mennyiségi előfordulását a 14. táblázatban foglaltam össze.

14. táblázat: A metanolgyártásban potenciálisan felhasználható mezőgazdasági melléktermékek

Mezőgazdasági melléktermék	Éves mennyiség	Éves mennyiség energiatartalma	Kiemelkedő mennyiséggel rendelkező megyék
Apadék	700 000 tonna	7,7 PJ	Zala, Somogy, Pest, Szabolcs-Szatmár-Bereg, Bács-Kiskun
Tuskó	160 000 tonna	1,8 PJ	Somogy, Szabolcs-Szatmár-Bereg, Bács-Kiskun, Pest
Gyümölcsfa nyesedék	165 000 tonna	2,6 PJ	Szabolcs- Szatmár Bács-Kiskun, Pest
Szőlő venyige	57 000 tonna	1,0 PJ	Bács-Kiskun, Pest
Lágyszárú mezőgazdasági melléktermékek	nincs adat	140 PJ	Békés, Hajdú-Bihar, Szabolcs-Szatmár-Bereg

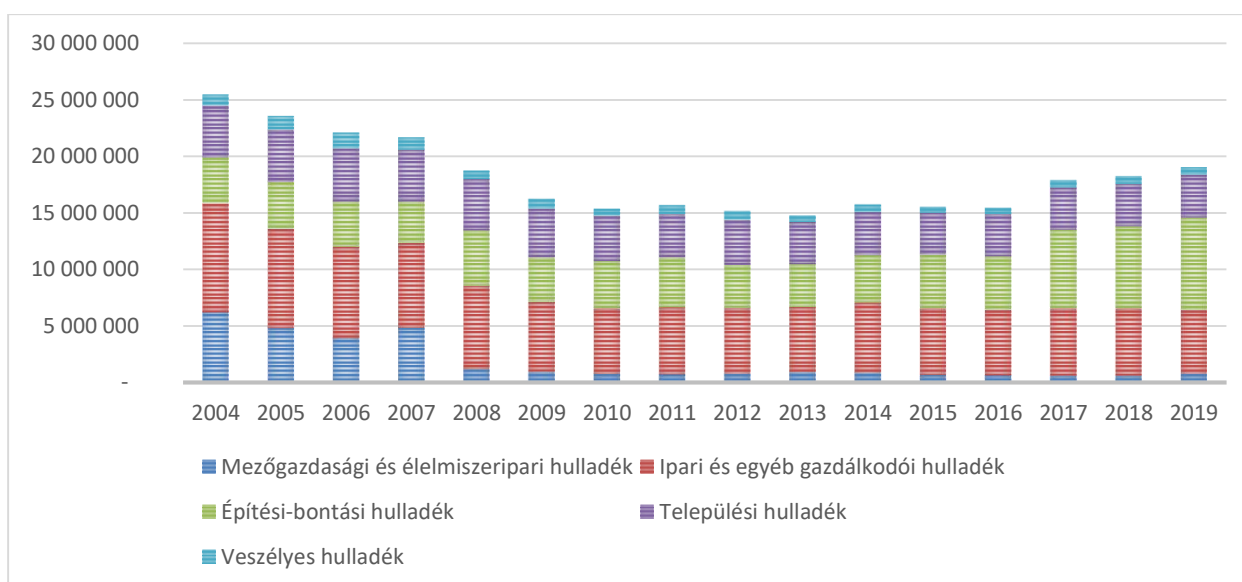
Forrás: Saját szerkesztés SZALAY (2018) alapján

Véleményem szerint célszerű lenne, ha a hazai biomassza energetikai hasznosítása nem állna meg az elégetésnél, hanem továbblépne egy következő technológiai szintre, azaz a keletkező gázokból megvalósulna a metanol szintézis. Így egy könnyen értékesíthető, a környezetet kevésbé terhelő üzemanyaghoz, illetve vegyipari alapanyaghoz jutunk.

## 5.2.2. Települési szilárd hulladék, depóniagáz, biogáz

### *Hulladéktermelés Magyarországon*

A termelés és fogyasztás folyamatát nagy mennyiségű hulladék keletkezése kíséri, melynek számos oka van, mint például a termékek korlátozott élettartama, az élelmiszerpazarlás, a környezettudatos gondolkodás hiánya. Magyarországon a hulladékot a keletkezés forrása alapján két csoportba soroljuk. A települési hulladék az elosztási, fogyasztási tevékenységből származik, míg az egyéb termelési hulladék a termelő- és a szolgáltatótevékenység során keletkezik. Hazánk hulladéktermelésének alakulását a 27. ábra mutatja:

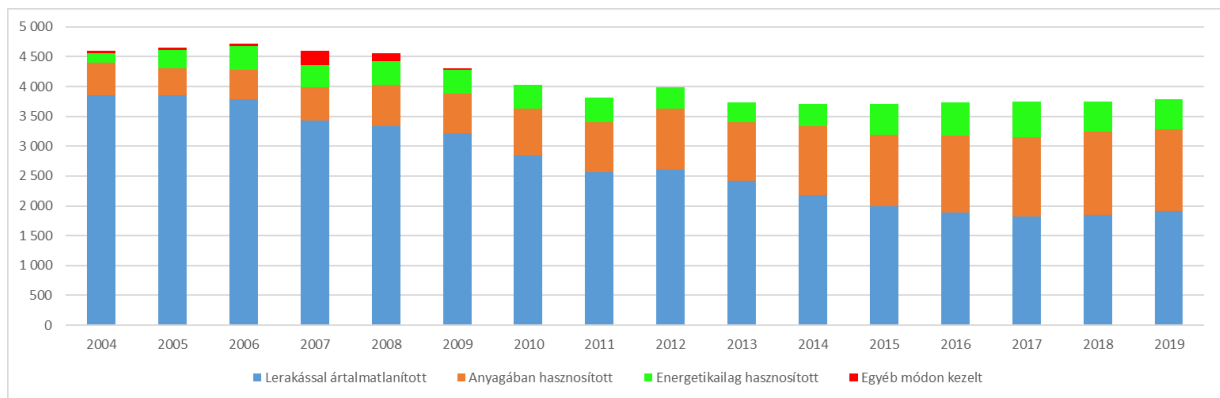


27. ábra: A keletkezett hulladék mennyisége hulladékaramonként 2004-2019 között (tonna/év)

Forrás: ITM, EGYSÉGES HULLADÉKGAZDÁLKODÁSI INFORMÁCIÓS RENDSZER

(2020)

2006 óta a települési hulladék mennyisége csökkenő trendet mutatott, 2013 óta pedig évi 3700- 3800 ezer tonna közötti az értéke. Sajnos jelenleg is a hulladék lerakása a legelterjedtebb kezelési eljárás annak ellenére, hogy 2004 óta a lerakás aránya folyamatosan és jelentősen csökkent, ami a 28. ábrán is megfigyelhető.



28. ábra: Az egyes hulladékfajták mennyisége a kezelés módja szerint (ezer tonna), 2004-2019

Forrás: KSH (2019a)

### **Biogáz, depóniagáz**

A hulladék lerakással történő ártalmatlanítása hazánkban évtizedekig a legelterjedtebb hulladékkezelési megoldásnak számított, különösen igaz ez a települési hulladék kezelésében. A hulladéklerakóban található anyag igen heterogén akár fizikai, akár kémiai összetételének tekintetében, s a lerakást követően különböző folyamatok játszódnak le, tömörödés, bomlás. A lerakott hulladékból tehát egy úgynevezett anaerob biodegradáció során depóniagáz képződik, amely a diffúzió útján a légkörbe kerül. A depóniagáz összetételét a 15. táblázat mutatja.

15. táblázat: Depóniagáz, biogázok, földgáz összetétele

Fő komponens	Depóniagáz	Mezőgazdasági eredetű biogáz	Szennyvíz-iszap eredetű biogáz	Északi-tengeri földgáz
<b>Metán</b> V/V%	45- 60	45	65	88,8
<b>Szén-dioxid</b> V/V%	33-55	40	35	2,3
<b>Hidrogén</b> V/V%	0-3	1,5	0-2	-
<b>C<sub>2+</sub> szénhidrogén</b> V/V%	–	–	–	8,3
<b>Nitrogén</b> V/V%	5- 15	15	0,2	1,1

Forrás: TAMÁS- BLASKÓ (2008); MOLNÁR (2016)

A depóniagáz értékes alapanyag és energiahordozó, jelentős arányban tartalmaz hasznosítható anyagokat, amelyek felhasználás nélkül a légkörbe kerülve jelentősen növelik az ÜHG-kibocsátást. A depóniagázban a metán koncentrációja a legmagasabb, aminek globális felmelegedési potenciálja

64-szerese a szén-dioxidénak. Magyarország depóniagáz kibocsátása 13 millió tonna CO<sub>2eq</sub>/évre becsülhető, ami az összes üvegházhatású gáz-kibocsátásnak 20 százalékáért felelős (HAJDÚ 2009). A környezeti előnyök és a jól hasznosítható anyagok ellenére a depóniagáz felhasználásunk töredéke a lehetőségeknek. A 16. táblázat mutatja, hogy az EU országai közül az összes biogáz-termelés tekintetében a 15. helyen állunk, amit nem indokol hazánk lakosság száma. A folyamatos magas hulladéklerakási arány mindenképpen a depóniagáz hasznosításának irányába mutat.

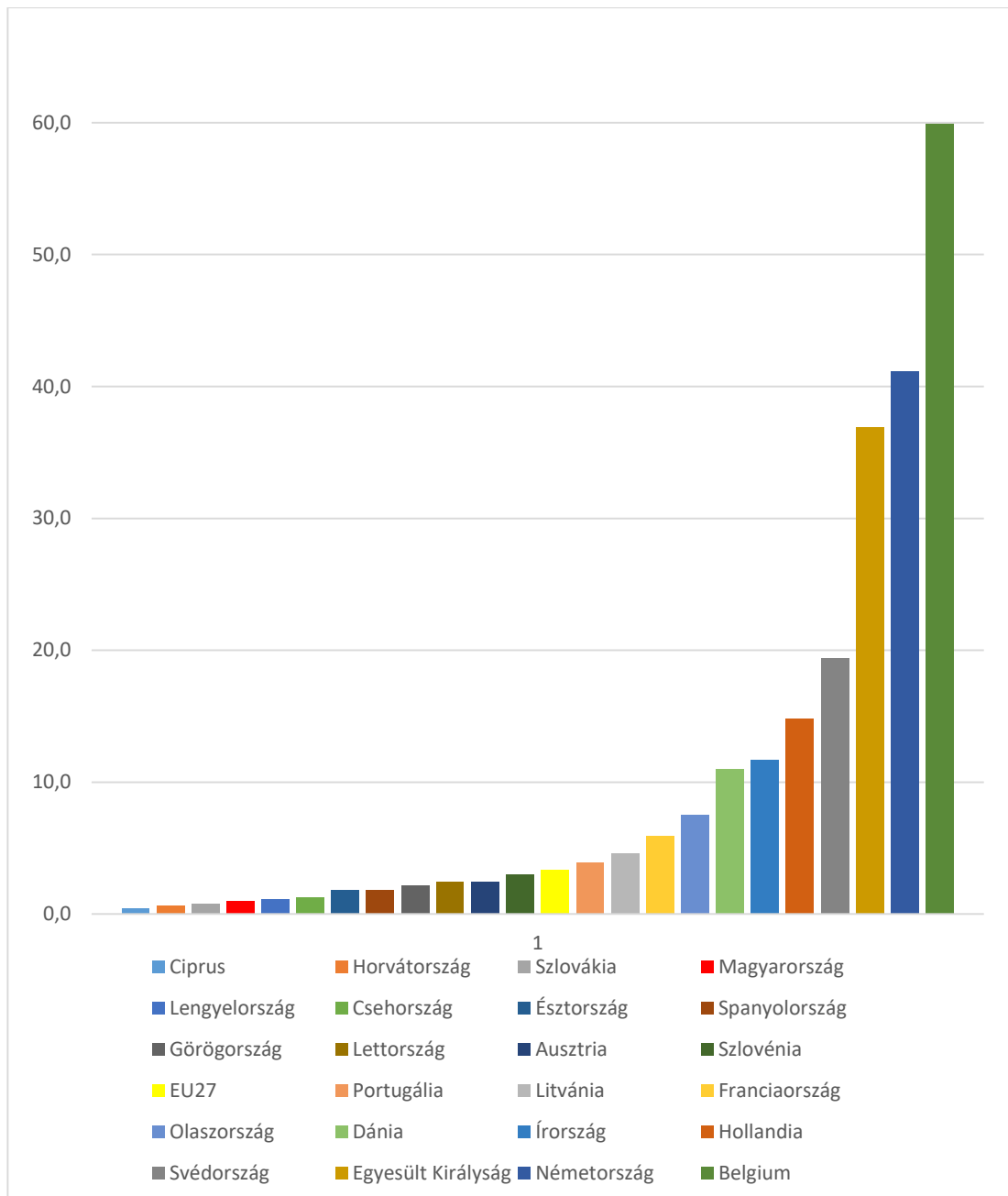
16. táblázat: Biogáz-előállítás egyes EU-tagállamokban 2018 (ktoe-ben)

Rangsor	Ország	Depóniagáz [ktoe]	Szennyvíziszap [ktoe]	Egyéb forrásból anaerob erjesztéssel [ktoe]	Összes biogáz termelés [ktoe]
1	Németország	115,8	492	6950,4	7558,3
2	Olaszország	333,5	51,7	1500,0	1892,2
3	Franciaország	298,9	36,7	543,9	879,5
4	Csehország	21,3	44,0	538,5	603,8
5	Dánia	4,0	23,9	291	319,1
10	Ausztria	1,9	25,0	200,1	227
12	Finnország	17,9	17,5	32,6	186,4
13	Szlovákia	6,8	13,3	128,7	148,8
15	Magyarország	12,7	28,5	50,8	92
	EU27 összesen	1229,8	1142,1	11252,7	13782,4

Forrás: EUROBSER'Er (2020)

2018-ban az EU tagállamok által termelt depóniagáz mennyiségének és a lerakásra került hulladék mennyiségének arányából skálázással származtatott mutatót képeztem oly módon, hogy a Magyarországra vonatkozó mutató értéke 1 legyen. Az egyes országokra számolt értékeket a 29. ábra szemlélteti. Az ábra a könnyebb áttekinthetőség miatt nem tartalmazza a Finnországra vonatkozó értéket, amely 119-nek adódott, továbbá a 0 értékkel rendelkező országokat, amelyek Románia, Bulgária, Málta és Luxemburg.





29. ábra: A termelt depóniagáz és a deponált települési hulladék mennyiségének aránya az EU országokban

Forrás: Saját készítés az EUROSTAT (2020a) és EUROBSER'ER (2020) adatai alapján

A számításaim azt mutatják, hogy Finnországban igen kiemelkedő a deponált hulladék felhasználása depóniagáz termelésre, közel kétszer nagyobb, mint a második legnagyobb értékkel bíró Belgiumé. Különösen figyelemre méltó teljesítmény, mivel Finnországban a települési hulladék 1%-a kerül lerakásra. A rangsor végén Románia, Bulgária, Málta és Luxemburg szerepel. Ezek az országok nem termelnek depóniagázt, így a mutató értéke 0, miközben Luxemburg kivételével magas a települési hulladék deponálási aránya: Málta 93%, Bulgária 92%, Románia

71%, Luxemburg 7%. Magyarország a 20. helyen található, messze elmaradva az EU27 átlagtól, miközben a települési hulladék 49%-a kerül lerakóba.

Jelenleg a depóniagáz kezelésére két módszer terjedt el: „elfáklyázással ártalmatlanítják” vagy energetikailag hasznosítják. Az energetikai hasznosítás lehet hő-, illetve villamos energiatermelés, de a hazai szabályozás mellett a villamos energiatermelés a gazdaságosabb. Az egységnyi térfogatból kinyerhető gáz mennyisége nem határozható meg pontosan a heterogén összetétel, a tömörödés és a folyamatok sokféle okán, de a gyakorlati tapasztalatok szerint a kinyerhető depóniagáz mennyisége 2–3 m<sup>3</sup>/t szemét/év, ami szén-dioxidra nézve legalább 0,7 – 1,65 m<sup>3</sup>/t szemét/év, ami tovább növelhető a metán energetikai hasznosítása során képződő szén-dioxiddal. A depóniagáz kinyerése a hulladéklerakó lezárása után akár 15-20 évig is folytatható, hosszú távon viszont hulladékkezelési technológiák közül a hulladéklerakás egyre kisebb szelete fog képviselni (MARCSÓ s.a.). Finnország, Belgium, Németország példája azt mutatja, hogy pazarlás a hulladéklerakóban található anyagok felhasználásának mellőzése. Az adatok elemzése alapján úgy gondolom, hogy Magyarország jelentős potenciállal bír a hulladékhasznosítás fejlesztése terén, amelynek fenntartható alternatívája a hulladékból történő metanolgyártás.

A biomasszából előállítható biogáz mennyiségére több becslés is található az irodalomban. A Miskolci Egyetem REDUBAR elnevezésű pályázatának eredményét a 17. táblázat szemlélteti. Elméletileg a biomassza potenciált magas fokon kihasználva, az éves földgázfogyasztás 50%-a helyettesíthető biogázzal.

17. táblázat: Magyarország elméleti teoretikus, biogáz előállítására alkalmas biomassza potenciálja 2006-ra vonatkoztatva

<b>A biomassza forrás típusa</b>	<b>Fűtőérték átlagosan PJ</b>
Növénytermesztési melléktermékek	131,32
Erdészeti melléktermékek (termokémiai kigázosításhoz)	39,22
Állattenyésztési melléktermékek	3,72
Szennyvíziszap	5,91
Szerves ipari hulladékok	0,42
Kommunális szilárd hulladékok	42,25
Összesen	222,84
39 MJ/m <sup>3</sup> felső hőértékű földgáz egyenértékben kifejezve	5 714 millió m <sup>3</sup>

Forrás: SZUNYOG (2008)

LOVAS ed. (2010) szerint a biogáz termelésének elméleti potenciálja állati eredetű hulladékokból 1,6 Mrd m<sup>3</sup>/év, azaz 1,1 Mrd m<sup>3</sup>/év földgázegyenérték, települési hulladékokból 0,7 Mrd m<sup>3</sup>/év,

azaz 0,5 Mrd m<sup>3</sup>/év földgázegyenérték, összesen 1600 millió m<sup>3</sup>/év földgáz helyettesíthető, amely az éves földgázfogyasztás több, mint 10%-nak helyettesítésére alkalmas.

Metanol gyártásra a depóniagáz és a biogáz két komponense is alkalmas: a metán és a szén-dioxid. A metán az energiahasznosítás gyakorlatilag egyetlen szereplője a biogáz komponensek közül, ezért a jelenlegi hazai biogáztermelés volumene mellett nincs realitása a metanoltermelésben való felhasználásának. A szén-dioxid viszont úgyszólván szennyező anyag szerepét tölti be az energiatermelési útvonal esetében, de a metanoltermelési útvonal esetében jó alapanyag. A biogázban a szén-dioxid 33- 55 V/V % -ban található meg, míg vas- és acélgyártásnál ez az érték 20-30%, így véleményem szerint a viszonylag magas szén-dioxid-koncentrációjú biogáz kedvező alapanyaga a metanolgyártásnak.

### 5.2.3. Szén-dioxid-pontforrások

A szén-dioxid-emisszió jellege szerint megkülönböztetünk vonali kibocsátást, mint például a szállítási és közlekedési kibocsátás, és pontszerű kibocsátást, amely az áram- és hőtermeléshez, ipari tevékenységhez kapcsolódik, illetve a lakossági energiafelhasználáshoz. A megújuló metanol üzemek létesítése szempontjából az erőművi és az ipari (elsősorban nehézipari) üzemek CO<sub>2</sub> kibocsátása a mértékadó.

Az ETL technológia (Emissions-to-Liquids Technology) alkalmazása segít a különböző iparágakban hulladékként keletkező szén-dioxid hasznosításában. A folyamatban az ipari forrásból származó szén-dioxidot hidrogénnel reagáltatják, amely döntő mértékben a víz elektrolíziséből származik. A technológia működését bizonyítja a Carbon Recycling International Izlandon található, Oláh György nevét viselő üzeme, amely 2015 óta évente több, mint 5 millió liter metanol gyártására képes, s közben 5,5 ezer tonna szén-dioxidot hasznosít. A Carbon Recycling International cég üzemében a geotermikus erőművek által kibocsájtott szén-dioxidot összegyűjti, majd az adott erőműben generált elektromossággal a víz elektrolíziséből keletkező H<sub>2</sub> és az összegyűjtött CO<sub>2</sub> felhasználásával metanolt termel. A CRI az első olyan vállalat a világon, amely kereskedelmi szinten képes megújuló üzemanyagot termelni (metanol) a kibocsátott szén-dioxidból.

A 18. táblázatban összefoglaltam a CCS, CCU folyamatok szempontjából legfontosabb források szén-dioxid tartalmát. A legnagyobb ipari CO<sub>2</sub>-kibocsátó a cementipar és a vas- és acélipar, mivel egyrészt technológiájuk igen energiaigényes (széntartalmú tüzelőanyag felhasználása), másrészt szén a szükséges redukálószer, illetve a gyártási folyamatokban szén-dioxid képződik. A felszabaduló CO<sub>2</sub> „befogását”, kezelését, felhasználását megkönnyíti, hogy lokálisan jelenik meg, pontforrásnak tekinthető.

18. táblázat: A különböző füstgázok szén-dioxid tartalma

A szén-dioxid forrása	Szén-dioxid-tartalom a füstgázban %
Gázturbinás erőmű	3-10
Szénerőmű	12-15
Cementgyártás	14-33
Vas- és acélgyártás	20-30
Biomassza	3-8
Bioetanol	közel 100
Karbamid	közel 100

Forrás: Saját készítés KOYTSOUMPA et al. (2018) alapján

### ***Bioetanol gyártásának mellékterméke***

Magyarországon több cég foglalkozik bioetanol termelésével. A Győri Szeszgyár és Finomító Zrt. gyártókapacitása évi 60 millió liter víztelenszesz és 40 millió liter finomszesz (GYŐRI SZESZGYÁR ÉS FINOMÍTÓ ZRT. s. a.). A gyártás legfontosabb alapanyaga a melasz, de van gabonafeldolgozó kapacitása is. A Hungrana Keményítő- és Izocukorgyártó és Forgalmazó Kft. Szabadegyházán jelentős alkoholelőállító kapacitással rendelkezik. E85-ös üzemanyagot is gyártott, de a kedvezőtlen jövedéki adó változtatások miatt megszűnt a termelés. 2012-ben kezdte meg termelését a bioetanol gyártására alakult Pannónia Ethanol Zrt. (2018-tól Pannónia Bio Zrt.) Dunaföldváron. Évi mintegy 450 millió liter etanolt állít elő, Közép-Európa legnagyobb etanol üzeme. Jelenleg Magyarország az etanol üzemanyaggyártás mennyiségében világviszonylatban a 10. helyen áll (2019. évi adatok alapján), az európai országok közül csak Franciaország és Németország állít elő nagyobb mennyiségű etanolt. Magyarország 2019. évi etanol üzemanyag termelése 571 millió liter (KNOEMA 2020; SZLOVÁK- TÓTH 2018). Az etanolgyártás folyamán az etanol mellett ugyanakkora anyagmennyiségű szén-dioxid is képződik:



Tulajdonképpen a fenti folyamat egy közel tiszta szén-dioxidot tartalmazó gázt eredményez, melyet a metanolgyártásra lehet felhasználni.

A hazai etanol-előállítás több mint 78%-ban a Pannónia Bio Zrt.-től származik. Az üzem eredményei szerint évente az erjesztési folyamatban 467 424 tonna szén-dioxid képződik. Az erjesztés melléktermékét, a nedves rostot biogáz üzembe szállítják, amelyben évente 37 520 tonna biogáz keletkezik (PANNONIA BIO ZRT. s. a.). A biogáz 30-50%-a szén-dioxid, tehát az üzem több mint 480 000 tonna szén-dioxidot bocsát ki.

A 19. táblázatban összefoglalt nagyobb kapacitású, további bioetanol projektek termelésének elindulása esetén további évi 150 000 tonna tiszta szén-dioxid-forrás áll rendelkezésre.

19. táblázat: Tervezett bioetanol üzemek

Bioetanol üzem	Tervezett éves etanol termelés	Várható éves szén-dioxid-kibocsátás
Visontai Bioetanol Fejlesztő Kft.	50 000 m <sup>3</sup> /év	~50 000 tonna/ év
HBT Helvéciai Bioüzemanyag Termelő és Kereskedő Kft.	100 000 m <sup>3</sup> /év	~100 000 tonna/ év

Forrás: Saját szerkesztés a BORSOD-ABAÚJ-ZEMPLEN MEGYEI KORMÁNYHIVATAL (2016); NAPI GAZDASÁG (2013) alapján

A bioetanol- és biometanol-gyártás összekapcsolásának gondolata nem újkeletű. Brazília a világ első számú bioetanol exportőre, 2019-ben a második az előállított etanol mennyiségét tekintve. A bioetanol gyártása cukornád alapon történik, s szinte kizárólag első generációs bioüzemanyag technológiát alkalmaznak, amely során nagy mennyiségű hulladék képződik. Vizsgálták a kipréselt cukornádból kiinduló biometanolgyártás lehetőségeit, s környezeti terheit kétféle technológiai útvonal esetén: egyik esetben a metanol üzemet egy etanol üzemhez kapcsolták (kogenerációs rendszer), a másik esetben fosszilis forrásokat használtak az energiaigény fedezésére. Megállapították, hogy a kapcsolt energiatermelési rendszer bevezetése a bioüzemanyagok termelésében növeli a fenntartható fejlődés céljainak való megfelelést, csökkenti a fosszilis energiaigényt. A kogenerációs rendszer metanol termelési útvonala kedvezőbb, kisebb mértékű a negatív környezeti hatás, s közben hozzájárul a brazil bioüzemanyag-termelés diverzifikálásához (RENO et al. 2009).

### ***Erőművi, hőerőművi ipari szén-dioxid-kibocsátás***

Magyarország legnagyobb szén-dioxid kibocsátó forrásai a villamoserőművek, a távfűtő erőművek, valamint a nagyobb ipari egységek, amelyek egyúttal a legmagasabb megtakarítási potenciált képviselik. A szén-dioxid-pontforrásként tekinthető, az Európai Szennyezőanyag-kibocsátási rendszerben megjelenő legnagyobb magyarországi hőerőművek, erőművek, ipari egységek kibocsátási adatait a 20.–21. táblázatban foglaltam össze.

20. táblázat: Hőerőművek, erőművek által kibocsátott szén-dioxid mennyisége 2017-ben

<b>Erőmű</b>	<b>Település</b>	<b>Éves szén-dioxid-kibocsátás, (tonna)</b>
<b>Mátrai Erőmű Zrt.</b>	Visonta	5 770 000
<b>Uniper Hungary Kft.</b>	Gönyű	750 000
<b>TÉR-SZERKEZET Kft.</b>	Százhalombatta	617 000
<b>Pannon Hőerőmű Zrt.</b>	Pécs	381 000
<b>Bakonyi Erőmű Zrt.</b>	Ajka	336 000
<b>Bakonyi Bioenergia Kft.</b>	Ajka	330 000
<b>Alpiq Csepel Kft.</b>	Budapest 21. kerület	320 000
<b>Budapesti Erőmű Zrt.</b>	Budapest 4. kerület	286 000
<b>Bc-Erőmű Kft.</b>	Kazincbarcika	286 000
<b>Budapesti Erőmű Zrt.</b>	Budapest 11. kerület	281 000
<b>Budapesti Erőmű Zrt.</b>	Budapest 18. kerület	228 000
<b>DBM Dél-nyírségi Bioenergia Művek Zrt.</b>	Szakoly	183 000
<b>Sinergy Kft.</b>	Tiszaújváros	170 000
<b>MVM Észak-Budai Kogenerációs Fűtőerőmű Kft.</b>	Budapest 3. kerület	152 000
<b>ISD POWER Kft.</b>	Dunaújváros	151 000
<b>Tatabánya Erőmű Kft.</b>	Tatbánya	105 000
<b>Veolia Energia Magyarország Zrt.</b>	Debrecen	101 000
<b>Összesen</b>		10 447 000

Forrás: Saját szerkesztés EURÓPAI SZENNYEZŐANYAG-KIBOCSÁTÁSI ÉS -SZÁLLÍTÁSI NYILVÁNTARTÁS (2017) alapján

21. táblázat: Cementgyárak és mészüzemek által kibocsátott szén-dioxid mennyisége 2017-ben

<b>Üzem</b>	<b>Település</b>	<b>Éves szén-dioxid-kibocsátás, (tonna)</b>
<b>Duna-Dráva Cement Kft.</b>	Vác	460 000
<b>LAFARGE Cement Magyarország Kft.</b>	Királyegyháza	396 000
<b>Duna-Dráva Cement Kft.</b>	Beremend	363 000
<b>Carmeuse Hungária Kft.</b>	Beremend	131 000
<b>Összesen</b>		1 350 000

Forrás: Saját szerkesztés EURÓPAI SZENNYEZŐANYAG-KIBOCSÁTÁSI ÉS -SZÁLLÍTÁSI NYILVÁNTARTÁS (2017) alapján

#### 5.2.4. A megújuló hidrogén

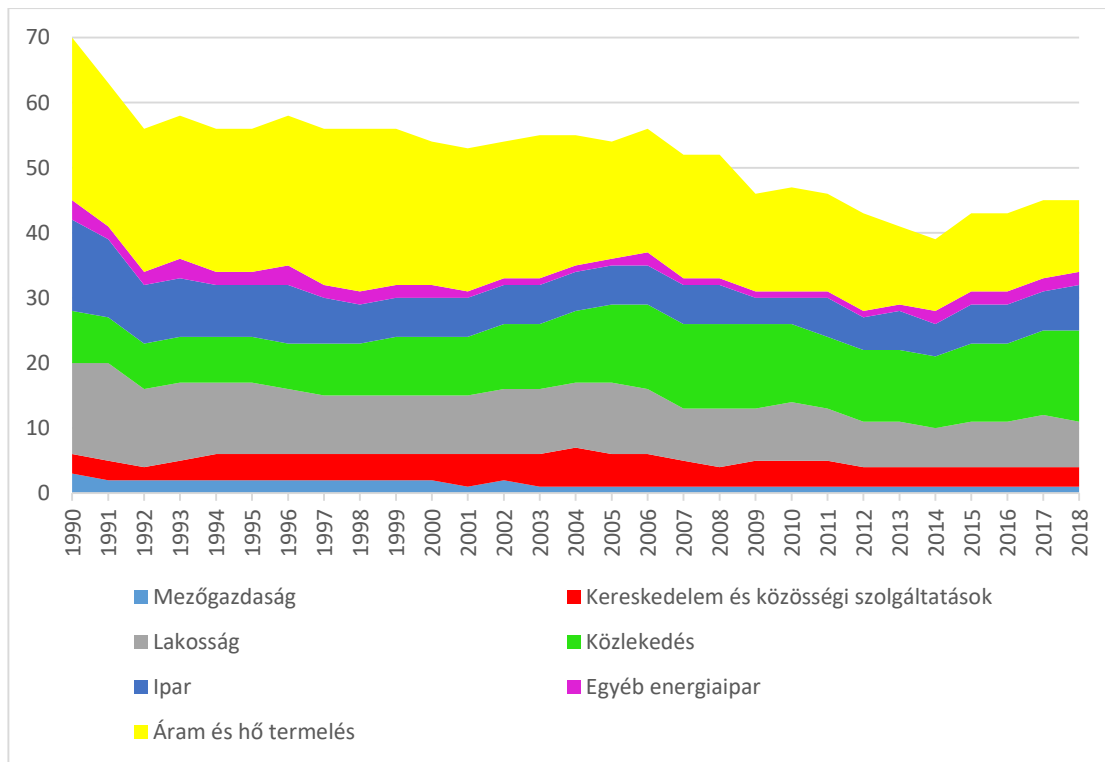
A hidrogén előállítása jelenleg jellemzően petrokémiai folyamatban történik, de megújuló metanolgyártáshoz szükséges hidrogént nem lehet fosszilis tüzelőanyagok felhasználásával előállítani, továbbá nem lehetséges az előállítás energiaigényét ezen anyagok alkalmazásával fedezni. Globálisan a megújuló energiák felhasználása egyre jelentősebb, ezen energiák segítségével állítják elő a megújuló hidrogént víz elektrolízise során. A víz elektrolízisének kívül csupán a klór előállításának melléktermékeként képződő hidrogén lehet a megújuló metanolgyártás alapanyaga. Ez az útvonal még kevésbé gyakori, mert a hidrogén visszanyerése a klórt gyártó üzemek esetén további befektetést igényel annak ellenére, hogy a klór a második legfontosabb vegyipari alapanyag, ezért biztos forrása lehet a hidrogénnek (HOU et al, 2018).

Magyarországon a megújuló hidrogén előállításának nem az alapanyag, azaz a víz előfordulása a korlátja, hanem azt szükséges megvizsgálni, hogy rendelkezésre áll-e az előállítási folyamathoz szükséges villamos energia.

#### 5.3. Az energiaszükséglet fedezése

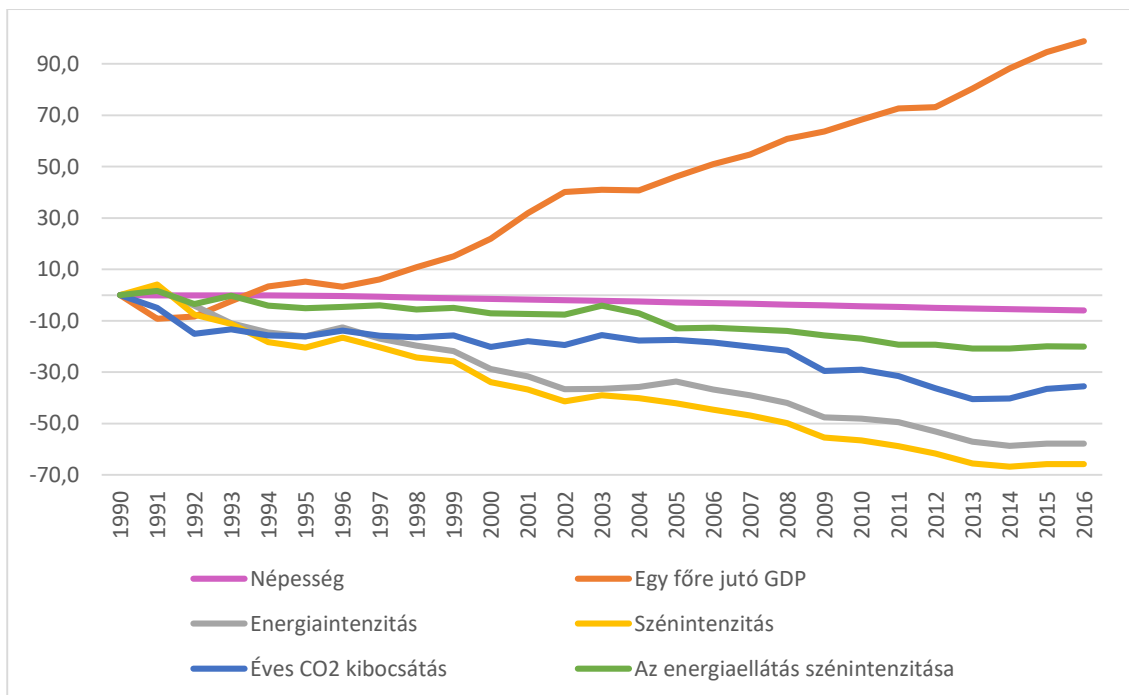
Az LCA vizsgálatok egyértelműen bizonyították, hogy a metanol előállítása során felhasznált energiaforrás szén-dioxid-kibocsátása határozza meg, hogy az előállított metanol alkalmazása előnyös-e a globális felmelegedésre gyakorolt hatások tekintetében.

Magyarország éves szén-dioxid-kibocsátása az 1990-es évtől vizsgálva csökkenő tendenciát mutat. A 30. ábra részletezi az egyes ágazatokhoz tartozó kibocsátásokat, amely szerint a legnagyobb csökkenés a hő- és áramtermelésben bekövetkezett változásoknak köszönhető, s kisebb mértékben az ipari folyamatoknak. A közlekedés általi kibocsátás viszont jelentős növekedést mutat, ez a terület beavatkozást igényel a klímacélok elérésének érdekében.



30. ábra: A magyarországi szén-dioxid-kibocsátás szektoronként 1990-2018 között  
 Forrás: Saját szerkesztés IEA (2019) alapján

A teljes szén-dioxid-kibocsátás „Kaya Identity” szerinti meghatározó tényezőit a 31. ábra szemlélteti. Látható, hogy az életszínvonal (egy főre jutó GDP) dinamikus növekedését ellensúlyozni tudta az energaintenzitás és az energiaellátás szénintenzitásának csökkenése.

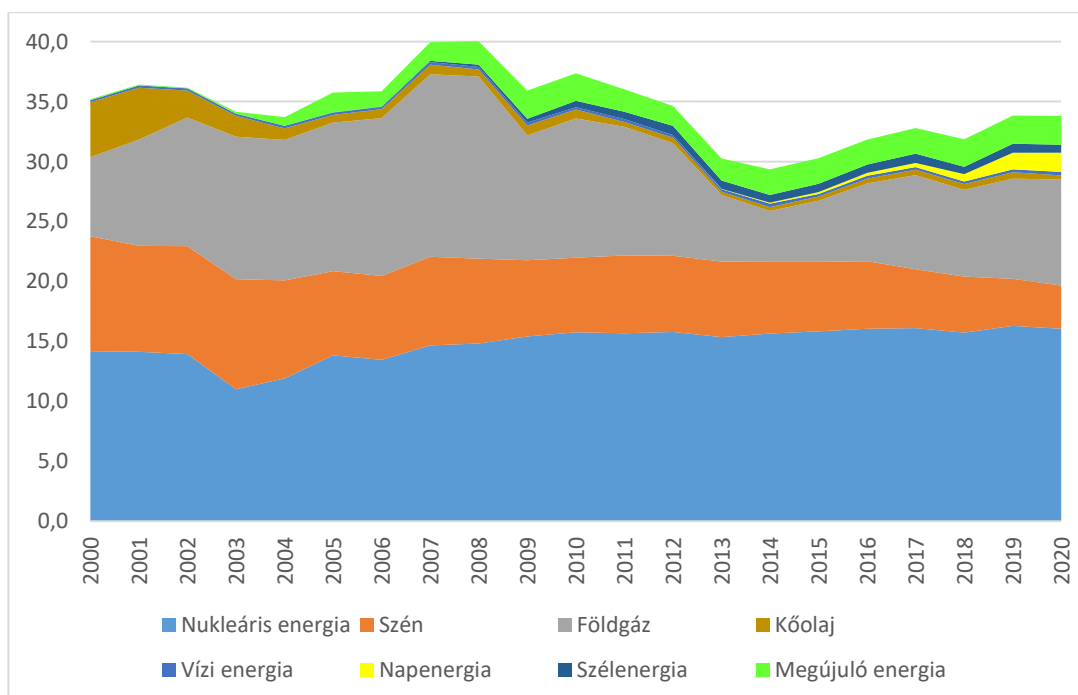


31. ábra: A magyarországi szén-dioxid-kibocsátást meghatározó tényezők 1990-2016 között  
 Forrás: Saját szerkesztés IEA (2019) alapján



STENBERG és munkatársai (2017) vizsgálták a metanol és a metán szén-dioxidból kiinduló és fosszilis forrásokból kiinduló gyártásának a globális felmelegedésre gyakorolt hatását. Megállapították, hogy az EU-27 elektromos áram mix (2020) használata a gyártási folyamatban nem jelent környezeti előnyt. Külön-külön vizsgálva az egyes európai országokat vannak olyanok, amelyek esetében csökken a globális felmelegedésre gyakorolt hatás a szén-dioxidból kiinduló gyártás során, abban az esetben, ha a hidrogén alapanyag előállításához alacsony szénintenzitású elektromos áramot használnak. Franciaország és Belgium esetén az atomenergia, Norvégia és Izland esetén a megújuló energiák, míg Svédország és Svájc esetén a megújulók és az atomenergia együttes felhasználása eredményezi, illetve eredményezheti a környezetbarát gyártási módot.

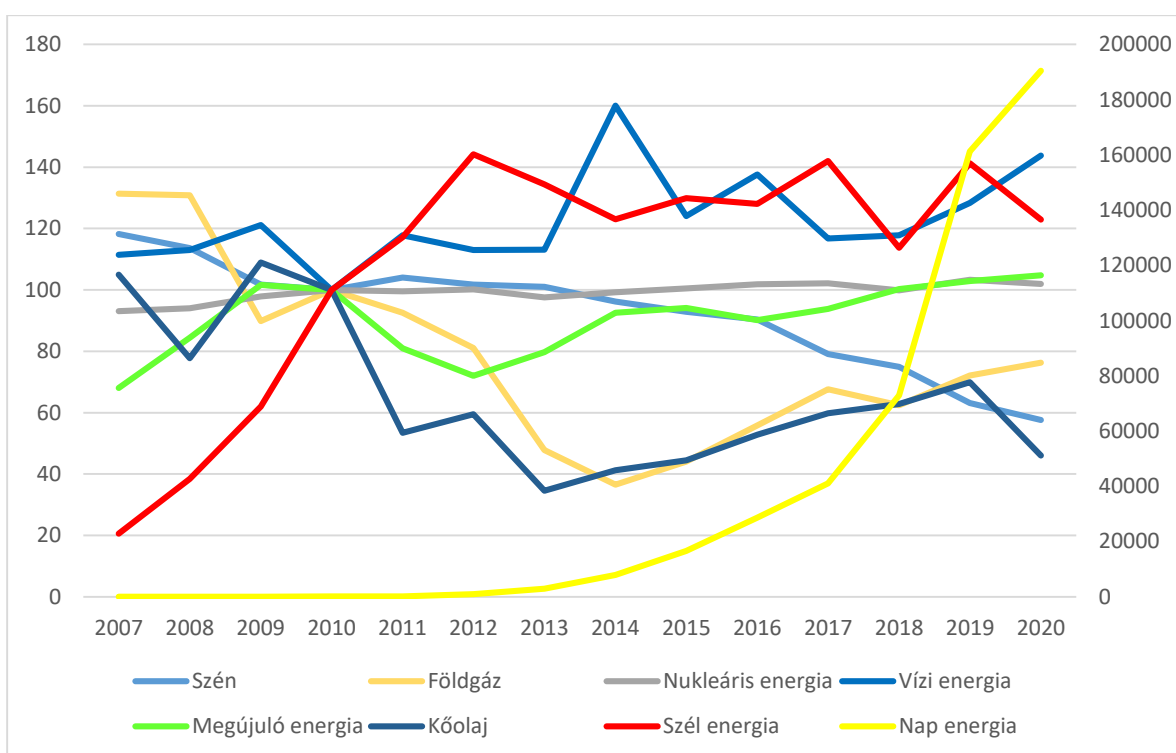
Az EU-ban 2018-ban az elektromos áram 32%-a, 2019-ben 34%-a származott megújuló forrásból, de a tagállamok között nagyon jelentős eltérés mutatkozik. Ausztriában és Svédországban 70% fölött van a megújulók aránya, míg a rangsor alsó részén Málta helyezkedik el 8%-os aránnyal, valamint Ciprus, Luxemburg és Magyarország 10%-os aránnyal (EUROSTAT 2020b). Magyarország elektromos áram termelésének alakulását forrás szerinti bontásban a 32. ábra mutatja. Az elmúlt két évtizedben a szénalapú áramtermelés mértéke jelentősen csökkent, míg a nukleáris és a megújuló energiáké növekedett. 2019-ben a nukleáris és a megújuló energiák összesen 62%-ban részesedtek a villamos energiatermelésből, 2020-ban 63%-ban (EMBER 2020).



32. ábra: A magyar áramtermelés forrás szerinti bontásban, 2000-2020

Forrás: OUR WORLD IN DATA (2020)

Stenberg és munkatársai által említett országok energia mixében a fosszilis források aránya alacsony. Izland 100%-ban megújuló forrásokra támaszkodik a villamos energiatermelésben, Svájc 1%-ban. Norvégia kevesebb, mint 2%-ban, Svédország 2%-ban használ fosszilis forrást, míg Franciaország kevesebb, mint 10%-ban, Belgium 34,5%-ban (EMBER 2020). Ez utóbbi 2 ország potenciálisan képes lehet a környezeti előnyökkel járó metanol termelésére. Magyarország jelenlegi 38%-os fosszilis forrás aránya és a belgiumi érték között nincs szakadék, így azt a következtetést vonom le, hogy potenciálisan Magyarországon is megteremthető a megújuló metanol gyártása. Ezt támogatja, hogy az EU országokhoz hasonlóan a magyarországi áramtermelésben is a napenergia a leggyorsabban növekvő forrás. 2012-ben még kevesebb, mint 0,001 TWh energiát szolgáltatott, ez az érték 2020-ban 1,625 TWh volt. A dinamikus változást a 33. ábra szemlélteti.

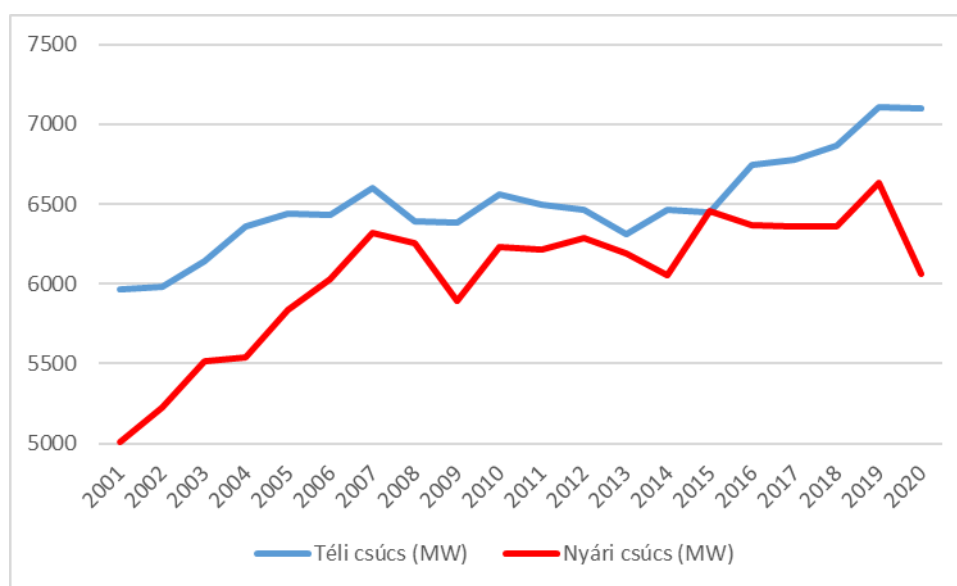


33. ábra: A magyar áramtermelés relatív változása forrás szerinti bontásban, 2000-2020

Forrás: OUR WORLD IN DATA (2020)

Az erőművek teljesítőképessége valamennyi mérettartományban folyamatosan növekszik. Az 50 kW feletti naperőművek esetén a 2015-ös 25 MW értékről 2020-ban 1200 MW feletti értékre változott a kapacitás, ami 5 év alatt mintegy 50-szeres növekedést mutat, míg a háztartási méretű erőművek esetén a kapacitás a 2015-ös 128 MW-ról 2020-ban 640 MW-ra növekedett, ami öt év alatt ötszörös növekedést jelentett. A NEMZETI ENERGIASZTRATÉGIA 2030 (2012) egyik kiemelt célja, hogy 2030-ra a hazai áramtermelés kilencven százaléka szén-dioxid-mentes legyen, s a klímavédelmi akcióterv alapján a naperőművi kapacitásnak több mint a háromszorosára kell nőnie 10 év alatt (MEKH, 2021). A becslések alapján számított hazai fotovillamos potenciál 1749 PJ/év

(486 mrd kWh), ami azt jelenti, hogy az ország éves villamosenergia-fogyasztásának több mint 12-szerese fedezhető napenergia felhasználásával (FARKAS, 2010). A megújuló források, ezen belül az időjárásfüggő megújulók egyre szélesebb körű felhasználása az áramtermelés rugalmasságának problémáját is felerősíti. A 34. ábra mutatja a téli és nyári időszakban fellépő energiaigényben megmutatkozó különbségeket. A téli csúcsok jóval magasabb fogyasztást jeleznek, mint a nyári csúcsok, viszont a napenergia termelését télen kisebb hatékonyság jellemzi, mint a nyári időszakét. A napi termelési és fogyasztási csúcsok is eltérő időpontban vannak, jelenleg is vannak olyan negyedórás időintervallumok, amikor a villamos energiatermelés meghaladja a fogyasztást.



34. ábra: Téli és nyári bruttó rendszerterhelési csúcsok alakulása

Forrás: Saját szerkesztés MAVIR adatai alapján

A megújuló termelés szabályozhatóságának fokozására szolgál az energiátárolók alkalmazása, de pozitívan hat a piaci árak stabilitására is. Az európai innovatív megújuló energia aukcióknál már bevonják az energiátároló technológiákat is. Magyarországon 2021 május elején jelent meg pályázat a karbonmentes, villamosenergia-többlet innovatív tárolását elősegítő fejlesztések megvalósítására (ITM 2021).

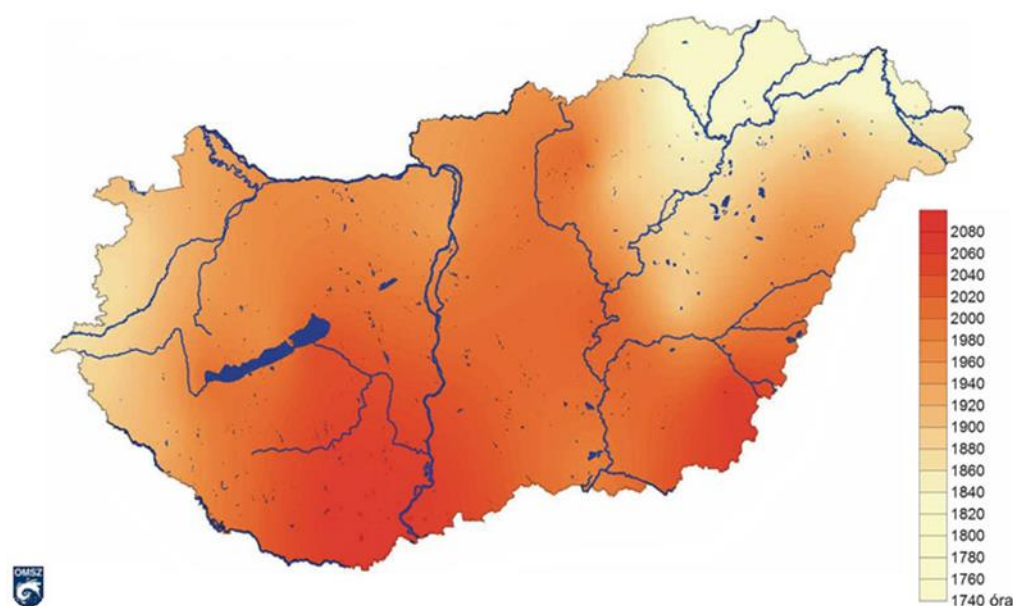
Magyarország villamos energia mixének változása, az energiatermelés dekarbonizálására való törekvés, amely az atomenergia és a megújuló energia együttes alkalmazására épül, lehetővé teszi, hogy a magyarországi metanolgyártás globális felmelegedésre gyakorolt hatása alacsonyabb legyen, mint a jelenlegi, jellemzően fosszilis forrásokat alkalmazó technológiák. A versenyképes hazai szabályozható erőművi kapacitás zsugorodása, a megújuló termelők térnyerése miatt a szabályozási igény jelentősen emelkedik, amely kihívásra megoldást kínál a metanol mint energiátároló. A várakozások szerint megújuló energiaforrásokra alapuló nagyerőmű nem fog épülni hazánkban

2034-ig, de szükség van egy nagy teljesítőképességű energiatároló rendszer kiépítésére (MAVIR 2019).

## 5.4. Biometanol, e-metanol üzem optimális helyének kiválasztása

### 5.4.1. Fotovoltatikus erőművek elhelyezkedése

Magyarországon az éves napsugárzás átlagos értéke  $1250 \text{ kWh/m}^2$ , ez azt jelenti, hogy hazánk területére évente átlagosan  $1,163 \times 10^{14}$  kWh energia érkezik a Napból. 10% hatásfokú napelemek telepítése esetén évi több mint 486 milliárd kWh villamos energia termelhető, amely több mint tízszerese a jelenlegi fogyasztásnak (PÁLFY, 2017).



35. ábra: Az évi átlagos napfénytartam (óra) Magyarországon az 1971-2000 közötti időszak alapján

Forrás: ORSZÁGOS METEOROLÓGIAI SZOLGÁLAT (2000)

A 35. ábra mutatja, hogy Magyarországon a legtöbb besugárzás a Tiszántúl déli területein tapasztalható, Szeged környékén ez eléri a  $4800\text{-}4900 \text{ MJ/m}^2$  értéket is. Emellett a globál sugárzás nagy területeken meghaladja a  $4500 \text{ MJ/m}^2$ -t. Legkevesebb besugárzásban az Északi-középhegység térsége részesül, itt helyenként  $4300 \text{ MJ/m}^2$  alatti globál sugárzás összegek is előfordulnak. A középhegységek térsége viszont a téli időszakban másfélszerannyi napsütésben részesül, mint az alföldi területek, mivel a felhők közül gyakran kiemelkednek. A hazai jelenlegi legnagyobb naperőműveket a 22. táblázat foglalja össze.

22. táblázat: A legnagyobb magyarországi fotovoltatikus erőművek

Fotovoltatikus erőmű elhelyezkedése	Fotovoltatikus erőmű teljesítménye (megawatt)
Kaposvár	100
Kaba	43
Kapuvár	25
Paks	20,6
Bükkábrány	20
Halmajugra	20
Felsőzsolca	20
Mátraverebély	20
Százhalombatta	17,6
Szügy	16,5
Visonta	16
Pellérd	12
Pécs	10

Forrás: Saját szerkesztés

A naperőmű „forradalmat” jól szemlélteti, hogy 2020 februárjában a kapuvári erőmű volt az ország legnagyobb naperőműve, 2020 októberében kezdte a termelést a kabai erőmű és 2021 májusában a kaposvári erőmű, amely egyben jelenleg Közép-Európa legnagyobb naperőműve. A naperőművek építése folyamatos, egy több mint 60 MW beépített teljesítménnyel rendelkező napelempark építése kezdődött Tázlárán (Bács-Kiskun megye), mely 2022 elején már kereskedelmi tevékenységet végez (4D ENERGETIKA KFT.). A megvalósuló fejlesztések közül az egyik legnagyobb a NES Energy Zrt. által képviselt projekt keretében összesen 400 megawatt teljesítményű fotovoltatikus erőművek építése az ország északi részén. A legnagyobb egységek Sajószögeden (150 megawatt), Sajóivánkán (100 megawatt), Miskolcon (75 megawatt) létesülnek (NES ENERGY ZRT 2021).

Az adatok azt tükrözik, hogy a napelemek elhelyezésének és alkalmazásának a villamos energia termelésében az ország bármely területen nagy lehetősége van, csupán Csongrád megyében mutat kiemelkedő értéket az egy négyzetméterre eső átlagos felhasználható napenergia mértéke. A lehetőségeket rövid időn belül megvalósult projektté lehet konvertálni, amint a kabai erőmű példája mutatja, hiszen 5 hónap időtartam elegendő volt egy nagyobb méretű naperőmű felépítésére. A metanolgyártó üzem földrajzi helyzetét nem a fotovoltatikus erőmű földrajzi helye fogja meghatározni.

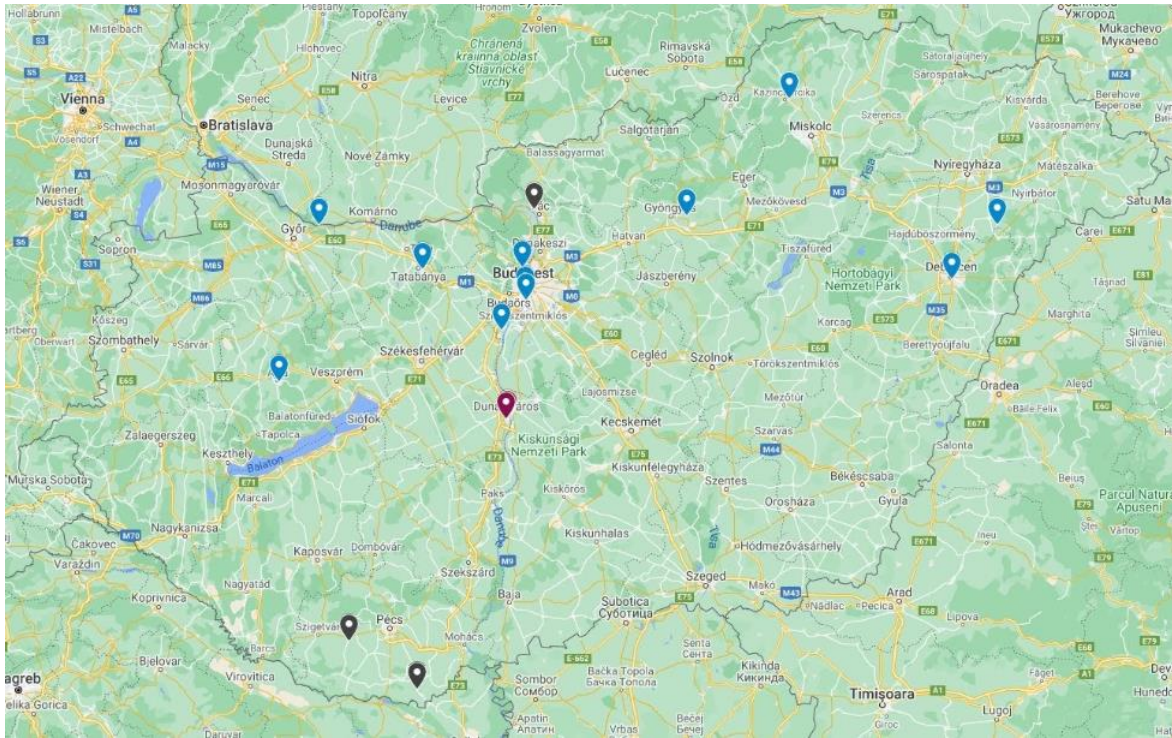
#### 5.4.2. Szén-dioxid-pontforrásokra alapozott metanol üzemek lehetséges helyszínei

A metanol üzem működéséhez szükséges nagy mennyiségű szén-dioxid szállítására a hazai viszonyok között egyetlen mód a csővezetékes szállítás. A CO<sub>2</sub> leválasztásának, befogásának helyén a gáz sűrítésére alkalmas kompresszorokat alkalmaznak. A szén-dioxid szállítása szuperkritikus állapotban történik, ezért a megfelelő nyomás és a megfelelő hőmérséklet beállítása követelmény. A szállítás során egy-egy kompresszorállomás között átlagosan 160 km távolság lehet (TIHANYI-CSETE 2012). A csővezetékes szállítás jelentős befektetést igényel, és folyamatos költségvonzata van, ezért célszerű az üzemet a pontforrások közelébe telepíteni. Az e-metanol előállítására szolgáló meglévő vagy tervezett üzemek kapacitása globálisan 1000 tonna/év és 200 000 tonna/év között található, amely 1441 tonna és 288 200 tonna/év közötti szén-dioxid-szükségletet jelent, tehát igen tág határok között van/lehet a metanol üzemek mérete.

A területi elhelyezkedést vizsgálva a következő nagy szén-dioxid-forrásokat azonosítottam:

1. Kiemelkedően a legnagyobb éves szén-dioxid-kibocsátással a Mátrai Erőmű Zrt. rendelkezik. Ez azt jelenti, hogy a 2017. évi 5 770 000 tonna szén-dioxid-kibocsátási mennyiség meghaladja az országban működő egyéb erőmű és hőerőmű által együttesen kibocsátott mennyiséget.
2. A Dunaújvárosban található ISD DUNAFERR társaságcsoporthoz Magyarország egyik legnagyobb ipari termelő vállalata, éves szén-dioxid-kibocsátása 1 323 000 tonna.
3. A Baranya megyei erőművek és üzemek éves szén-dioxid-kibocsátása: 1 271 000 tonna.
4. A budapesti erőművek és hőerőművek éves szén-dioxid-kibocsátása 1 267 000 tonna, melyet 331 000 tonnával (2014. évi adat) növel a FKF Nonprofit Zrt. általi kibocsátás, amely így összesen 1 598 000 tonna. Ehhez a csoporthoz potenciálisan csatlakozhatnak a váci és a százhalombattai üzemek, így az éves szén-dioxid-kibocsátása értéke 2 675 000 tonnára növekszik.

A pontforrások területi megjelenítését a 36. ábra szolgálja.



36. ábra: Nagyobb magyarországi szén-dioxid-pontforrások elhelyezkedése

Forrás: Saját szerkesztés EURÓPAI SZENNYEZŐANYAG-KIBOCSÁTÁSI ÉS -SZÁLLÍTÁSI NYILVÁNTARTÁS (2017) alapján

Az alapanyag-ellátottság (szén-dioxid, víz), és a megújulóenergia-ellátás alapján a következő helyszínek alkalmasak a megújuló metanol gyártására.

Paramétereit alapján a hazai megújuló metanol gyártás úttörő szerepére a Pannónia Bio Zrt. lenne az egyik legalkalmasabb vállalkozás. Ennek okai:

- A bioetanol gyártása során, az erjesztés eredményeképpen nagy mennyiségű és szinte 100%-ban tiszta szén-dioxid képződik, azaz nincs szükség elnyelésre, deszorpcióra, tisztításra. Az üzemben hulladékokból termelt biogáz esetén is magas a szén-dioxid-koncentráció, de annak hasznosítása esetén a szén-dioxid megkötése, tisztítása szükséges. A Pannónia Bio leányvállalata, a Pannónia Solar Zrt.
- Az üzem megfelelő vízellátással rendelkezik, a Duna partján található.
- a Pannónia Bio Zrt. a napenergia-iparágban végzett befektetéseket, 35 megawatt kapacitású naperőművel fog rendelkezni hamarosan.

A legnagyobb szén-dioxid-kibocsátó a Mátrai Erőmű, mely lignitet, földgázt, hulladékot, biomasszát és ATAMIX (hulladékból előállított tüzelőanyag) keveréket használ föl az energiatermelés során. Várhatóan a lignitalapú villamos energiatermelés visszaesik az üzemben, de évi 300 000 tonna nem veszélyes hulladék fűtőanyagként történő energetikai hasznosítását, illetve

biomassza energetikai hasznosítását végezheti. Az erőműben termelődő szén-dioxid megkötése és felhasználása jelentősen csökkentené a hazai szén-dioxid-kibocsátást, mivel az erőművi, hőerőművi kibocsátás több mint fele a Mátrai Erőműtől származik. A Mátrai Erőmű tulajdonában van 3 (Visonta, Bükkábrány, Halmajugra), jelenleg az ország legnagyobb fotovoltatikus erőműi között található erőmű, összesen 56 megawatt teljesítménnyel. A lignites egységek fokozatos kivezetését korszerűbb és környezetkímélőbb technológiák belépése kíséri, a már meglévő fotovoltatikus erőművek mellé további 200-220 megawattnyi napelempark létesítését tervezik a közeljövőben Visontán és Bükkábrányban. Alapanyag- és energiaellátottság tekintetében is megfelelő helyszín Visonta egy megújuló metanolgyár számára.

Dunaújvárosban található a hazai második legnagyobb szén-dioxid-kibocsátású ipari komplexum, amit a 23. táblázat mutat be.

23. táblázat: ISD DUNAFERR társaságcsoport által kibocsátott szén-dioxid mennyisége 2017-ben

Társaság	Tevékenység	Éves szén-dioxid-kibocsátás, (tonna)
<b>ISD DUNAFERR Zrt.</b>	Vas- és acélgyártás	992 000
<b>ISD POWER Kft.</b>	Villamos energia és hőtermelés	151 000
<b>ISD Kokszoló Kft.</b>	Kohókokszt gyártása	180 000
<b>Összesen</b>		1 323 000

Forrás: Saját szerkesztés EURÓPAI SZENNYEZŐANYAG-KIBOCSÁTÁSI ÉS -SZÁLLÍTÁSI NYILVÁNTARTÁS (2017) alapján

Dunaújváros közvetlen környezetében nem található jelentős fotovoltatikus erőmű, de alig több mint 40 km távolságra helyezkedik el Paks, ahol található naperőmű.

A Baranya megyében található cementüzemek (Beremend és Királyegyháza) 2017-ben 890 ezer tonna szén-dioxidot bocsátottak ki. A cementüzemek füstgázában közepesen magas a szén-dioxid-koncentráció, így alkalmas a szén-dioxid-befogás és -felhasználás technológia alkalmazására. A cementüzemek esetén a szén-dioxid-kibocsátás nem küszöbölhető ki a nem fosszilis alapú hőenergia biztosításával, hiszen a cementgyártás során a mészkő bomlásakor képződik a szén-dioxid. Globálisan a beton a második legnagyobb mennyiségben használt anyag, s ez folyamatosan nagy mennyiségű szén-dioxid-termelést indukál, jelentősen részesedve ezzel az üvegházhatású gázok kibocsátásából. A beton olcsó, ellenálló és biztonságos, jelenleg nincs valódi alternatívája az építőiparban. A környezeti károk mérséklésére fontos lenne legalább a cementgyártás során képződő szén-dioxidot megkötni. Beremend környezetében Pécssett és Pellérdén található nagyobb



fotovoltatikus erőmű és 2020 végéig az MVM Zrt. 24 kiserőművet (0,5 megawatt) helyezett üzembe a Dél- Dunántúlon.

### 5.4.3. Biometanol üzemek lehetséges helyszínei

DINYA (2018) elemzésében, a multifaktoros összehasonlító értékelés alapján a rangsort vezető szél- és napenergia projektek után a bioenergetikai beruházások állnak, ezzel összhangban a metanolgyártás szempontjából is nagy jelentőséggel bír a biomassza alapú gyártás. Az alapanyag kiválasztását két elvnek kell vezérelni: a rendelkezésre álló biomassza maximális hozzáadott értékű módon hasznosítása és zéró hulladék keletkezése. Az energianövények helyett az alternatív szubsztrátokra, például a különféle szektorokból származó biomassza-hulladékokra kell alapozni a gyártást.

SZALAY (2018) vizsgálata alapján a dendromassza alapú melléktermékek begyűjthető mennyiségének megyei bontású rangsorát Szabolcs-Szatmár-Bereg megye vezeti. A további megyék sorrendje: Bács-Kiskun, Pest, Zala, Somogy és Borsod-Abaúj-Zemplén. A jelentősebb biomassza erőművek, fűtőművek alapanyag-felvételi igényét figyelembe véve Bács-Kiskun, Pest, Zala, Somogy megye rendelkezik jelentős felhasználható szabad alapanyag kapacitással.

2019-ben Magyarország földterületének közel 79%-át kitevő termőterület nagysága 7 millió 319 ezer hektár volt, amelynek művelési ágankénti megoszlása: 26,5% erdő, 2,2% gyümölcsös és szőlő, 59% szántó, 10,8% gyeper, valamint a konyhakert, a nádas és a halastó egyaránt 0,5%. Gabonaféléket 2019-ben 2,5 millió hektáron termesztettek, melyből 1 048 ezer hektáron kukoricát és 980 ezer hektáron őszi búzát (KSH 2019b). A szántóföld növényi melléktermékei, a szalma és a szármaradványok jelentős potenciált képviselnek a biometanol-gyártás számára, annak ellenére, hogy a szalma túlnyomó részét az állattenyésztés felhasználja. GYURICZA (2010) elemzése szerint az energetikai hasznosításra évente 2,2-3,7 millió tonna szalmát, 5,0-6,5 millió tonna kukoricaszárát és csutkát, valamint 1,0-1,2 millió tonna napraforgószárát lehet felhasználni.

Bár az állattenyésztésben bevezetett új technológiák eredményeképpen az ágazatban csökken a szalma felhasználása, a legnagyobb potenciállal a kukoricaszár, valamint a napraforgószár és -tányér rendelkezik a lágyszárú növényi melléktermékek esetén. Mind a kukorica, mind a napraforgó mellékterméknél a hasznosítás módja a beszántás, az egyéb felhasználást akadályozza a szármaradványok begyűjtésének nehézsége. A gépesített begyűjtés és a stabil, megfelelő áron történő átvétele a melléktermékeknek az eddigi csekély energetikai hasznosítási arányt jelentősen növelné (YMERI et al. 2020). A lágyszárú növényi melléktermékek esetén kiemelkedő potenciál jellemzi Szabolcs-Szatmár-Bereg, Békés és Hajdú-Bihar megyéket, de Bács-Kiskun és Pest megyék

is a rangsor első felében található. A dendromassza és a lágyszárú melléktermékek együttes hasznosíthatósága alapján egy biometanol üzem megvalósítása Bács-Kiskun vagy Pest megye területén lenne kedvező.

### 5.5. A biometanol és e-metanol gyártás gazdaságossági vetülete

A szén-dioxid direkt hidrogénezésével előállított metanolgyártás két nagy lépésre bontható. Az 1. folyamat a hidrogénszükséglet fedezése, amelyet szinte kizárólag víz elektrolízisével biztosítanak. A 2. folyamat a szén-dioxid átalakítása metanollá.



#### 5.5.1. Anyag- és energiafelhasználás az erőművi és ipari füstgázokból kiinduló gyártás során

A légköri, illetve az erőművi, ipari füstgázokból kiinduló metanol gyártási folyamat részfolyamatainak anyag- és energiafelhasználását részletezi a 24.-25. táblázat.

24. táblázat: Anyag- és energiaszükséglet a metanolgyártás részfolyamataiban

Alkáli elektrolízis	Termék	Hidrogén	
	Elektromos áram szükséglet kJ/kg	177 433	
	Hatásfok %	67%	
	Hő energia kJ/kg	-58 069	
Szén-dioxid-befogás		DAC	Pontforrás
	Termék	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
	Szén-dioxid-koncentráció %	0,04	20
	Elektromos áram szükséglet kJ/kg	2 520	54
	Hőenergia szükséglet kJ/kg	7 920	3 134

Forrás: Saját szerkesztés DAVID et al., 2019; OLAH, 2013; MEUNIER et al. 2020; CLIMEWORKS alapján

A légköri szén-dioxid-megkötés óriási energiaszükséglete miatt egyelőre nem valóságos lehetőség a metanolgyártás alapanyagaként.

25. táblázat: 1 tonna metanol előállításának összesített anyag- és energiaszükséglete ipari forrás felhasználása esetén

Bemenet		Kimenet		Forrás
Szén-dioxid	1441 kg	Metanol	1000 kg	MEUNIER et al. 2020
Hidrogén	203 kg	Víz	568 kg	
Elektromos áram	1 188 000 kJ	Szén-dioxid	66 kg	
		Oxigén	1584 kg	
		Hő energia	1 400 000 kJ	
Szén-dioxid	1460 kg	Metanol	1000 kg	PEREZ FORTES M; TZIMAS E. 2016
Víz	1990 kg	Víz	768 kg	
Elektromos áram	1 188 000 kJ	Oxigén	1592 kg	
		Szén-dioxid	180 kg	

Forrás: Saját szerkesztés a megadott források alapján

A metanolgyártás legenergiaigényesebb folyamata a víz elektrolízise, azaz a hidrogén előállítása. A szén-dioxid megkötése esetén a szén-dioxid koncentrációja határozza meg az energiaszükségletet, azaz az alacsonyabb szén-dioxid koncentrációnál több energiát igényel a folyamat. A levegőből történő szén-dioxid-kivonás több mint háromszor nagyobb energiaigényű, mint az erőművi, illetve ipari füstgázoké. A bioetanol gyártása során képződő gáz gyakorlatilag tiszta szén-dioxid, s így nincs erre a lépésre szükség, gazdaságosabb a felhasználása. A részfolyamatokban képződő melléktermékek az oxigén és a víz. A víz visszavezethető az elektrolizáló egységbe, ezáltal csökkenti a külső betáplálás vízigényét. Az oxigén pedig jól értékesíthető, így a gyártási folyamat gazdaságosabbá tételét segíti. A metanol szintézis részfolyamata hőenergiát termel, melyet hasznosítani lehet.

Felmerülő költségek és bevételek 1 tonna metanol előállítására vonatkoztatva:

MEUNIER et al. (2020) alapján a magyar, nem lakossági, 2020. évi villamos energia ár (EUROSTAT 2021b) alkalmazásával, valamint a Linde Gáz Magyarország Zrt. gáz árai segítségével.

Hidrogén előállítása:  $10,7 \text{ MWh} * 84,9 \text{ euró/MWh} = 908 \text{ euró}$ .

Metanol szintézis: 31 euró.

Szén-dioxid befogása: 23 euró.

Egyéb költség: 8 euró.

Összesen: 970 euró.

A jelenlegi európai piaci ára a metanolnak 410 euró/tonna (METHANEX, érvényes 2021. április 1. - 2021. június 30.).

A víz elektrolíziséből származó oxigén eladási ára 80 euró MEUNIER és társai tanulmánya szerint.

Saját számításaim (a Linde Gáz Magyarország Zrt. alapján) az oxigén eladási ára:

$$m_{\text{oxigén}} = 10^5 \text{ Pa} * 0,6\text{m}^3 * 32 * 10^{-3} / 8,314 * 295 = 158,6 \text{ kg, melynek ára } 10\,040 \text{ Ft.}$$

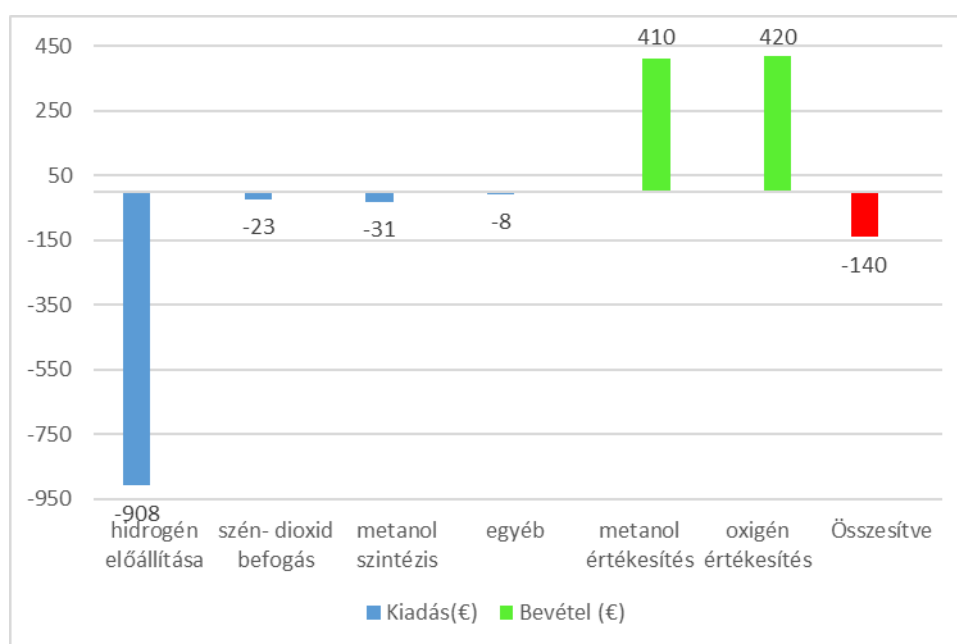
Az elektrolízis során 1584-1590 kg oxigén keletkezik, ami megközelítőleg 100 000 Ft, azaz 280 euró.

A nagy tisztaságú (99,95%) oxigén ára megközelítőleg 200 000 Ft, azaz 560 euró.

A víz elektrolízise során nagy tisztaságú oxigén képződik, de a számításban átlagosan az oxigén árát 420 eurónak veszem.

Összesen: 830 euró.

A metanol gyártáshoz kapcsolódó költségek és bevételek arányát a 37. ábra szemlélteti.



37. ábra: Metanolgyártáshoz kapcsolódó költségek és bevételek

Forrás: Saját szerkesztés

A számítások szerint minden tonna metanol előállítása a jelenlegi viszonyok között 140 euró veszteséget termel.

Az izlandi elektromos áram árával számolva a következő értékeket kaptam:

$$\text{Hidrogén előállítás: } 10,7 \text{ MWh} * 55,8 \text{ euró/MWh} = 597 \text{ euró.}$$

A költségek összesen: 659 euró.

Bevételek összesen: 830 euró.

Az izlandi üzem képes a gazdaságos működésre.

### 5.5.2. Anyag- és energiafelhasználás biomassza erőművel kapcsolt metanol üzem esetén

BUDDENBERG et al. (2016) tanulmányában azt vizsgálta, hogy ha egy működő biomassza erőműhöz kapcsolódik egy metanol üzem, milyen gazdasági és környezeti hatásai vannak. A tanulmány anyag- és energiafelhasználási adatainak alkalmazásával a következő kalkuláció adódott. Felmerülő költségek és bevételek 1 tonna metanol előállítására vonatkoztatva: biomassza: 8,5 MW \*8 euró = 68 euró.

Elektromos áram külső forrásból: 8,42 MWh\*84,9 = 715 euró.

Egyéb költség: 8 euró.

Összes költség: 791 euró.

Termelt hő, értékesített: 7,1 MWh \*12 = 85 euró.

Termelt oxigén: 420 euró.

Metanol ára: 410 euró.

Bevétel összesen: 915 euró.

A biomasszából történő metanol előállítása gazdaságosabb, mint az ipari források alkalmazásával. A biomassza erőművek tőke költségét is figyelembe véve, amely az IRENA AND METHANOL INSTITUTE (2021) alapján 170-242 euró/tonna metanol, reális a gazdaságos biometanol-gyártás.

### 5.5.3. Szén-dioxid-kibocsátásra gyakorolt hatás

A 26. táblázat összefoglalja a különböző források, illetve technológiák alkalmazásával nyert metanol esetén a gyártási folyamatban és a felhasználás során kibocsátott szén-dioxid mennyiségét.

26. táblázat Szén-dioxid kibocsátás a különböző technológiai utak esetén

	Fosszilis forrás felhasználása esetén	Erőművi, ipari pontforrás felhasználásával	Bioetanol gyártásából származó szén-dioxid felhasználása	Biomassza erőművel kapcsolt üzem	DAC technológia alkalmazása
<b>Metán felhasználás</b>	327	0	0	0	0
<b>Oxigén-termelés</b>	0	1590	1590	1590	1590
<b>Szén-dioxid-kibocsátás a metanol-gyártás folyamán</b>	1855	0	0	0	0

<b>Szén-dioxid-kibocsátás a metanol felhasználás a során</b>	2460	2460	0	0	0
<b>Teljes szén-dioxid-kibocsátás</b>	4315	2460	0	0	0

Forrás: Saját szerkesztés

Az erőművi, ipari pontforrásból származó szén-dioxid felhasználása a legkevésbé környezetbarát megoldás az alternatív utak közül, tulajdonképpen az erőművek által kibocsátott szén-dioxid nem közvetlenül kerül a légkörbe, hanem a metanol felhasználása során. Jelentős szempont, hogy a fosszilisforrás-alapú technológiához képest nagymértékű szén-dioxid-kibocsátás csökkenést eredményez, mivel nem minden ipari technológia esetén lehet a fosszilis forrást kiváltani, illetve nem fosszilis forrásból származik a szén-dioxid. Tipikus példa erre a kokszt felhasználása a vasgyártásban, illetve a cementgyártás során a mészkő bontásából származó szén-dioxid. A biomassza elégetése, vagy a biomassza erjesztése során keletkező szén-dioxid mennyisége megegyezik a légkörből megkötött szén-dioxid mennyiségével, ezért a metanol felhasználása során keletkező szén-dioxid nem jelent többlet kibocsátást.

#### 5.5.4. A gazdaságos biometanol és e-metanol gyártás perspektívája

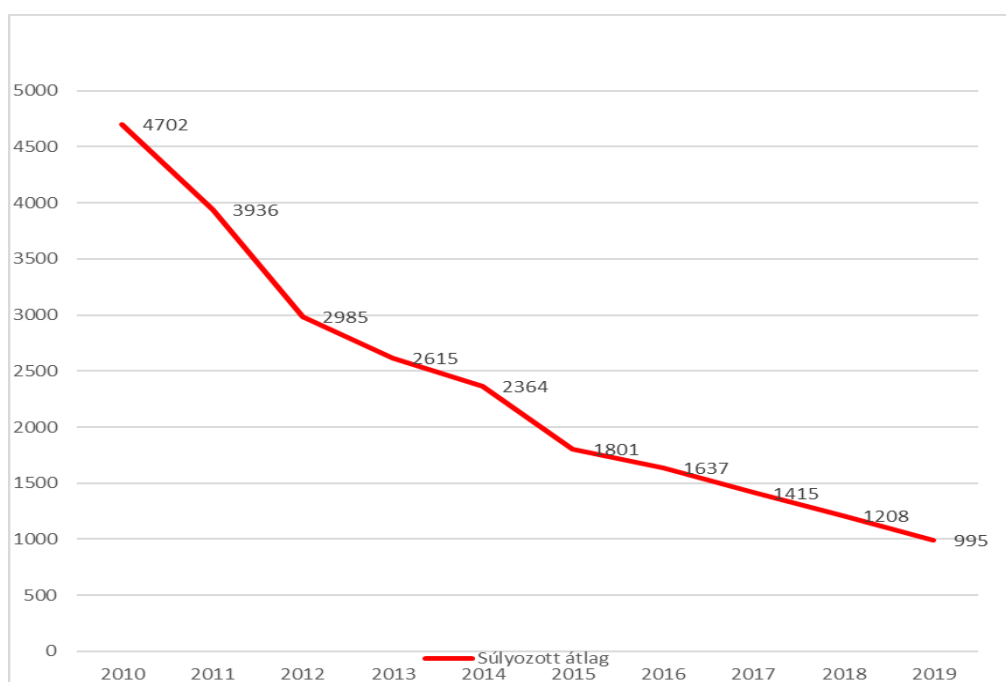
##### *A villamos energiatermeléshez kapcsolódó költségek változása*

A metanol üzemek beruházási költségeinek elemzése egyértelműen mutatja, hogy a víz elektrolíziséhez szükséges berendezés a legköltségesebb elem. PÉREZ-FORTES és TZIMAS (2016) tanulmányában a 270 millió eurós beruházásból 147,7 millió euró az elektrolizáló berendezés, amely közel 55%-ot tesz ki. RIVAROLO és társai (2015) szerint a beruházási költségek még nagyobb hányadát adja az elektrolizáló berendezés: biogáz alapanyag használata esetén 54% (összes tőke költség 3,8 millió euró), szén-dioxid-pontforrásból származó alapanyag esetén 86% (összes tőke költség 2,5 millió euró).

A működési költségek esetén még nagyobb hányad kapcsolódik a víz elektrolíziséhez, azaz a hidrogén előállításához, akár 90% fölé is lehet ez az érték. Ebből adódik, hogy a biometanol és e-metanol előállítási ár meghatározója a technológiai lépések közül az elektrolízis, azaz a felhasznált villamos energia ár függvénye a metanol előállítási ára. Ezzel szemben a hagyományos technológiával készült metanol esetén az előállítási ár meghatározója a földgáz ára.

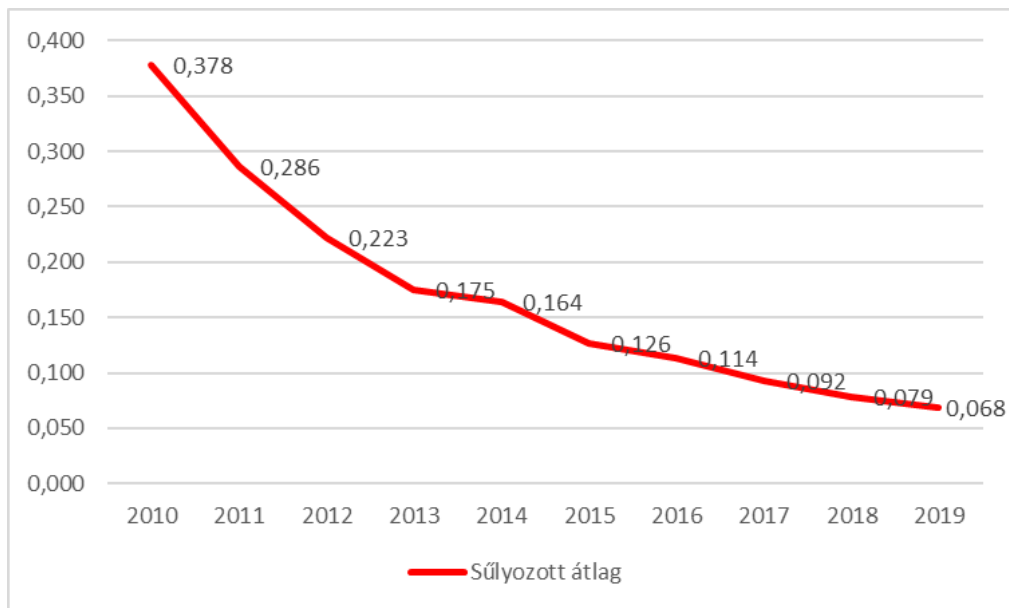
A versenyképes biometanol és e-metanol termék gyártásához a villamos energia költségének csökkentése szükséges, amelyre két lehetőség létezik: a felhasznált villamos energia ára csökken, illetve az elektrolízis hatásfoka növekszik.

A villamos energia árcsökkenése rövid időn belül reális. Tervek szerint Magyarország villamos energia mixét az atomenergiából és a napelemes rendszerekből származó energia fogja alkotni, ezért a napelemes rendszerek telepítési költségét és a villamos energiatermelés árát tanulmányoztam. A 38. és a 39. ábra a fotovoltaiikus erőmű telepítésének és az általa termelt villamos energia költségének alakulását mutatja 2010 és 2019 között. A 10 évet felölelő periódusban a fotovoltaiikus erőművek beruházási költségei és a villamos energiatermelési költségek folyamatosan csökkentek. A beruházási költség közel ötödére, míg a villamos energia ára több mint ötödére csökkent.



38. ábra: PV beruházási költség USD/ kW

Forrás: Saját szerkesztés IRENA 2020 alapján



39. ábra: PV áramtermelési költség USD/ kWh

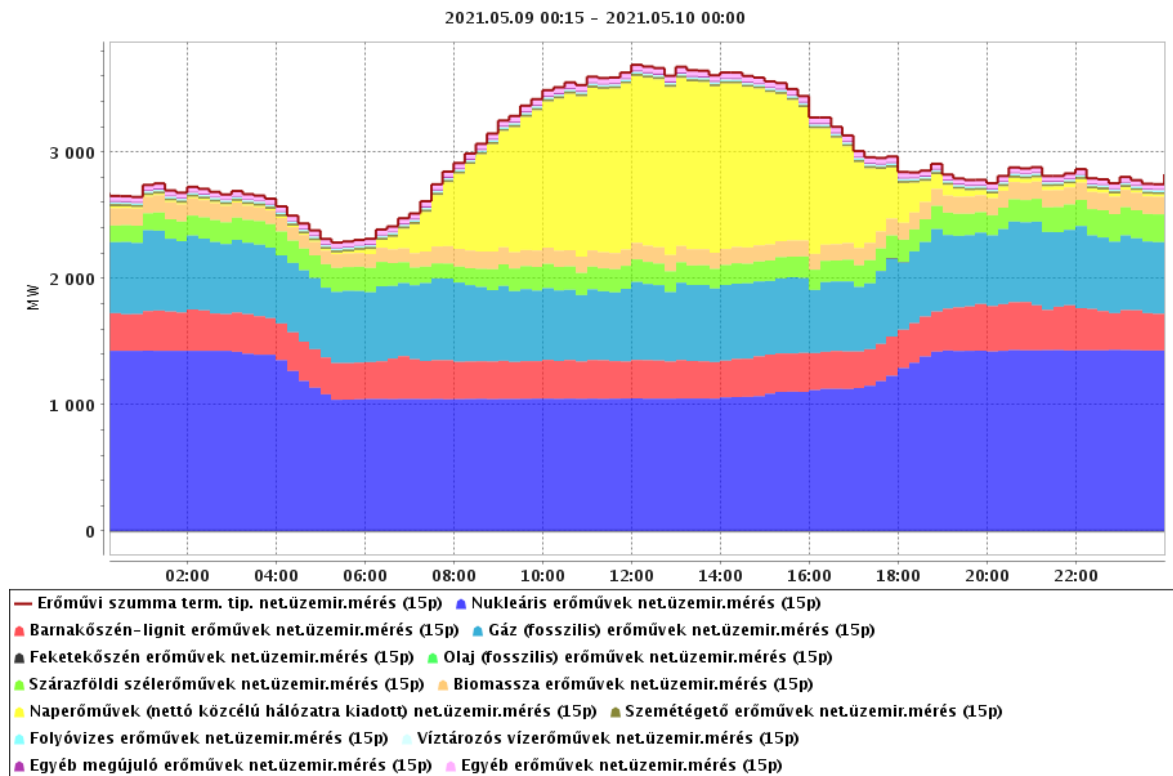
Forrás: Saját szerkesztés IRENA 2020 alapján

ZHANG és társai (2019) tanulmánya szerint az e-metanol gyártás gazdaságosan megvalósítható, ha a villamos energia ára alacsonyabb, mint 0,047 USD/kWh. 2019-ben átlagosan 0,068 USD/kWh volt a fotovoltatikus erőművek által termelt villamos energia ára, így reális, hogy rövid időn belül 0,047 USD/kWh alá csökken.

A magyarországi naperőművek 2021. május 9-én érték el az eddigi legmagasabb termelési csúcst, legnagyobb szeletet képviselve a hazai előállítású villamos energiából (40. ábra). A paksi erőmű teljesítménye viszont felére esett, melyet részben a megnövekedett naperőművi teljesítmény okozott.

A naperőművi kapacitások növekedésének következménye, hogy a magyar árutőzsde (HUPX) másnapi piacán a villamos energia tőzsdei ára 0 vagy negatív volt.





40. ábra: Erőművi termelés tüzelőanyag szerinti bontásban - nettó üzemirányítási mérés alapján

Forrás: MAVIR (2021)

A fenti adatok tükrében úgy gondolom, hogy a fotovoltatikus erőművek üzemeltetése során a profit maximalizálása érdekében érdemes lehet a megtermelt villamos energiát két útvonalon hasznosítani, azaz a közvetlen rendszerbe való betáplálást kiegészíteni egy alacsony átvételi ár esetén működő metanol üzemmel. GONZÁLEZ-APARICIO és társai (2017) egy spanyolországi példán keresztül bemutatták, hogy egy megújuló energiát termelő erőmű és egy szén-dioxid-alapú metanol üzem összekapcsolása kedvező gazdasági eredménnyel járhat. Egy 400 MW teljesítményű szél erőmű teleppel kombinált 175 kt/év kapacitású metanol üzem 350 euró/tonna eladási áron képes metanolt termelni.

### ***A metanol mint hidrogéntároló***

A megújuló metanol gyártáshoz kapcsolódó gazdasági elemzések a megújuló metanol és a hagyományos gyártási útvonalon gyártott metanol költségeivel és piaci árával való összevetésen alapulnak. A nap- és szélenergiára való folyamatos áttérés során a kínálat és a kereslet egyensúlyának megteremtése érdekében szükség van az energia tárolására. Jelenleg a szivattyús víztároló rendszer (PHS) a vezető technológia, a globális villamosenergia-tárolás 97%-át teszi ki (STOCKS et al. 2021) annak ellenére, hogy PHS meghatározott földrajzi viszonyok mellett alkalmazható, mint pl. a megfelelő szintkülönbség, elegendő vízmennyiség. KHAREL és SHABANI (2018) vizsgálták a nagyléptékű energia tárolás két útjának költségét: az első esetben

akkumulátoros tárolást, a második esetben egy hibrid (akkumulátor és hidrogén) tárolást elemeztek. Megállapították, hogy a hibrid akkumulátor-hidrogéntároló rendszer négyszer költséghatékonyabb, mint a csak akkumulátorral üzemelő energiatároló rendszerek.

A hidrogén tárolásának egyik módja a kémiai tárolás, amelyben a metanol kitüntetett szereppel rendelkezik kedvező tulajdonságai miatt, pl. 1 mól metanol 4 mólnyi H atomot tartalmaz, ami azt jelenti, hogy 1 m<sup>3</sup> metanol 99 kg hidrogént tárol. A hidrogéntároló szerep alapján a metanol gyártásának gazdaságosságát, árának versenyképességét a többi hidrogéntároló lehetőséghez képest érdemes vizsgálni.

A hidrogén tárolására alkalmas rendszerek méretét meghatározza, hogy egységnyi térfogatban mekkora tömegű hidrogént képes tárolni. Az ammónia rendelkezik a legnagyobb tárolási sűrűséggel, a második helyen a metanol található. A rangsor végén helyezkedik el a tiszta hidrogén tárolása. Az elemi hidrogén tárolási sűrűsége 700 bar nyomáson 2,5-szer, 200 bar nyomáson 4-szer, 100 bar nyomáson több mint 12-szer kisebb, mint a metanolé (ANDERSSON és GRÖNKVIST 2019). A hidrogén elemi formában történő szállítása és elosztása új technológiák kidolgozását igényli, amelyhez jelentős kutatási költség társul. A szállítási költségekre DEMIR és DINCER (2017) 2,73-2,86 USD/kg hidrogén értékeket kapott, annak függvényében, hogy csővezetéken vagy tartálykocsival szállítják a hidrogént az üzemből a közeli városokba. 1 m<sup>3</sup> metanol 99 kg hidrogént tárol, ilyen mennyiségű elemi hidrogén tartálykocsival történő szállításának költsége több mint 280 USD.

DIAS és munkatársai (2020) a hidrogén tárolási és szállítási költségeit hasonlították össze az elemi hidrogén és a kémiai hidrogén tárolása esetén. Vizsgálatuk magába foglalta a gyártás, a tárolás és a szállítás elemeit és költségeit. A metanol (szállítás tartálykocsival) használata esetén a legalacsonyabbak a költségek (219 euró), míg az elemi gáz halmazállapotú hidrogén alkalmazása a legmagasabb költségű, azaz 513 euró tartálykocsival történő szállítással és 492 euró csővezetékes szállítással. A második legalacsonyabb költséggel a folyékony hidrogén alkalmazása rendelkezik, s csak ezt követi a metán és az ammónia használata. A költségek az üzemanyag 1 MWh óra egységére és 30 euró/tonna szén-dioxid ár mellett értendők.

A fenti adatok azt mutatják, hogy az energiatárolás szempontjából a hidrogén formájában történő tárolás gazdaságosabb lehet, mint az egyéb módok, illetve széles körben alkalmazható, mivel alkalmazásához nincs szükség speciális földrajzi körülményekre. Fontos kiemelni, hogy a hidrogén energiatároló funkciója nem azonos az elemi hidrogén előállításával és felhasználásával. A hidrogén biztonságos használata megköveteli a kémiai tárolók alkalmazását, amelynek egyik anyaga lehet a metanol. A metanol folyadék és stabilis vegyület, tárolása egyszerű, s hosszú távon

veszteség nélkül megoldható, valamint a tárolási költség elhanyagolható. A metanol logisztikája a már létező szállító és elosztó eszközök segítségével történhet, így szolgálva az energiarendszerek rövid távon megvalósítható átalakítását költséghatékony módon.

## 6. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Az éghajlatváltozás napjaink egyik legnagyobb kihívást és fenyegetettséget jelentő problémája. Erre komplex módon kell választ keresni és adni, hogy képesek legyünk a negatív folyamatokat lassítani, megfordítani. Az Európai Unió energiapolitikai stratégiája az ellátásbiztonság, a fenntarthatóság és gazdaságosság hármására épül. Az egyik elem irányába történő egyoldalú elmozdulás kihat a másik két elemre is. A közelmúlt és jelen történései, a koronavírus krízis világosan rámutatott a megbízható villamosenergia-ellátás fontosságára, mint az otthonról történő munkavégzés alapfeltételére. Ugyanakkor megjelenik egy újabb pillér az energiapolitikában, a társadalmi elfogadás, amely eredményeképpen a nemzetgazdaság alsóbb szintjein is felértékelődik az energiatervezés. A klímaváltozást kísérő ökoszisztéma károsodások következtében erősödő gazdasági, szociális és politikai nyomás a megújuló energiarendszerek fejlesztését, térnyerését eredményezte. Ha az áramtermelés relatív változását forrás szerinti bontásban vizsgáljuk, látszik, hogy a jövőben a megújuló energiaforrások elterjedtebbek lesznek, mint bármikor. Ennek következtében nagy kapacitású tárolórendszerekre lesz szükség a folyamatos energiaáramlás biztosításához, ellensúlyozandó az adott időpontban fellépő elégtelen helyi megújuló energiaforrásokból származó termelést. A stratégiai energiataralékok tárolásának feladatára sem az akkumulátorok, sem az elemi hidrogén nem alkalmas, a Power-To-X technológiák megkerülhetetlenek a probléma megoldásában.

A megújuló energiák és a CO<sub>2</sub> megkötése közötti technológiai kapcsolat kihasználása pozitív változást eredményez a légköri szén-dioxid-kibocsátás csökkentésében és a fosszilis üzemanyagoktól való függetlenedés növelésében. Ez a megközelítés egy CO<sub>2</sub> hurok kialakulását demonstrálja, mivel az égés során kibocsátott anyag újrahasznosítása és újrafelhasználása történik. A Power-To-X technológiák iránt egyre nagyobb az érdeklődés, mivel valójában képesek a megújuló energiát vegyi anyagokká és üzemanyaggá konvertálni, amelyek könnyen tárolhatók és szállíthatók. Ideális esetben a fosszilis tüzelőanyagok hasznosítása az élet valamennyi területéről számúzhető a légköri CO<sub>2</sub> felhasználása által.

A metanolgazdaság lényegében egy olyan körkörös gazdaság kialakítását jelenti, melynek révén megvalósítható az energiatermelés és egyéb ipari folyamatok során keletkezett szennyezőanyag és hulladék megkötése, rendszerbe való kapcsolása a karbonsemleges energiaforrások segítségével.

### 6.1. Hipotézisvizsgálat eredménye

A szakirodalmi feldolgozás és a saját kutatásom alapján az értekezés elején ismertetett hipotézisek vizsgálatának eredményét az alábbiakban ismertetem.

**H<sub>1</sub> hipotézis: A metanol felhasználása környezeti előnyökkel jár, a megfelelő technológia és energiaforrások alkalmazásával előállított metanol a globális felmelegedés elleni fellépésben eredményesen alkalmazható.**

Első hipotézisemet teljes mértékben elfogadom, mert a metanolgazdaság környezeti terheit vizsgáló szakirodalmat elemezve megállapítottam, hogy technológiáktól függetlenül a gyártási folyamat energiaszükségletének fedezésére szolgáló energia szénintenzitása határozza meg a globális felmelegedésre gyakorolt hatást. Karbonsemleges villamos energiaforrásokat alkalmazva a globális felmelegedésre gyakorolt hatás jelentősen alacsonyabb, mint a hagyományos úton gyártott metanol esetében, továbbá belső égésű motorok üzemanyagaként felhasználva is kedvezőbb értékekkel rendelkezik, mint a benzin. A metanolgazdaság koncepciója, amennyiben a megújuló metanol gyártását és hasznosítását értjük alatta, szolgálja a fenntartható fejlődési, klímapolitikai célok elérését, valamint a körkörös gazdaságra való áttérést.

**H<sub>2</sub> hipotézis: Magyarország rendelkezik a megújuló metanol gyártáshoz szükséges alapanyagokkal, elsősorban a kommunális hulladék, a szennyvíz és a biomassza felhasználása terén.**

Hipotézisemet, amely szerint Magyarországon rendelkezésre állnak a biometanol és e-metanol előállításához szükséges alapanyagok, igazoltnak tekintem. Az e-metanol gyártás alapanyagát az erőművek, hőerőművek és a cementiparhoz kapcsolódó üzemek által kibocsátott szén-dioxid szolgáltatja. A nemzetközi tapasztalatok és szakirodalom alapján a termelő „hulladék szén-dioxid” mennyisége elegendő több metanol gyártó üzem alapanyag igényének fedezésére. A pontforrások közül kiemelkedő lehetőséggel rendelkezik a bioetanol gyártó üzem, mert szinte 100%-os tisztaságú szén-dioxid képződik az erjesztési folyamat melléktermékeként, így a technológia egyszerűsödik, azaz a tisztítás és elnyelés lépések nem szükségesek. További előnye a bioetanol mellékterméke felhasználásnak, hogy a metanolgyártás és -felhasználás zéró szén-dioxid-kibocsátással jár, ami az erőművi és egyéb ipari pontforrásokra nem igaz. A nem biomasszát használó erőművi és egyéb ipari pontforrások alkalmazása a metanol gyártásában jelentősen csökkenti a szén-dioxid-kibocsátást a fosszilis források alkalmazásával nyert metanolhoz képest, de nem tekinthetők zéró kibocsátású útvonalaknak. A biomassza alapanyagot felhasználó és a DAC technológiát alkalmazó metanolgyártás és -felhasználás zéró szén-dioxid-kibocsátással jár. A magyarországi biomassza hulladékok felhasználása jelentős potenciállal rendelkezik. Kisebb mennyiségben dendromassza, nagy mennyiségben lágyszárú növények termesztéséből származó melléktermék és hulladék hasznosítása nem történik meg jelenleg, így szabad kapacitásként mutatkoznak a biometanol-gyártás számára. A nemzetközi adatokkal összehasonlítva a hazai

adatokat a kommunális hulladék, a depóniagáz és a szennyvíziszap felhasználásában rejlő lehetőségeket is alacsony szinten használjuk ki.

**H<sub>3</sub> hipotézis: Magyarország energiatermelése nem biztosítja a megújuló metanol előállításához szükséges karbonsemleges villamos energiát.**

A metanolgazdaság térnyerésének legfőbb gátja a hidrogén alapanyag előállításának magas villamos energiaigénye. A megújuló metanol gyártása során a hidrogént a víz elektrolízise során nyerik megújuló energia felhasználásával, amely jóval energiaigényesebb útvonal, mint a földgázalapú metanolgenyártás. Az Európai Unió tagállamai nettó energiaimportőrök, 2018-ban az energiafüggőségi ráta meghaladta az 50,0%-ot. Magyarország esetében a 2015 és 2019 közötti időszakban a villamos energia importaránya éves szinten 27,6% és 31,6% között alakult, így a nagy energiaigényű technológia bevezetéséhez szükséges a primer energiatermelés növelése. Kormányzati cél, hogy a villamos energia import középtávon nulla szintre csökkenjen.

A magyarországi életszínvonal (egy főre jutó GDP) dinamikus növekedése ellenére az ország széndioxid-kibocsátása csökkenő tendenciát mutat, mivel az energiaintenzitás és az energiaellátás szénintenzitása folyamatosan csökken. 2019-ben a Magyarországon megtermelt villamos energia 56 százaléka karbonmentes forrásból származott, de ennek 90 százalékát a Paksi Atomerőmű állította elő. Szintén középtávú törekvés, hogy a villamosenergia-termelés szerkezetében 50-50%-ban az atomenergia és a napenergia szerepeljen, s ezt alátámasztják a statisztikai adatok, melyek elemzése rávilágított arra, hogy a magyarországi villamosenergia-termelésben a naperőmű a legdinamikusabban növekvő erőmű típus.

Pillanatnyilag sem a kollektíven termelt villamos energia mennyisége, sem a forrásának a szerkezete nem megfelelő a megújuló metanol gyártására, de a kormányzati törekvések és az energiatermeléssel kapcsolatos tendenciák azt ígérik, hogy 10 éven belül ez megváltozik. A fotovoltatikus erőművek üzemeltetése során a profit maximalizálása érdekében már a közelebbi jövőben érdemes lehet a megtermelt villamos energiát két útvonalon hasznosítani, azaz a közvetlen rendszerbe való betáplálást kiegészíteni egy alacsony átvételi ár esetén működő metanol üzemmel, amely a tárolókapacitások bővítését vonja maga után.

A hipotézisem beigazolódott, de az Európai Unió és ezzel összhangban Magyarország energiastratégiája, klímapolitikai céljai 10 éven belül pozitívan változtathatják meg a metanolgazdaság perspektíváját.

**H<sub>4</sub> hipotézis: Magyarországon a megújuló metanol gyártása a jelenlegi paraméterek mellett gazdasági előnyökkel nem jár, de az energiatermelés átalakulásával ez változhat.**

Ez a hipotézis megerősítést nyert. A metanolgazdaság gazdaságosságát a hidrogéntermeléshez szükséges energia ára határozza meg. Amennyiben az e-metanol gyártásához szükséges villamos energia ára 0,047 USD/kWh alá esik, a fosszilis forrású metanollal szemben is gazdaságos lehet a gyártása. Jelenleg a fotovoltatikus erőművek 5% -a képes ezen az áron villamos energiát termelni, de a völgyidőszaki áramtermelés kihasználása metanolgyártásra lehetőség a többi erőmű számára is. A gazdaságos megújuló metanol gyártását segíti a jelenleg nagy kereslettel bíró, melléktermékként keletkező oxigén befogása és értékesítése. További lehetőség a gazdasági ösztönzők, támogatások alkalmazása.

## 6.2. Javaslatok

J<sub>1</sub>: A metanolgazdasághoz, az energiatárolás technológiai megoldásaihoz gyakran társul az „ígéretes technológia” kifejezés, amely nem alkalmas sem a környezeti fenntarthatóság szolgálatának, sem a gazdaságosság kérdésének kifejezésére. A szubjektív kategóriák nem alkalmasak a jövő technológiai megoldásai közül az emberiség céljait leginkább segítő lehetőségek azonosítására. A környezeti célok számbavételére az életciklus-elemzések olyan nemzetközileg elfogadott szabványos módjára van szükség, amelynek alapelemei az átláthatóság és az összehasonlíthatóság. Ez esetben az életciklus-elemzések biztosítják a döntési folyamatok szilárd alapját.

J<sub>2</sub>: Az Európai Unió stratégiájában a hidrogén az integrált energiarendszer dekarbonizációjának kulcsa. Az elemi hidrogén tárolása és szállítása veszélyes, nincs kiforrott technológiája. A kutatások a hidrogén fizikai vagy kémiai megkötése, majd felszabadítása felé fordultak. Ilyen kémiai megkötést jelent a metanol formában történő tárolás. A metanol tehát kettős funkcióval rendelkezik: szén-dioxid-tároló és nagy mennyiségű hidrogén tárolására alkalmas (1 m<sup>3</sup> metanol 99 kg hidrogént tartalmaz). A jövőben a metanolgazdaság gazdaságosságának kérdését nem lehet csupán a fosszilis metanollal szemben vizsgálni. Ha a metanol hidrogéntároló szerepet tölt be, akkor az egyéb hidrogéntároló lehetőségekkel kell összehasonlítani mind a gazdasági vonatkozásokat, mind a környezeti terheket.

J<sub>3</sub>: Magyarország esetében megvalósításra érdemes egy olyan metanolgyártást célzó projekt, amely kihasználja a körkörös gazdaságban és az ipari szimbiózisban rejlő lehetőségeket, s hasznosítja a fotovoltatikus erőművek üzemeltetése során a megtermelt villamos energiát alacsony átvételi ár esetén.

## 7. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A bevezetésben megfogalmazott célkitűzések figyelembevételével, kutatásaim alapján az új és újszerű tudományos eredményeimet az alábbiak szerint összegzem:

1. A kutatás újszerű eredményének tekintem a metanolgazdaság koncepciójának komplex és rendszerszemléletű összefoglalását, az Európai Unió energiastratégiájához és a körkörös gazdasághoz, a klímapolitikai célokhoz való kapcsolódásának strukturált bemutatását a releváns szakirodalom alapján.
2. A metanol gyártásához kapcsolódó LCA-eredmények halmazának harmonizációja és az azt követő elemzése segítségével beazonosítottam a megújuló metanol gyártása környezeti hatásainak fő mozgatórugóit.
3. Meghatároztam a megújuló metanol gyártása alapanyagainak magyarországi előfordulását, a források földrajzi elhelyezkedése és műszaki paraméterek alapján javaslatot tettem egy lehetséges metanol üzem építésének helyére.
4. Magyarország primer energia- és kiemelten a villamosenergia-felhasználásának és termelésének, valamint az előrevetített változásoknak a figyelembe vételével meghatároztam a metanolgyártás lehetőségeit.
5. Bizonyítottam, hogy a metanol hidrogéneken keresztül történő energiatárolási szerepe meghatározza a metanolgazdasághoz kapcsolódó gazdaságossági számítások alapvetéseit.



## 8. ÖSSZEFOGLALÁS

Az emberiség történelme rendkívül szoros kapcsolatban áll az energiahordozókkal, az azoktól való függésünk több évezredes. Az emberiség a természettől kapja az energiát, amelyet felhasznál, tárol vagy átalakít. A jelenlegi energiaszükséglet fedezése jellemzően fosszilis források felhasználásával történik, amelynek következménye a légköri szén-dioxid-koncentráció növekedése. Az antropogén tevékenységeket kíséri az üvegházhatású gázok kibocsátása, melyek a klímaváltozásért felelősök. A globális felmelegedés ellen hat az üvegházhatást okozó gázok, különösen a szén-dioxid kibocsátásának, illetve légköri koncentrációjának csökkentése, valamint a fosszilis tüzelőanyagok helyettesítése. A globális energiafogyasztás folyamatosan növekedik, ezért a klímaváltozás elleni fellépésben kiemelt szerepe van, hogy az energaintenzitás és az energiaellátás szénintenzitása csökkenjen. Ezek a tényezők szükségszerűen generálták az energiaátmenet igényét, s a változás első lépései már tetten érhetők, mint például a megújuló energiaforrások felhasználásának bővülése.

Az Európai Unió energiapolitikai célkitűzése a fenntarthatóságra, a versenyképességre és az ellátás biztonságára fókuszálnak, azaz a szükséges energia fenntartható forrásból származzon, az ellátás biztonsága megvalósuljon, és ne csorbuljon a versenyképesség ágazati szinten sem. Az Európai Bizottság 2019. december 11-én jelentette meg „Az európai zöld megállapodás” című közleményét, amelyhez környezetvédelmi cselekvési program csatlakozik a gyorsabb átmenet megvalósítása érdekében. Az Európai Unió energiapolitikája fejeződik ki a hidrogénstratégiájában és része a körkörös gazdálkodási akciótervnek.

Dolgozatomban vizsgáltam, hogy a metanolgazdaság koncepciója illeszkedik-e az Európai Unió energiapolitikai célkitűzéseire, a körkörös gazdaság megvalósításához. Megállapításom, hogy a megújuló metanol gyártása megfelelő energiaforrás felhasználása esetén környezeti előnyökkel jár, megfelelő alapanyagok használata esetén pedig illeszkedik a körkörös gazdaság céljaihoz.

A metanol előnyös kémiai tulajdonsága, hogy átalakítható olyan termékekké, mint például a műanyagok, amelyhez eddig a kőolaj szolgáltatja az alapanyagot. Sokrétű felhasználhatósága miatt szinte teljes mértékben képes helyettesíteni a kőolajtermékeket, s közben az antropogén szén-, illetve szén-dioxid-felhasználás zárt hurokká alakul.

A metanol felhasználása jármű hajtóanyagként a közlekedési ágazat dekarbonizációjához járul hozzá, amely kiemelkedő jelentőségű, mivel a globális energiafogyasztás mértékének és összetételének fő meghatározója a jövőben a közlekedési ágazat lesz; ennek az ágazatnak az energiaigénye sokkal dinamikusabban növekszik, mint a többi ágazaté.

A metanol szén-dioxid-tároló funkciója mellett nagy mennyiségű hidrogén tárolására is alkalmas (1 m<sup>3</sup> metanol 99 kg hidrogént tartalmaz), így illeszthető az Európai Unió hidrogénstratégiájához. Az energiatárolás kulcsfontosságú tényező a megújuló energiaforrások nagyarányú és dinamikus növekedésű felhasználása folytán, az energiaellátás biztonsága terén.

Értekezésemben beazonosítottam a magyarországi metanolgyártás alapanyagforrásait, vizsgáltam a villamosenergia-szükséglet fedezetét, és javaslatot tettem metanol üzemek lehetséges földrajzi elhelyezkedésére.

A metanolgazdaság gazdaságossági vonatkozásait elemezve, a versenyképes metanolgyártás kulcstényezőjeként a gyártáshoz szükséges villamos energia árat azonosítottam. A megújuló metanol gazdaságosságát meghatározza az anyag felhasználásának módja, azaz a fosszilis forrású metanollal szemben jelenleg szűk paraméterek mellett versenyképes a megújuló metanol, de hidrogéntárolóként alkalmazva az egyik legalacsonyabb költséggel bíró alternatíva.

## 9. SUMMARY

The history of humanity is extremely closely linked to energy carriers, and our dependence on them is for thousands of years. Humanity receives energy from nature, which it uses, stores or transforms. Current energy needs are typically met using fossil fuels, which results in an increase in atmospheric carbon dioxide concentrations. Anthropogenic activities are accompanied by greenhouse gas emissions, which are responsible for climate change. Global warming is counteracted by the reduction of greenhouse gas emissions, in particular carbon dioxide emissions and atmospheric concentrations, as well as the substitution of fossil fuels. Global energy consumption is constantly increasing, so reducing energy intensity and the carbon intensity of energy supply has a key role to play in tackling climate change. These factors have necessarily generated the need for an energy transition, and the first steps in change are already in place, such as the expansion of the use of renewable energy sources.

The European Union's energy policy objectives focus on sustainability, competitiveness and security of supply, i.e., the energy needed shall come from a sustainable source, security of supply shall be achieved, and competitiveness shall be not compromised at sectoral level. On 11<sup>th</sup> December 2019, the European Commission published its communication "European Green Agreement", accompanied by an Environmental Action Program to accelerate the transition. The European Union's energy policy is reflected in its hydrogen strategy and is part of the circular management action plan.

In my dissertation, I examined whether the concept of the methanol economy fits in with the energy policy objectives of the European Union, the realization of the circular economy. I find that the production of renewable methanol has environmental benefits if the right energy source is used, and when used with the right raw materials, it fits the goals of the circular economy.

The advantageous chemical property of methanol is that it can be converted into products such as plastics for which petroleum has so far provided the raw material. Due to its versatility, it can almost completely replace petroleum products, while the use of anthropogenic coal and carbon dioxide is transformed into a closed loop.

The use of methanol as a vehicle fuel contributes to the decarbonisation of the transport sector, which is of paramount importance as the main determinant of the level and composition of global energy consumption in the future will be the transport sector, the energy demand of this sector is growing much more dynamically than that of other sectors.

In addition to its carbon dioxide storage function, methanol is also suitable for storing large amounts of hydrogen (1 m<sup>3</sup> of methanol contains 99 kg of hydrogen), so it can be adapted to the European Union's hydrogen strategy. Energy storage is a key factor in the security of energy supply due to the large-scale and dynamic use of renewable energy sources.

In my dissertation, I identified the raw material sources of methanol production in Hungary, examined the coverage of electricity demand, and made a proposal for the possible geographical location of methanol plants.

Analysing the economic aspects of the methanol economy, I identified the price of electricity needed for production as a key factor in competitive methanol production. The economics of renewable methanol are determined by the way the material is used, i.e., renewable methanol is currently competitive with fossil source methanol under tight parameters but using hydrogen as a reservoir is one of the lowest cost alternatives.

## 10. MELLÉKLETEK

### M1. Irodalomjegyzék

1. AL-KALBANI, H., XUAN, J., GARCÍA, S., & WANG, H. (2016): Comparative energetic assessment of methanol production from CO<sub>2</sub>: Chemical versus electrochemical process. In: *Applied Energy*, 165 1-13.p. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.027>
2. ANDERSSON, J., & GRÖNKVIST, S. (2019): Large-scale storage of hydrogen. In: *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23) 11901-11919.p. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063>
3. ARAYA, S. S., LISO, V., CUI, X., LI, N., ZHU, J., SAHLIN, S. L., JENSEN, S. H., NIELSEN, M. P., & KÆR, S. K. (2020): A review of the methanol economy: The fuel cell route. In: *Energies*, 13(3) 596.p. <https://doi.org/10.3390/en13030596>
4. BAI, A. (2013): A bioetanol és a második generációs biohajtóanyagok. Debrecen: Debreceni Egyetem.
5. BAKOSNÉ BÖRÖCZ, M. (2016): Az életcikluslemzés módszerének használata és a karbonlábnyom számítás alapjai. Gödöllő: Szent István Egyetemi Kiadó. 40 p.
6. BÁRSONY, I. (2020): Fenntarthatóság – fenntartásokkal. In: *Magyar Tudomány*, 181(7) 948–967.p. <https://doi.org/10.1556/2065.181.2020.7.12>
7. BEHRENS, M., STUDDT, F., KASATKIN, I., KÜHL, S., HÄVECKER, M., ABILD-PEDERSEN, F., ZANDER, S., GIRGSDIES, F., KURR, P., KNIEP, B. L., TOVAR, M., FISCHER, R. W., NØRSKOV, J. K., & SCHLÖGL, R. (2012): The active site of methanol synthesis over Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> industrial catalysts. In: *Science*, 336(6083) 893-897.p. <https://doi.org/10.1126/science.1219831>
8. BOSSEL, U. (2006): Does a hydrogen economy make sense? In: *Proceedings of the IEEE*, 94(10) 1826–1837.p. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.883715>
9. BRYNOLF, S., FRIDELL, E., & ANDERSSON, K. (2014): Environmental assessment of marine fuels: Liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. In: *Journal of Cleaner Production*, 74 1-10.p. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.052>
10. BUDDENBERG, T., BERGINS, C., & SCHMIDT, S. (2016): Power to fuel as a sustainable business model for cross-sectorial energy storage in industry and power plants. 5th Conference of Carbon Dioxide as a Feedstock for Fuels, Chemistry and Polymers
11. BÜKI G. (2009): Falufűtéssel a vidékfejlesztésért – Programjavaslat a biomassza hatékony energetikai hasznosítására. – Előadás. Energiapolitikai Hétfő Esték, 2009. december 14. Budapest.
12. CHAPLIN, A. G. (2013): Renewable Methanol: An Analysis of Technological Potentials in Light of the EU Biofuels Policy Objectives of Greenhouse Gas Savings, Security of Supply and Employment, Aalborg University, 2013. [https://projekter.aau.dk/projekter/files/77407997/Masters\\_Thesis\\_AGC.pdf](https://projekter.aau.dk/projekter/files/77407997/Masters_Thesis_AGC.pdf). Lekérdezés időpontja: 2021.04.10.
13. CHATTERTON, C. (2019): “Methanol as a vessel fuel and energy carrier”, Methanol Institute, presentation to the International Tanker Technical Forum, Singapore, 12 September, <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2019/09/Methanol-as-a-vessel-fuel-and-energy-carrier.pdf>. Keresőprogram: Google, Kulcsszavak: e-methanol, fuel. Lekérdezés időpontja: 2019. 09. 30.

14. DAVID, M., OCAMPO-MARTÍNEZ, C., & SÁNCHEZ-PEÑA, R. (2019): Advances in alkaline water electrolyzers: A review. In: *Journal of Energy Storage* 23. 392–403.p. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.001>
15. DEKKER, E & LANTING, K. (2009): Biomethanol as a second-generation biofuel for transportation. *Biofuels Technology*. [https://demoplants21.best-research.eu/img/files/related\\_publications/201/201\\_2009-03-16-103400\\_related\\_publications.pdf](https://demoplants21.best-research.eu/img/files/related_publications/201/201_2009-03-16-103400_related_publications.pdf). Keresőprogram: Google, Kulcsszavak:biomethanol, BioMCN. Lekérdezés időpontja: 2018. 04. 23
16. DEMIR, M. E., & DINCER, I. (2018): Cost assessment and evaluation of various hydrogen delivery scenarios. In: *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(22) 10420-10430p. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.002>
17. DIAS, V., POCHET, M., CONTINO, F., & JEANMART, H. (2020): Energy and Economic Costs of Chemical Storage. In: *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6 21.p. <https://doi.org/10.3389/fmech.2020.00021>
18. DINYA, L. (2007): Fenntartható energiagazdálkodás – ökoenergetika.In: „*Ma & Holnap*”, VII(3) 26-29.p.
19. DINYA, L. (2010): Biomassza-alapú energiatermelés és fenntartható energiagazdálkodás. In: *Magyar Tudomány*, 2010(8) 912-925.p.
20. DINYA, L. (2018): Biomassza-alapú energiatermelés és fenntartható energiagazdálkodás: a múlt és a jövő. In: *Magyar Tudomány*, 179(8) 1184–1196.p.
21. DOWSON, G. R. M., & STYRING, P. (2017): Demonstration of CO<sub>2</sub> conversion to synthetic transport fuel at flue gas concentrations. In: *Frontiers in Energy Research*, 5(OCT). <https://doi.org/10.3389/fenrg.2017.00026>
22. EICHLER, P., SANTOS, F., TOLEDO, M., ZERBIN, P., SCHMITZ, G., ALVES, C., RIES, L., & GOMES, F. (2015): Produção do biometanol via gaseificação de biomassa lignocelulósica. *Química Nova*, 38(6) 828-835p. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150088>
23. ELIA, V., GNONI, M. G., & TORNESE, F. (2017): Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. In: *Journal of Cleaner Production*, 142(4) 2741-2751.p. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.196>
24. IRENA (2020): Renewable Power Generation Costs in 2019. <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>
25. IRENA AND METHANOL INSTITUTE (2021): Innovation Outlook : Renewable Methanol, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
26. FARAGÓ, T. (2016): A párizsi klímátárgyalások eredményei. In: *Magyar Energetika*, 2016(1) 8–12.p.
27. FARKAS, I. (2010): A napenergia hasznosításának hazai lehetőségei. In: *Magyar Tudomány* 2010(8) 237-247.p.
28. FISCHER, G., PRIELER, S., VAN VELTHUIZEN, H., LENSINK, S. M., LONDO, M., & DE WIT, M. (2010): Biofuel production potentials in Europe: Sustainable use of cultivated land and pastures. Part I: Land productivity potentials. In: *Biomass and Bioenergy*, 34(2) 159-172.p. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.07.008>
29. FOUQUET, R. (2011): A brief history of energy. In J. Evans & L. C. Hunt (Eds.), *International handbook on the economics of energy Cheltenham*, UK: Edward Elgar Publishing. 848 p.

30. GARROW, T.(2015): A methanol economy based on renewable resources. In: *The McGill Green Chemistry Journal*. 1 87-90.p.
31. GERGELY, S. & MAGDA, S. (2011): Zöldenergia, klíma, társadalom. In: *Gazdálkodás*, 55(6), 566-574.p.
32. GHISELLINI, P., CIALANI, C., & ULGIATI, S. (2016): A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. In: *Journal of Cleaner Production*, 114 11– 32. p. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
33. GKM 2008: Stratégia a magyarországi megújuló energiaforrások felhasználásának növelésére 2008-2020. Budapest, 99 p.
34. GOGATE, M. R. (2019): Methanol-to-olefins process technology: current status and future prospects. In: *Petroleum Science and Technology*, 37(5) 559-565.p. <https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1555589>
35. GONZÁLEZ-APARICIO, I., PÉREZ-FORTES, M., ZUCKER, A., & TZIMAS, E. (2017): Opportunities of Integrating CO<sub>2</sub> Utilization with RES-E: A Power-to-Methanol Business Model with Wind Power Generation. In: *Energy Procedia*, 114 6905-6918.p. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1833>
36. GONZÁLEZ-GARAY, A., FREI, M. S., AL-QAHTANI, A., MONDELLI, C., GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G., & PÉREZ-RAMÍREZ, J. (2019): Plant-to-planet analysis of CO<sub>2</sub>-based methanol processes. In: *Energy and Environmental Science*, 12(12) 3425- 3436.p. <https://doi.org/10.1039/c9ee01673b>
37. GUINÉE, J.B. (2002): Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, Boston. 692 p.
38. GÜLLÜ, D., & DEMIRBAŞ, A. (2001): Biomass to methanol via pyrolysis process. In: *Energy Conversion and Management*, 42(11) 1349–56. p. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00126-6)
39. GYURICZA, CS. (2010): Energia biomasszából: esély vagy átok? In: *Agrofórum: a növényvédők és növénytermesztők havilapja*, 21(5) 68-72p.
40. HAJDÚ, J. (2006): Mezőgazdasági eredetű biomasszák energetikai hasznosítása Magyarországon. In: *Bioenergia*, 1(1) 9.p.
41. HAJDÚ J. (Szerk.) (2009): Alternatív energiatermelés a gyakorlatban. Gödöllő: Szent István Egyetemi Kiadó, 171 p.
42. HASEGAWA, F., YOKOYAMA, S., & IMOU, K. (2010): Methanol or ethanol produced from woody biomass: Which is more advantageous? In: *Bioresource Technology*, 101 109.111.p. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.008>
43. HE, J., & JANÁKY, C. (2020): Recent Advances in Solar-Driven Carbon Dioxide Conversion: Expectations versus Reality. In: *ACS Energy Letters*, 5(6) 1996-2014.p. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.0c00645>
44. HEATH, G. A., & MANN, M. K. (2012): Background and Reflections on the Life Cycle Assessment Harmonization Project. In: *Journal of Industrial Ecology*, 16. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00478.x>
45. HELANDER, H., PETIT-BOIX, A., LEIPOLD, S., & BRINGEZU, S. (2019): How to monitor environmental pressures of a circular economy: An assessment of indicators. In: *Journal of Industrial Ecology*, 23(5) 1278-1291.p. <https://doi.org/10.1111/jiec.12924>

46. HOPPE, W., THONEMANN, N., & BRINGEZU, S. (2018): Life Cycle Assessment of Carbon Dioxide-Based Production of Methane and Methanol and Derived Polymers. In: *Journal of Industrial Ecology*, 22(2) 327-340.p. <https://doi.org/10.1111/jiec.12583>
47. HOU, M., CHEN, L., GUO, Z., DONG, X., WANG, Y., & XIA, Y. (2018): A clean and membrane-free chlor-alkali process with decoupled Cl<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>/NaOH production. In: *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-02877-x>
48. HWANG, I. Y., LEE, S. H., CHOI, Y. S., PARK, S. J., NA, J. G., CHANG, I. S., KIM, C., KIM, H. C., KIM, Y. H., LEE, J. W., & LEE, E. Y. (2014): Biocatalytic conversion of methane to methanol as a key step for development of methane-based biorefineries. In: *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24(12) 1597–1605.p. <https://doi.org/10.4014/jmb.1407.07070>
49. KAYA, Y., (1990): Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios. Paper presented to the IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, Paris.
50. KERÉKES, S. (2007): A környezetgazdaságtan alapjai. Budapest: AULA. 238 p.
51. KESZI SZEREMLEI, A., & MAGDA, R. (2015): Sustainable Production and Consumption. In: *Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development*, 4 (2) 57–61.p.
52. KHAREL, S., & SHABANI, B. (2018): Hydrogen as a long-term large-scale energy storage solution to support renewables. In: *Energies*, 11(10) 2825. <https://doi.org/10.3390/en1102825>
53. KIM, J.; HENAO, C. A.; JOHNSON, T. A.; DEDRICK, D. E.; MILLER, J.E.; STECHEL, E. B.; & MARAVELIAS, C. T (2011). Methanol Production from CO<sub>2</sub> Using Solar-Thermal Energy: Process Development and Techno- Economic Analysis. In: *Energy & Environmental Science*, 4 3122–3132.p.
54. KISS E. (2013): Környezetvédelem. [https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013\\_kornyeztvedelem/9\\_1\\_az\\_eletciklus\\_elemzes\\_bemutatasa.html](https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013_kornyeztvedelem/9_1_az_eletciklus_elemzes_bemutatasa.html). Lekérdezés időpontja: 2018.05.20.
55. KORHONEN, J., HONKASALO, A., & SEPPÄLÄ, J. (2018): Circular Economy: The Concept and its Limitations. In: *Ecological Economics*, 143 37–46. p. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
56. KOTHANDARAMAN, J., KAR, S., SEN, R., GOEPPERT, A., OLAH, G. A., & PRAKASH, G. K. S. (2017): Efficient Reversible Hydrogen Carrier System Based on Amine Reforming of Methanol. In: *Journal of the American Chemical Society*, 139(7) 2549–2552. p. <https://doi.org/10.1021/jacs.6b11637>
57. KOYTSOUMPA, E. I., BERGINS, C., & KAKARAS, E. (2018): The CO<sub>2</sub> economy: Review of CO<sub>2</sub> capture and reuse technologies. In: *Journal of Supercritical Fluids*, 132 3-16.p. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.07.029>
58. KUMABE, K., FUJIMOTO, S., YANAGIDA, T., OGATA, M., FUKUDA, T., YABE, A., & MINOWA, T. (2008): Environmental and economic analysis of methanol production process via biomass gasification. In: *Fuel*, 87(7) 1422-1427.p. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.06.008>
59. LARMINIE, J., & DICKS, A. (2013): Fuel cell systems explained: Second edition. In: *Fuel Cell Systems Explained: Second Edition*. <https://doi.org/10.1002/9781118878330>
60. LAW, K., ROSENFELD, J., & JACKSON, M. (2013): Methanol as a Renewable Energy Resource - White Paper, Methanol Institute, Alexandria, 26 p.



időpontja: 2017.12.14.

61. LOVAS R. (szerk.) (2010): Megújuló energiák hasznosítása; Köztisztviselői stratégiai programok, MTA, Budapest. <http://old.mta.hu/data/HIREK/energia/energia.pdf>
62. LONCA, G., MUGGÉO, R., IMBEAULT-TÉTREULT, H., BERNARD, S., & MARGNI, M. (2018): Does material circularity rhyme with environmental efficiency? Case studies on used tires. In: *Journal of Cleaner Production*, 183 424-435.p. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.108>
63. MAGDA, R. (2011a): A zöldgazdaság és a foglalkoztatás. In: *Európai tükrök: az integrációs stratégiai munkacsoport kéthavonta megjelenő folyóirata*, 2011(4) 85-96.p.
64. MAGDA, R. (2011b): A megújuló és a fosszilis energiahordozók, In: *Gazdálkodás*, 55(2) 153-165.p.
65. MAGDA, R., & TOTH, J. (2019): The Connection of the Methanol Economy to the Concept of the Circular Economy and Its Impact on Sustainability. In: *Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development*, 8(2) 58-62.p. <https://doi.org/10.2478/vjbsd-2019-0011>
66. MAINA, S., KACHRIMANIDOU, V., & KOUTINAS, A. (2017): A roadmap towards a circular and sustainable bioeconomy through waste valorization. In: *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 8 18-23.p. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2017.07.007>
67. MARCSÓ Z.(s.n.) :A depóniagáz energetikai hasznosítása BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék,Oktatási segédlet
68. MATZEN, M., & DEMIREL, Y. (2016): Methanol and dimethyl ether from renewable hydrogen and carbon dioxide: Alternative fuels production and life-cycle assessment. In: *Journal of Cleaner Production*, 139 1068–1077. p. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.163>
69. MAYER Z. & KRISTON Á. (2011): Hidrogén és metanol gazdaság, Budapest. EDUTUS Főiskola. 109 p. [https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017\\_31\\_hidrogen\\_es\\_metanol/ch01.html](https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_31_hidrogen_es_metanol/ch01.html). Lekérdezés időpontja: 2018.04.09.
70. MEUNIER, N., CHAUVY, R., MOUHOUBI, S., THOMAS, D., & DE WEIRELD, G. (2020): Alternative production of methanol from industrial CO<sub>2</sub>. In: *Renewable Energy*, 146 1192–1203.p. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.010>
71. MILANI, D., KHALILPOUR, R., ZAHEDI, G., & ABBAS, A. (2015): A model-based analysis of CO<sub>2</sub> utilization in methanol synthesis plant. In: *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 10. 12–22.p. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2015.02.003>
72. MOLNÁR T. G. (2016): Depóniagáz kapcsolt energiatermelésben történő felhasználása adott hulladéklerakó telep esetében. 58th Georgikon Scientific Conference, Keszthely
73. NEWELL, R. G., & RAIMI, D. (2016): Global Energy Outlook 2015. *NATIONAL BUREAU OF ECONOMIC RESEARCH*.
74. OLÁH, GY., & ÁNISZFELD, R. (2002): ÚJ GENERÁCIÓJÚ ÜZEMANYAGCELLÁK, In: *Magyar Tudomány*, 2002(12) 1564-1569.p.
75. OLAH, G. A. (2013): Towards oil independence through renewable methanol chemistry. In: *Angewandte Chemie - International Edition*, 52(1) 104–107.p. <https://doi.org/10.1002/anie.201204995>
76. OLÁH, GY., GOEPPERT A., & SURYA PRAKASH G., K. (2007): Kőolaj és a földgáz után: a metanolgazdaság. Budapest: Better. 370 p.

77. OLAH G. A., GOEPPERT A., & SURYA PRAKASH G., K. (2018): Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy, 3rd ed., Weinheim: Wiley-VCH. 496 p.
78. OTT J et al. (2012): Methanol. In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim: Wiley-VCH.
79. PAKURÁR, M., KHAN, M. A., BENEDEK, A., & OLÁH, J. (2020): The impact of green practices, cooperation and innovation on the performance of supply chains using statistical method of meta-analysis. In: *Journal of International Studies*, 13(3) 111-128.p. <https://doi.org/10.14254/2071-8330.2020/13-3/8>
80. PALEKAR, V. M., JUNG, H., TIEMEY, J. W., & WENDER, I. (1993): Slurry phase synthesis of methanol with a potassium methoxide/copper chromite catalytic system. In: *Applied Catalysis A, General*, 102(1) 13–34.p. [https://doi.org/10.1016/0926-860X\(93\)85152-F](https://doi.org/10.1016/0926-860X(93)85152-F)
81. PÁLFY, M. (2017): A napenergia fotovillamos hasznosítása. In: *Magyar Tudomány*, 2017(5) 532-539.p.
82. PAN, S. Y., DU, M. A., HUANG, I. TE, LIU, I. H., CHANG, E. E., & CHIANG, P. C. (2015): Strategies on implementation of waste-to-energy (WTE) supply chain for circular economy system: a review. In: *Journal of Cleaner Production*, 108 409–421.p. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.124>
83. PÁPAY, J. (2015): Konvencionális és nem konvencionális kőolaj- és földgáztermelő eljárások. In: *Magyar Tudomány*, 2015(11) 1285-1294.p.
84. PAULI G. (2010): A Kék Gazdaság - 10 év - 100 innováció - 100 millió munkahely. Pécs: PTE KTK. 372 p.
85. PÉREZ-FORTES, M., & TZIMAS, E. (2016): Techno-economic and environmental evaluation of CO<sub>2</sub> utilisation for fuel production. Synthesis of methanol and formic acid. In: *Scientific and Technical Research Series*.
86. PETERS, G. P., ANDREW, R. M., CANADELL, J. G., FUSS, S., JACKSON, R. B., KORSBAKKEN, J. I., LE QUÉRÉ, C., & NAKICENOVIC, N. (2017): Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement. In: *Nature Climate Change*, 7(2) 118–122.p. <https://doi.org/10.1038/nclimate3202>
87. POPP, J. (2014): Bioenergia az energiaellátásban. In: *Gazdálkodás*, 57(5) 419-435p.
88. POPP, J., KOVÁCS, S., OLÁH, J., DIVÉKI, Z., & BALÁZS, E. (2021): Bioeconomy: Biomass and biomass-based energy supply and demand. In: *New Biotechnology*, 60 76–84.p. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.10.004>
89. PRENTICE, I. C., HEIMANN, M., & SITCH, S. (2000): The carbon balance of the terrestrial biosphere: Ecosystem models and atmospheric observations. In: *Ecological Applications*, 10(6) 1553-1573.p. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[1553:TCBOTT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[1553:TCBOTT]2.0.CO;2)
90. RENÓ, M. L., LORA, E. E., VENTURINI, O. J., & PALACIO, J. C. (2009): 20th International Congress of Mechanical Engineering, November 15-20, 2009, Gramado, RS, Brazil Brazil
91. RIVAROLO, M., BELLOTTI, D., MAGISTRI, L., & MASSARDO, A. F. (2016): Feasibility study of methanol production from different renewable sources and thermo-economic analysis. In: *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4) 2105–2116.p. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.128>
92. SANTALA, I., WEINS, N. W., & SILVA, C. L. DA. (2017): Global Tendencies in Waste Management Considering Circular Economy Principles. In: ANAIS DO 8º FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba, de 12 a 14 de junho de 2017.

- <http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/view/280/0>. Lekérdezés időpontja: 2018.10.10.
93. SHIH, C. F., ZHANG, T., LI, J., & BAI, C. (2018): Powering the Future with Liquid Sunshine. In: *Joule*, 2(10) 1925-1949.p. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.08.016>
94. SMALLEY, R. E. (2005): Future global energy prosperity: The terawatt challenge. In: *MRS Bulletin*, 30(6) 412-417.p. <https://doi.org/10.1557/mrs2005.124>
95. STERNBERG, A., JENS, C. M., & BARDOW, A. (2017): Life cycle assessment of CO<sub>2</sub>-based C1-chemicals. In: *Green Chemistry*, 19(9) 2244–2259.p. <https://doi.org/10.1039/c6gc02852g>
96. STENGLER, E.(2016): Circular Economy and Energy Union, 8th CEWEP Congress - 16th June 2016 in Rotterdam. <http://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2016/07/E.-Stengler-Circular-Economy-and-Energy-Union.pdf>. Lekérdezés időpontja: 2018.05.10.
97. STOCKS, M., STOCKS, R., LU, B., CHENG, C., & BLAKERS, A. (2021): Global Atlas of Closed-Loop Pumped Hydro Energy Storage. In: *Joule*, 5(1) 270–284.p. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.11.015>
98. STYRING P. (2019): Carbon Dioxide Utilization as a Mitigation Tool, 527-551.p. In: LETCHER T. M. (Szerk.) *Managing Global Warming An Interface of Technology and Human Issues*, Academic Press, 804 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00018-1>
99. SUSHKEVICH, V. L., PALAGIN, D., RANOCCHIARI, M., & VAN BOKHOVEN, J. A. (2017): Selective anaerobic oxidation of methane enables direct synthesis of methanol. In: *Science*, 356(6337) 523–527p. <https://doi.org/10.1126/science.aam9035>
100. SZALAY, D. (2018): Energetikai célú dendromassza termesztés és hasznosítás lehetséges szerepe a lignocellulóz biohajtóanyag üzemek alapanyag ellátásában. Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében, Soproni Egyetem Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola
- 101.SZENDREI, J., GRASSELLI, G., & SZŰCS, E. (2016): A szalma, mint mezőgazdasági melléktermék energiahasznosítása In: *ÉRTÉKÁLLÓ ARANYKORONA* 16 25-26. p.
- 102.SZLÁVIK, J. (2007): Környezet-gazdaságtan. Budapest: TYPOTEX. 260 p.
- 103.SZLOVÁK, S., TÓTH, J. (2018): POTENTIAL OF PRODUCTION OF FIRST AND SECOND GENERATION BIOETHANOL – HUNGARIAN ASPECTS. In: XVI. Nemzetközi Tudományos Napok : „Fenntarthatósági kihívások és válaszok” - A Tudományos Napok Publikációi Gyöngyös, Magyarország EKE Líceum Kiadó. 1713-1721. p.
- 104.SZUNYOG, I. (2008): Elméleti biogáz potenciál – Egy európai uniós kutatási projekt részeredményei. In. *Energiagazdálkodás*, 49 (2) 13-18.p.
- 105.TAKÁCS, I., NAGY-KOVÁCS. E., & MARSELEK, S. (2012): A biomassza energiacélú felhasználásának energetikai és gazdasági kritériumai. In: Kis-Simon Tünde, Tóth Éva (szerk.). "A mezőgazdaságtól a vidékgazda(g)ságig" 54. Georgikon Napok. Keszthely. p. 465-475.
- 106.TAMÁS, J., & BLASKÓ, L. (2008): Environmental management. Debrecen, Debreceni Egyetem a TÁMOP 4.1.2 pályázat keretein belül
- 107.THONEMANN, N., & MAGA, D. (2020): Life Cycle Assessment of Steel Mill Gas-Based Methanol Production within the Carbon2Chem® Project.In: *Chemie-Ingenieur-Technik*, 92(10) 1425–1430.p. <https://doi.org/10.1002/cite.202000051>
- 108.TIHANYI, L., & CSETE, J. (2012): A CO<sub>2</sub> lánc – CO<sub>2</sub> leválasztása, szállítása és tárolása. In: *Műszaki Földtudományi Közlemények*, 83 (1) 221–235.p.
- 109.TÓTHNÉ SZITA, K. (2008): ÉLETCIKLUS-ELEMZÉS, ÉLETCIKLUS HATÁSÉRTÉKELÉS. Miskolc: Miskolci Egyetemi Kiadó.

110. TÓTHNÉ SZITA, K. (2017): Életciklus vizsgálatok a körforgásos gazdaság támogatására. In: *Mezőgazdasági Technika*, LVIII.(5) 10-11.p.
111. TUCKER I. (2019): *Microeconomics for today*. Cengage Learning ISBN10: 1-337-61306-1
112. TUKKER, A., HUPPES, G., GUINÉE, J., HEIJUNGS, R., DE KONING, A., VAN OERS, L., SUH, S., GEERKEN, T., VAN HOLDERBEKE, M., JANSEN, B., & NIELSEN, P. (2006): *Environmental Impact of Products (EIPRO): Analysis of the Life Cycle Environmental Impacts Related to the Final Consumption of the EU-25*. JRC, IPTS, ESTO. Seville. 139 p.
113. VADÁSZ, N. ZS. (2016): Lassan belépünk a körbe. In: *Zöld Ipar Magazin*, 16 (6) 20-21.p.
114. VERCALSTEREN, A., CHRISTIS, M., & VAN HOOFF, V. (2018): *Indicators for a Circular Economy*. SUMMA CIRCULAR ECONOMY POLICY RESEARCH CENTRE [https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/summa\\_-\\_indicators\\_for\\_a\\_circular\\_economy.pdf](https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/summa_-_indicators_for_a_circular_economy.pdf). Lekérdezés időpontja: 2021.03.10.
115. WARNER, E., HEATH, G.A., & O'DONOUGHUE, P., (2010): *Harmonization of energy generation life cycle assessments (LCA)*. FY2010 LCA Milestone Report, Colorado.
116. WINTHER, K. (2019), *Methanol as motor fuel*, Danish Technological Institute Teknologiparken Kongsvang Allé 29 8000 Aarhus C Transport og Elektriske Systemer ISBN: J.nr. 64018-0719, p 59.
117. YAO, Y., CHANG, Y., HUANG, R., ZHANG, L., & MASANET, E. (2018): Environmental implications of the methanol economy in China: well-to-wheel comparison of energy and environmental emissions for different methanol fuel production pathways. In: *Journal of Cleaner Production*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.232>
118. YMERI, P., GYURICZA, C., & FOGARASSY, C. (2020): Farmers' attitudes towards the use of biomass as renewable energy-A case study from Southeastern Europe. In: *Sustainability (Switzerland)*, 12(10) 4009 p. <https://doi.org/10.3390/SU12104009>
119. ZHANG, H., WANG, L., VAN HERLE, J., MARÉCHAL, F., & DESIDERI, U. (2019): Techno-economic optimization of CO<sub>2</sub>-to-methanol with solid-oxide electrolyzer. In: *Energies*, 12(19) 3742.p. <https://doi.org/10.3390/en12193742>
120. ZIMMERMANN, A., MÜLLER, L. J., & MARXEN, A. (2018): *Techno-Economic Assessment & Life-Cycle Assessment Guidelines for CO<sub>2</sub> Utilization*. CO<sub>2</sub>Chem Media and Publishing Ltd. ISBN 978-1-9164639-0-5 DOI: 10.3998/2027.42/145436.
121. ZINK, T., & GEYER, R. (2017). Circular Economy Rebound. In: *Journal of Industrial Ecology*, 21(3). <https://doi.org/10.1111/jiec.12545>

### Internetes források

1. ALBERTA PACIFIC (2020): <https://alpac.ca/products/bio-methanol/> Lekérdezés időpontja: 2020.11.14.
2. BP (2018): BP Outlook 2018: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf>. Lekérdezés időpontja: 2018.05.02.
3. BP (2020):

- <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf> Lekérdezés időpontja: 2021.02.14.
4. BASF (2018): <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2018/11/p-18-370.html> Lekérdezés időpontja: 2021.02.14.
  5. BLUE FUEL ENERGY (2018): <http://bluefuelenergy.com/>. Lekérdezés időpontja: 2018.05.02.
  6. BORSOD- ABAÚJ- ZEMPLÉN MEGYEI KORMÁNYHIVATAL (2016): Visontai Bioetanol Fejlesztő Kft. részére a bioetanol üzem működéséhez kiadott módosított 1497-11/2013. számú egységes környezethasználati engedély módosítása <http://emiktf.hu/Ugyfelinf/dontesek/doc/BO-16-10583-9-2016.pdf> Lekérdezés időpontja: 2021.02.12.
  7. CHEMREC (2017): [www.chemrec.se](http://www.chemrec.se). Lekérdezés időpontja: 2017.11.14.
  8. CHINESE ACADEMY OF SCIENCE (2020): [http://english.cas.cn/newsroom/research\\_news/chem/202001/t20200113\\_229335.shtml](http://english.cas.cn/newsroom/research_news/chem/202001/t20200113_229335.shtml) Lekérdezés időpontja: 2020.11.22.
  9. CLIMEWORKS (2018). Capturing CO<sub>2</sub> From the Air: Our Technology Zurich: Climeworks. Lekérdezés időpontja: 2020.11.22.
  10. CRI (2017): <http://carbonrecycling.is/> Lekérdezés időpontja: 2017.11.14.
  11. DNV GL (2021): “Power-to-gas in a decarbonized European energy system based on renewable energy sources” [http://www.afhypac.org/documents/European%20Power%20to%20Gas\\_White%20Paper.pdf](http://www.afhypac.org/documents/European%20Power%20to%20Gas_White%20Paper.pdf) Lekérdezés időpontja: 2021.02.22.
  12. EMBER (2020): <https://ember-climate.org/project/eu-power-sector-2020/> Lekérdezés időpontja: 2021.02.22.
  13. ENERKEM (2020): <https://enerkem.com/>. Lekérdezés időpontja: 2020.11.14.
  14. ENI (2021): <https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2020/06/eni-and-nextchem-strengthen-partnership-to-develop-circular-district-technologies.html> Lekérdezés időpontja: 2021.03.05.
  15. EUROBSER’Er (2020): Biogas barometer 2020 <https://www.eurobserv-er.org/> Lekérdezés időpontja: 2021.04.05.
  16. EURÓPAI BIZOTTSÁG. (2005): ZÖLD KÖNYV az energiahatékonyságról avagy többlet kevesebb. <http://eurlex.europa.eu/legalcontent/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:52005DC0265&qid=1495815557788&from=HU> Lekérdezés időpontja: 2017.05.10.
  17. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2006a): ZÖLD KÖNYV Európai stratégia az energiaellátás fenntarthatóságáért, versenyképességéért és biztonságáért. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX:> Lekérdezés időpontja: 2017.05.10.

18. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2006b): Energiahatékonysági cselekvési terv: a lehetőségek kihasználása.  
<http://eurlex.europa.eu/legalcontent/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006DC0545&rid=13>.  
Lekérdezés időpontja: 2017.05.10.
19. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2008): Az EU hulladékgazdálkodási jogszabálya. <https://eurlex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=LEGISSUM%3Aev0010>. Lekérdezés időpontja: 2018.05.10.
20. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2010): Energia 2020. A versenyképes, fenntartható és biztonságos energiaellátás és –felhasználás. <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52010DC0639R%2802%29:HU:HTML>. Lekérdezés időpontja: 2017.05.17.
21. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2015): Az anyagkörforgás megvalósítása – a körforgásos gazdaságra vonatkozó uniós cselekvési terv. Brüsszel. 2015.12.2. COM(2015) 614 p.
22. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2016a): [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Europe\\_2020\\_indicators\\_-\\_climate\\_change\\_and\\_energy](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Europe_2020_indicators_-_climate_change_and_energy). Lekérdezés időpontja: 2017.05.10.
23. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2016b): Integrált Termékpolitika, Integrated Product Policy 1. <http://ec.europa.eu/environment/ipp/>. Lekérdezés időpontja: 2018.05.20.
24. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2017): Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions - the role of waste-to-energy in the circular economy. COM/2017/0034 Final. 2017. 1. <http://ec.europa.eu/environment/waste/waste-to-energy.pdf>. Lekérdezés időpontja: 2017.05.10.
25. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2018): A körforgásos gazdaság nyomonkövetési keretrendszere. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2018:0029:FIN:HU:PDF>  
Lekérdezés időpontja: 2021.02.12.
26. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2019a), Climate Strategies and Targets. [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en)  
Lekérdezés időpontja: 2021.02.21.
27. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2019b): Az európai zöld megállapodás  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>  
Lekérdezés időpontja: 2021.02.12.
28. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2020a): Europe 2020 headline indicators Eurostat 2021, [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/t2020\\_31/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/t2020_31/default/table?lang=en) Lekérdezés időpontja: 2021.04.12.

29. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2020b) 14.10.2020 COM(2020) 652 final  
: <https://ec.europa.eu/environment/pdf/8EAP/2020/10/8EAP-draft.pdf> Lekérdezés időpontja: 2021.04.12.
30. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2020c): „Európa nagy pillanata: Helyreállítás és felkészülés – a jövő generációért”, COM(2020) 456 final
31. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2020d): Hidrogénstratégia a klímasemleges Európáért, COM(2020) 301 final
32. EURÓPAI BIZOTTSÁG (2020e); COM(2020) 98 final of 11.3.2020)  
[https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098R\(01\)&qid=1615908565048](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098R(01)&qid=1615908565048) Lekérdezés időpontja: 2021.04.12.
33. EURÓPAI PARLAMENT (2015): Körkörös gazdaság: mit jelent, miért fontos és mi a haszna?  
1. <http://www.europarl.europa.eu/news/hu/headlines/priorities/society/20151201STO05603/korkoros-gazdasag-mit-jelent-miert-fontos-es-mi-a-haszna.> Lekérdezés időpontja: 2018.05.22.
34. EURÓPAI PARLAMENT (2018): Az üvegházhatású gázok csökkentése az EU-ban: nemzeti célkitűzések 2030-ra.  
<http://www.europarl.europa.eu/news/hu/headlines/society/20180208STO97442/az-uveghazhatasu-gazok-csokkentese-az-eu-ban-nemzeti-celkituzesek-2030-ra.> Lekérdezés időpontja: 2018.05.22.
35. EURÓPAI TANÁCS (2014): <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-169-2014-INIT/hu/pdf> Lekérdezés időpontja: 2018.05.22.
36. EUROSTAT (2018): Municipal waste statistics. [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics). Lekérdezés időpontja: 2018.05.22.
37. EUROSTAT (2020a): Waste statistics [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics) Lekérdezés időpontja: 2021.01.22.
38. EUROSTAT (2020b): Renewable energy statistics. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable\\_energy\\_statistics#Share\\_of\\_renewable\\_energy\\_more\\_than\\_doubled\\_between\\_2004\\_and\\_2019](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics#Share_of_renewable_energy_more_than_doubled_between_2004_and_2019) Lekérdezés időpontja: 2021.01.22.
39. EUROSTAT (2021a): Europe 2020 indicators  
[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/t2020\\_31/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/t2020_31/default/table?lang=en)  
Lekérdezés időpontja: 2021.04.14.
40. EUROSTAT (2021b): Electricity prices components for non-household consumers  
[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg\\_pc\\_205\\_c/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_205_c/default/table?lang=en)  
Lekérdezés időpontja: 2021.05.12.

41. EURÓPAI SZENNYEZŐANYAG-KIBOCSÁTÁSI ÉS -SZÁLLÍTÁSI NYILVÁNTARTÁS (2017): <https://prtr.eea.europa.eu/#/home> Lekérdezés időpontja: 2021.03.28.
42. EXXONMOBIL (2017): 2017 Outlook for Energy: A View to 2040. 1.<http://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/outlook-for-energy/2017/2017-outlook-for-energy.pdf>. Lekérdezés időpontja: 2018.05.10.
43. HVG (2013): [https://hvg.hu/cegauto/20131027\\_Nobeldijas\\_tipp\\_Magyarország\\_uj\\_uzemanya](https://hvg.hu/cegauto/20131027_Nobeldijas_tipp_Magyarország_uj_uzemanya) Lekérdezés időpontja: 2021.03.28.
44. HYDROGEN ROADMAP EUROPE (2019). Luxemburg, Publications Office of the EU. 75 p. doi: :10.2843/341510. <https://op.europa.eu/hu/publication-detail/-/publication/0817d60d-332f-11e9-8d04-01aa75ed71a1> Lekérdezés időpontja: 2021.01.22.
45. IEA (2019): World total energy supply by source, 1971-2018, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-total-energy-supply-by-source-1971-2018> Lekérdezés időpontja: 2021.01.22.
46. IRENA (2020): Renewable Power Generation Costs in 2019. [www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019](http://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019) Lekérdezés időpontja: 2021.03.12.
47. IRP (2019). Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook> Lekérdezés időpontja: 2021.03.07.
48. ISO 14040:2006 Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework. 1.[http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail?csnumber=37456](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=37456). Lekérdezés időpontja: 2018.05.18.
49. ISO 14044:2006 Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines. [http://www.iso.org/iso/iso\\_catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=38498](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38498). Lekérdezés időpontja: 2018.05.18.
50. ITM (2020): EGYSEGES HULLADÉKGAZDÁLKODÁSI INFORMÁCIÓS RENDSZER. <http://web.okir.hu/hu/> Lekérdezés időpontja: 2021.03.07.
51. ITM (2021): <https://nkfih.gov.hu/palyazoknak/aktualis-felhivasok/egyeb-tamogatas/karbonmentes-tobblet-villamos-energia-elektrokemiai-tarolasa-2021-211-ek/palyazati-csomag> Lekérdezés időpontja: 2021.05.11.
52. KNOEMA (2020): <https://knoema.com/atlas/topics/Energy/Renewables/Fuel-ethanol-production> Lekérdezés időpontja: 2021.05.02.
53. KSH (2019a): Az egyes hulladékfajták mennyisége a kezelés módja szerint [https://www.ksh.hu/stadat\\_files/kor/hu/kor0029.html](https://www.ksh.hu/stadat_files/kor/hu/kor0029.html) Lekérdezés időpontja: 2021.05.02.



54. KSH (2019b): A fontosabb növények vetésterülete, 2019. június 1. <https://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/gyor/vet/vet1906.pdf> Lekérdezés időpontja: 2021.05.11.
- LOWLANDS METHANOL B.V (2021).: <https://www.renewablemethanol.com/project-sites/> Lekérdezés időpontja: 2021.03.02.
55. MAVIR (2019): A Magyar Villamosenergia- rendszer közép- és hosszú távú forrásoldali kapacitásfejlesztése. [https://www.mavir.hu/documents/10258/15461/Forr%C3%A1selemz%C3%A9s\\_2019.pdf/1a1d0ce9-dd8d-40f5-ce76-ea8cdf5480dd?t=1583315483476](https://www.mavir.hu/documents/10258/15461/Forr%C3%A1selemz%C3%A9s_2019.pdf/1a1d0ce9-dd8d-40f5-ce76-ea8cdf5480dd?t=1583315483476) Lekérdezés időpontja: 2021.05.15.
56. MAVIR (2021): Erőművi termelés tüzelőanyag szerinti bontásban - Nettó üzemirányítási mérés alapján. <https://www.mavir.hu/web/mavir/rendszerterheles> Lekérdezés időpontja: 2021.05.15.
57. MEKH (2021): <http://www.mekh.hu/tizszeresere-nott-a-naperomuvek-beepitett-kapacitasa-ot-ev-alatt-magyarorszagon> Lekérdezés időpontja: 2021.05.23.
58. METHANEX (2021): Methanex Methanol Price Sheet. <https://www.methanex.com/sites/default/files/Mx-Price-Sheet%20-%20Apr%2030%202021.pdf> Lekérdezés időpontja: 2021.05.11.
59. MMSA (2020): <https://www.methanol.org/methanol-price-supply-demand/> Lekérdezés időpontja: 2021.03.18.
60. MOTOR AUTHORITY (2020): [https://www.motorauthority.com/news/1127397\\_review-2021-roland-gumpert-nathalie-price-photos-specs-info](https://www.motorauthority.com/news/1127397_review-2021-roland-gumpert-nathalie-price-photos-specs-info) Lekérdezés időpontja: 2021.04.18.
61. MSZ EN ISO 14040:2006. [https://www.mszt.hu/mszt/portal/user/anon/page/default.psml/js\\_panename/msztStandard\\_Details?cikkszam=141792](https://www.mszt.hu/mszt/portal/user/anon/page/default.psml/js_panename/msztStandard_Details?cikkszam=141792). Lekérdezés időpontja: 2018.05.18.
62. NAPI GAZDASÁG (2013): Két magyar bioetanolgyárat építhet a China NEW Energy. In: *Napi Gazdaság* 2013. november 22-23.
63. NEMZETI ENERGIASZTRATÉGIA 2030 (2012): Budapest. Nemzeti Fejlesztési Minisztérium. Országgyűlési határozat (2011): 77/2011. (X. 14.) OGY határozat a Nemzeti Energiasztratégiáról. <https://mkogy.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a11h0077.OGY> Lekérdezés időpontja: 2018.02.21.
64. NES ENERGY ZRT (2021): <https://nesrt.hu/> Lekérdezés időpontja: 2021.05.03.
65. ORSZÁGOS METEOROLÓGIAI SZOLGÁLAT (2000): [https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag\\_eghajlata/altalanos\\_eghajlati\\_jellemzes/sugarzas/](https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/sugarzas/) Lekérdezés időpontja: 2021.05.03.
66. OUR WORLD IN DATA (2020): <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked> Lekérdezés időpontja: 2021.05.03.

67. PANNONIA BIO ZRT. (2019): Bioetanol gyártási tevékenység teljes körű környezetvédelmi felülvizsgálat (2014-2018.).  
[https://www.kormanyhivatal.hu/download/8/74/85000/TO-04G\\_80\\_03352-M\\_2019-Dokument%C3%A1ci%C3%B3.pdf](https://www.kormanyhivatal.hu/download/8/74/85000/TO-04G_80_03352-M_2019-Dokument%C3%A1ci%C3%B3.pdf) Lekérdezés időpontja: 2021.05.03.
68. PERSTORP (2021):  
[https://www.perstorp.com/en/news\\_center/pressreleases/2020/perstorp\\_producing\\_sustainable\\_methanol](https://www.perstorp.com/en/news_center/pressreleases/2020/perstorp_producing_sustainable_methanol) Lekérdezés időpontja: 2021.05.03.
69. REN21 (2017): Renewables Global Futures Report: Great debates towards 100% renewable energy.  
[http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/10/GFR-Full-Report-2017\\_webversion\\_3.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/10/GFR-Full-Report-2017_webversion_3.pdf). Lekérdezés időpontja: 2017.05.10.
70. REN21 (2020): Renewable energy pathways in road transport (2020)  
<https://www.ren21.net/2020-re-pathways-in-road-transport/> Lekérdezés időpontja: 2021.05.03.
71. SÖDRA (2021): <https://www.sodra.com/sv/se/bioprodukter/biometanol/>  
Lekérdezés időpontja: 2021.04.12.
72. UNITED NATIONS Framework Convention on Climate Change (1997):  
[https://treaties.un.org/doc/Treaties/1998/09/19980921%2004-41%20PM/Ch\\_XXVII\\_07\\_ap.pdf](https://treaties.un.org/doc/Treaties/1998/09/19980921%2004-41%20PM/Ch_XXVII_07_ap.pdf) Lekérdezés időpontja: 2018.05.18.
73. UNITED NATIONS Climate Change Paris Agreement (2016):  
<https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/status-of-ratification>. Lekérdezés időpontja: 2018.05.18.
74. UNITED NATIONS, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Population Prospects 2019: Highlights. ST/ESA/SER.A/423. Lekérdezés időpontja: 2021.02.12.
75. U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (2017): International Energy Outlook 2017 1.  
<https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>. Lekérdezés időpontja: 2018.05.18.
76. VÄRMLANDSMETANOL AB (2017):  
<http://www.varmlandsmetanol.se/About%20the%20Project.htm>. Lekérdezés időpontja: 2017.11.14.
77. WMO (2016): WMO GREENHOUSE GAS BULLETIN.  
[https://library.wmo.int/opac/doc\\_num.php?explnum\\_id=3084](https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3084) Lekérdezés időpontja: 2017.12.14.
78. WMO (2021) <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate> Lekérdezés időpontja: 2021.04.12.

## M2. Ábrajegyzék

1. ábra: Regionális energiafogyasztás 2019-ben .....	12
2. ábra: Az elsődleges energiaellátás alakulása globálisan .....	12
3. ábra: Az elsődleges energiaellátás százalékos megoszlása globálisan .....	13
4. ábra: Egy főre eső energiafogyasztás régióként .....	14
5. ábra: Üvegházhatású gázok légköri koncentrációjának változása .....	15
6. ábra: Az üvegházhatást okozó gázok kibocsátása, EU-28, 1990-2018 .....	19
7. ábra: Elsődleges energiafogyasztás és végső energiafogyasztás, EU-28, 1990-2018.....	20
8. ábra: A megújuló energia részaránya a bruttó végső energiafogyasztásban, EU-28, 2004-2018 .....	21
9. ábra: Európai zöld megállapodás .....	23
10. ábra: A körkörös gazdaság modellje .....	25
11. ábra: Az egy főre jutó települési hulladék mennyisége országonként 2005-ben és 2019-ben...28	
12. ábra: Az EU-28 országainak összesített kommunális hulladékkezelése, egy főre vonatkoztatva 2004 és 2018 között .....	29
13. ábra: A hulladékhierarchia és az energetikai hasznosítási folyamatok .....	30
14. ábra: A Körkörös Gazdaság 2030. évi célkitűzéseinek elérése mellett az energetikai hasznosítás várható aránya és mennyisége .....	30
15. ábra: A szén-dioxid-felhasználás lehetséges folyamatai, termékei .....	36
16. ábra: A globális metanol-felhasználás .....	37
17. ábra: A metanol felhasználásának megoszlása .....	37
18. ábra: Direkt metanollal működő tüzelőanyag-cella felépítése .....	40
19. ábra: A metanol üzemanyagként való felhasználása .....	41
20. ábra: 2050-ben várhatóan 3 óra időtartam alatt felhasznált energia (94 TWh) tárolása akkumulátor, hidrogén és metanol formájában .....	42
21. ábra: A Power-To-X technológiák .....	43
22. ábra: A metanolgazdaság szerepe az antropogén szén ciklusban .....	46
23. ábra: Az életciklus-elemzés (LCA) alapelve .....	50
24. ábra: Az életciklus-elemzés fázisai .....	51
25. ábra: Az életciklus-elemzések harmonizációs folyamata .....	53
26. ábra: Metanol üzem helyének meghatározása .....	54
27. ábra: A keletkezett hulladék mennyisége hulladékaramonként 2004-2019 között (tonna/év)...62	
28. ábra: Az egyes hulladékfajták mennyisége a kezelés módja szerint (ezer tonna), 2004-2019...63	

29. ábra: A termelt depóniagáz és a deponált települési hulladék mennyiségének aránya az EU országokban .....	65
30. ábra: A magyarországi szén-dioxid-kibocsátás szektoronként 1990-2018 között .....	72
31. ábra: A magyarországi szén-dioxid-kibocsátást meghatározó tényezők 1990-2016 között.....	72
32. ábra: A magyar áramtermelés forrás szerinti bontásban, 2000-2020.....	73
33. ábra: A magyar áramtermelés relatív változása forrás szerinti bontásban, 2000-2020.....	74
34. ábra: Téli és nyári bruttó rendszerterhelési csúcsok alakulása .....	75
35. ábra: Az évi átlagos napfénytartam (óra) Magyarországon az 1971-2000 közötti időszak alapján.....	76
36. ábra: Nagyobb magyarországi szén-dioxid-pontforrások elhelyezkedése.....	79
37. ábra: Metanolgyártáshoz kapcsolódó költségek és bevételek.....	84
38. ábra: PV beruházási költség USD/Kw.....	87
39. ábra: PV áramtermelési költség USD/kWh.....	88
40. ábra: Erőművi termelés tüzelőanyag szerinti bontásban - nettó üzemirányítási mérés alapján .....	89

### M3. Táblázatok jegyzéke

1. táblázat: A globális energiafogyasztással kapcsolatos előrejelzések néhány kiemelt adata.....	11
2. táblázat: A megújuló energiaforrásokból származó energia részaránya az energia bruttó végsőfogyasztásában .....	18
3. táblázat: A kommunális hulladék kezelése a tagállamokban .....	26
4. táblázat: A körforgásos gazdaságra vonatkozó mutatók a nyomkövetési keretrendszerben ...	32
5. táblázat: A metanol, az etanol és a benzin tulajdonságainak összehasonlítása .....	38
6. táblázat: A bioüzemanyagok szén-dioxid-megtakarítása .....	38
7. táblázat: Hidrogén és metanol tárolási hatékonyságának összehasonlítása.....	44
8. táblázat: Metanol előállítási módok .....	45
9. táblázat: Biometanolt és e-metanolt előállító projektek .....	47
10. táblázat: A környezeti hatások hatáskategóriái .....	51
11. táblázat: „Well-to-wheel” üvegházhatást okozó gázok kibocsátása .....	56
12. táblázat: Dán elektromos, metanol üzemű és benzin üzemű autók összehasonlítása.....	57
13. táblázat: „Cradle-to-gate”életciklus elemzések eredményei .....	58
14. táblázat: A metanolgyártásban potenciálisan felhasználható mezőgazdasági melléktermékek .....	61
15. táblázat: Depóniagáz, biogázok, földgáz összetétele .....	63
16. táblázat: Biogáz-előállítás egyes EU-tagállamokban 2018 (ktoe-ben) .....	64
17. táblázat: Magyarország elméleti teoretikus, biogáz előállítására alkalmas biomassza potenciálja 2006-ra vonatkoztatva .....	66
18. táblázat: A különböző füstgázok szén-dioxid-tartalma .....	67
19. táblázat: Tervezett bioetanol üzemek .....	69
20. táblázat: Hőerőművek, erőművek által kibocsátott szén-dioxid mennyisége 2017-ben.....	70
21. táblázat: Cementgyárak és mészüzemek által kibocsátott szén-dioxid mennyisége 2017-ben .....	70
22. táblázat: A legnagyobb magyarországi fotovoltatikus erőművek .....	77
23. táblázat: ISD DUNAFERR társaságcsoport által kibocsátott szén-dioxid mennyisége 2017-ben .....	80
24. táblázat: Anyag- és energiaszükséglet a metanolgyártás részfolyamataiban .....	82
25. táblázat: 1 tonna metanol előállításának összesített anyag- és energiaszükséglete ipari forrás felhasználása esetén .....	83
26. táblázat: Szén-dioxid-kibocsátás különböző technológiai utak esetén .....	85

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Elsőként is köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. habil. Magda Róbertnek, hogy biztosította számomra a doktori értekezésem elkészítésének lehetőségét. Hálás vagyok, hogy mindig érezhettem a támogatását és az évek során bármikor fordulhattam hozzá segítségért.

Köszönettel tartozom Dr. Igaz Saroltának önzetlen segítségéért és tanácsaiért. Külön köszönöm, hogy a disszertáció írása közben felmerült technikai problémák megoldásában is a segítségemre volt.

Végezetül szeretném kifejezni köszönetemet mindazoknak, akik a doktori képzésem éveiben mellettem álltak, szakmailag és emberileg segítettek céljaim elérésében.