

Sibalin Iván,<sup>1</sup>  Kátai-Urbán Lajos,<sup>2</sup>  Cimer Zsolt<sup>3</sup> 

# A geomérnökség lehetséges energiaipari-biztonsági vonatkozásai a környezeti fenntarthatóság keretrendszerében

## Potential Energy Industrial Safety Aspects of Geoengineering in the Framework of Environmental Sustainability

*A geomérnökségnek az éghajlatváltozás kezelése és a környezeti fenntarthatóság érdekében történő alkalmazhatósága már évek óta vizsgálatok tárgyát képezi. E technológiák kapcsán felmerült bizonytalanságok azonban még korántsem teszik lehetővé azok széles körű használatát. Erre már számos olyan tudományos és szakmai közlemény is rámutatott, amelyek a geomérnökség környezeti, meteorológiai következményeit elemzik. Tekintettel az energiaágazatnak és az iparbiztonságnak a környezeti fenntarthatóságban betöltött alapvető szerepére, indokolt megvizsgálni a geomérnökségnek az energiaágazat, illetőleg az energetikai rendszerek működésére és biztonságára gyakorolt lehetséges hatásait is.*

**Kulcsszavak:** geomérnökség, energiaipari biztonság, környezeti fenntarthatóság

*The applicability of geoengineering for climate change management and environmental sustainability has been the subject of investigations for years. However, the uncertainties which have arisen in connection with these technologies do not yet allow their widespread use. This has already been pointed out by numerous scientific and professional publications that analyse the environmental and meteorological consequences of geoengineering. Given the fundamental role of the energy sector and industrial safety in the environmental sustainability, it is reasonable to examine the possible effects of geoengineering on the operation and safety of the energy sector and energy systems.*

<sup>1</sup> Jogász, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola, e-mail: [sibalin.ivan@uni-nke.hu](mailto:sibalin.ivan@uni-nke.hu)

<sup>2</sup> Tanszékvezető, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katasztrófavédelmi Intézet Iparbiztonsági Tanszék, e-mail: [katali.lajos@uni-nke.hu](mailto:katali.lajos@uni-nke.hu)

<sup>3</sup> Dékánhelyettes, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víz tudományi Kar, e-mail: [cimer.zsolt@uni-nke.hu](mailto:cimer.zsolt@uni-nke.hu)

**Keywords:** *geoengineering, energy industry safety, environmental sustainability*

## Bevezetés

A geomérnökség a klimatikus problémák kezelésének jelenleg még talán legvitatottabb mesterséges módszere, ugyanis e technológiák hosszabb távú hatásai többnyire még nem tisztázottak. Noha nem kizárt, hogy a geomérnökség kiterjedt alkalmazásával jelentős eredményeket lehet elérni az éghajlatváltozás kezelésében és a környezeti fenntarthatóság folyamatában, egyes vélemények szerint bizonyos geomérnökségi megoldások olyan nem kívánt mellék- vagy kontraproduktív hatásokat generálhatnak, amelyek csak felerősítenék a meglévő környezeti problémákat. Kétségtelen, hogy egy ilyen forгатókönyv – a hatások súlyosságától függően – akár beláthatatlan következményekkel is járhatna bolygónkra, és így a földi élet lényegében valamennyi szegmensére nézve. Mégis, a globális jelentőségű és egyben bizonytalan kimenetelű technológiák alkalmazhatóságát – a minél pontosabb és átfogóbb hatásvizsgálat érdekében – indokolt szakterület- és ágazatspecifikus szempontból is elemezni.

Az alábbi közlemény a geomérnökségnek az energiaágazat biztonságos működésére gyakorolt – aktuális ismereteink szerinti – lehetséges hatásait igyekszik bemutatni, elsősorban az iparbiztonság perspektívájából. A geomérnökség energiaipari-biztonsági szempontú elemzése három okból javasolt. Egyrészt az energiaágazat balesetei és üzemzavarai együttesen jelentős környezetszennyező hatásúak, amelyek akadályozzák a környezeti fenntarthatóság folyamatát, azaz éppen azt gátolják, amihez a sikeres geomérnökség hozzá kíván járulni. Másrészt az energetikai rendszerek üzembiztos működését jelentős mértékben veszélyeztethetik a szélsőséges környezeti körülmények, amelyeket az esetlegesen sikertelen geomérnökség mellék- vagy kontraproduktív hatásai felerősíthetnek. Ehhez kapcsolódóan kiemelendő, hogy az energiaellátás hosszabb-rövidebb ideig tartó kiesése gyakorlatilag valamennyi más ágazat működésére is hatással van, ami jól mutatja az energiaágazat érzékenységét és fokozott védelmének szükségességét. Harmadrészt pedig, mivel mind a geomérnökség, mind az energiaipari-biztonság közvetlenül vagy közvetve, egyebek mellett a környezeti fenntarthatóság megvalósítását is szolgálja, ezért célszerű megvizsgálni e két terület kapcsolódási pontjait.

## Geomérnökség és környezeti fenntarthatóság

### Az éghajlatváltozás mérséklésének mesterséges eszközei

Korunk globális éghajlatváltozási tendenciái és azokból fakadó környezeti problémái kezelésének, mérséklésének szükségessége már lényegében nemzetközi szintű közvélekedéssé vált. A megvalósítás módszereiben, eszközeiben azonban koránt sincs teljes konszenzus sem a tudományos diskurzusban, sem pedig a politika színterén. Ilyen – meglehetősen nagyfokú – bizonytalanság jellemzi a geomérnökség alkalmazhatóságának kérdését is, amely a Föld „[...] energiaegyenlegébe való direkt beavatkozásra irányuló megoldások összefoglaló neve”.

A geomérnökségnek két típusa azonosítható, amelyek az elnyelt és a kibocsátott energiameennyiség befolyásolásában betöltött szerepük mentén határolhatók el egymástól. Ennek kapcsán mindenekelőtt bolygónk energiaegyenlegét alakító tényezőkről célszerű rövid említést tenni. Eszerint a globális átlaghőmérsékletet alapvetően meghatározza a Napból érkező energia mennyisége. A Föld felszíne azonban e sugárzás nagyjából 70%-át elnyeli, aminek következtében felmelegszik, és hőmérsékletének megfelelő mennyiségű hosszúhullámú sugárzást bocsát a légkörbe, illetve az űrbe.

A hőmérséklet emelkedése vagy csökkenése, az elnyelt és az űrbe kibocsátott energia egyenlegének függvénye. Napjainkban Földünk átlagos hőmérséklete azért emelkedik, mert az üvegházhatású gázok – különösen a szén-dioxid – növekvő légköri koncentrációja korlátozza a hosszúhullámú sugárzás kibocsátását. A geomérnökség egyik típusa a szén-dioxid-kivonás (Carbon Dioxide Removal, CDR), ekként éppen a kimenő energia növelését szolgálja. Másik típusa pedig a napsugárzás-menedzsment (Solar Radiation Management, SRM), amely a beérkező energia csökkentésével kívánja mérsékelni a hőmérsékletet.<sup>4</sup> Megjegyzendő, hogy egyes vélemények szerint tágabb értelemben a természetes környezet antropocentrikus megváltoztatására irányuló valamennyi eljárás és beavatkozás klíma- és geomérnökségként értékelhető, még abban az esetben is, ha azok nem tervezetten valósulnak meg, illetve mentek végbe a történelem folyamán. Ilyen például a bányászati és mezőgazdasági aktivitás vagy az erdőirtás. Ez utóbbi ellenkezője, azaz a természetes szén-dioxid-elnyelők telepítése szintúgy tekinthető a klíma- és geomérnökség részének,<sup>5</sup> azonban jelen közlemény kizárólag a CDR és az SRM vizsgálatára terjed ki.

A CDR-technológiának több altípusa azonosítható. Ezek közé tartozik a szén-dioxid leválasztását és föld alatti tárolását célzó Carbon Capture and Storage (CCS), valamint a biomassza elégetésekor keletkezett szén-dioxid begyűjtését és szintén földfelszín alatti tárolását biztosító Bio Energy with Carbon Capture and Storage (BECCS) műszaki megoldás. Ugyancsak kiemelendő a levegőből történő közvetlen szén-dioxid-leválasztást, majd -tárolást lehetővé tevő Direct Air Capture and Carbon Storage (DACCS), illetve a szén-dioxid-leválasztás hasznosítás Carbon Capture and Utilization (CCU) technológiája.<sup>6</sup> A CDR-t már egyre több helyen alkalmazzzák világszerte; 2021-ben Izlandon,<sup>7</sup> 2022-ben pedig az Egyesült Királyságban<sup>8</sup> is üzembe helyeztek már ilyen létesítményt.

A CDR-nél talán még tágabb kört ölelnek fel az SRM-technológiák, amelyek közül több még csak ötlet szintjén létezik. SRM-nek minősül például a kozmikus árnyékolók alkalmazásának lehetősége, valamint a bolygó fényvisszaverési mértékének (albedójának) megváltoztatása. Ez utóbbit többek között aeroszokok magaslégkörbe juttatásával, felhők „kifehérítésével”, mesterséges felületek világosra festésével vagy az óceán felszínének felhabosításával lehetne megvalósítani.<sup>9</sup> Kifejezetten a csapadékeloszlás megváltoztatására, aszálykárok kiküszöbölésére

<sup>4</sup> PIECZKA 2021.

<sup>5</sup> TOLDI 2021.

<sup>6</sup> SCHAFFHAUSER 2021.

<sup>7</sup> RICHTER 2021.

<sup>8</sup> PALEJA 2022.

<sup>9</sup> PIECZKA 2021.

szolgál a – Távol-Keleten már ipari léptékben alkalmazott – „felhőmagvasítás”, amely során ezüst-jodid, folyékony nitrogén vagy fagyasztott szén-dioxid légkörbe juttatásával tartós esőzést lehet kiváltani.<sup>10</sup>

## A geomérnökség környezeti fenntarthatósági szempontú értékelése

A fentiekből is egyértelműen következik, hogy a geomérnökség – a klimatikus problémák kezelésével – lényegében a fenntartható fejlődést kívánja szolgálni. Ennek részét képezi a környezeti fenntarthatóság, amely a környezet eltartó- és tűrőképességének meghaladása nélküli fejlődést jelenti.<sup>11</sup> Ez voltaképpen nem más, mint egy globális stratégiai jövőkép, amelynek eléréséhez konkrét stratégiai célok meghatározására és végrehajtására van szükség. Amint azt a Nemzeti Fenntartható Fejlődési Keretstratégia kimondja, „[...] a fenntartható fejlődéssel kapcsolatban leginkább az annak megvalósításához hozzájáruló technológiákat szokás kiemelni (megújuló energiaforrások, újrahasznosítás stb.), a fenntartható társadalom kialakulása mégis ennél szélesebb körű, elsősorban kulturális probléma”.<sup>12</sup> Következtetesképp a fenntartható fejlődés – és ekként a környezeti fenntarthatóság – két alapvető komponense a technológia és a kultúra.<sup>13</sup> Ezt tovább gondolva konstatálható, hogy egy újszerű találmány az esetben tekinthető fenntarthatónak, ha az technológiai (értsd: reál- és természettudományi) és kulturális (értsd: társadalomtudományi) szempontból is hozzájárul a fenntartható fejlődés folyamatához, de legalábbis bizonyosan nem hátráltatja azt.

A technológiai hozzájárulás pillérét vizsgálva megállapítható, hogy a geomérnökség alkalmazhatósága kapcsán jelenleg még komoly környezeti, meteorológiai és műszaki aggályok merülnek fel. E technológiák ugyanis valójában csupán tüneti kezelésnek minősülnek, nem pedig az eredendő probléma megoldását célozzák. A visszacsatolásokra gyakorolt hatások, valamint a lezajló folyamatok fizikai háttere még nem teljesen ismert. Így egyelőre nem kizárt, hogy egyes geomérnöki megoldások hosszabb távon nem kívánt mellék- vagy kontraproduktív hatásokat is generálhatnak. Ezek között említhető a csapadék- és az ózonkoncentráció-változás, a biodiverzitás-csökkenés vagy – az SRM-technológia alkalmazásának valamilyen okból történő megszüntetését követő – még gyorsabb felmelegedés kockázata.<sup>14</sup>

A kulturális hozzájárulás szempontjából szintűgy felmerülnek megoldásra váró kérdések a geomérnökség kapcsán. Globális vagy több országra kiterjedő hatásokkal járó geomérnökségi beavatkozások esetén elengedhetetlen a nemzetközi konszenzus megléte, aminek elérése jelentős akadályokba ütközhet a nemzetközi szintű döntéshozatal során. Ebből következően – amint arra az Európai Bizottság Közös Kutatóközpontja (JRC) 2022-es jelentésében rámutatott – a geomérnöki tervezés irányítása többdimenziós megközelítést és egy új jogi szabályo-

<sup>10</sup> TOLDI 2021.

<sup>11</sup> GYULAI 2013: 801.

<sup>12</sup> 18/2013. (III. 28.) OGY HAT (melléklet).

<sup>13</sup> SIBALIN 2022: 58.

<sup>14</sup> PIECZKA 2021.

zási mechanizmusra irányuló javaslatot igényel.<sup>15</sup> Ezen túlmenően a geomérnökség általános környezet- és biztonság tudatossági aggályokat is felvet. Az elővigyázatosság elvét alapul véve,

„[...] ha kétely merül fel egy termék esetlegesen káros hatásával kapcsolatban, és ha – objektív tudományos értékelést követően – továbbra is fennáll a bizonytalanság, utasítást lehet adni a termék forgalmazásának leállítására vagy a piacról való kivonására. Az ilyen intézkedéseknek megkülönböztetéstől mentesnek és arányosnak kell lenniük és felülvizsgálat tárgyát kell képezniük, amint rendelkezésre áll több tudományos információ.”<sup>16</sup>

Látható az is, hogy az elővigyázatosság elve nem kizárólag a környezeti és egészségügyi szempontokra van tekintettel, hanem a lehetséges káros hatások szélesebb körére, azaz a másodlagos negatív hatásokkal szemben is igyekszik védelmet nyújtani. A geomérnökség esetében ez alatt az esetleges kontraproduktív hatások olyan járulékos társadalmi következményei értendők, mint például a még gyorsabb felmelegedésre visszavezethető fokozottabb klímamigráció vagy éhínség. És természetesen nem hagyhatók figyelmen kívül a költségesnek mondható geomérnökségi projektek gazdasági-finanszírozási kérdései sem.

1. táblázat: A geomérnökség néhány lehetséges fenntarthatósági kockázata

Technológiai hozzájárulás pillére	Kulturális hozzájárulás pillére
még gyorsabb felmelegedés	nemzetközi viták, jogi dilemmák
csapadék- és ózonkoncentráció-változás	környezet- és biztonság tudatossági kérdések
biodiverzitás csökkenése	sikertelenség társadalmi következményei
egyéb mellék- és kontraproduktív hatások	gazdasági-finanszírozási kérdések

Forrás: Sibalin Iván szerkesztése

## Energiaipari-biztonsági vonatkozású fenntarthatósági kockázatok értékelése

### Fenntarthatóság: közös cél eltérő módszerekkel

Számtalan elemzés és tudományos munka foglalkozott már az energiaágazatnak a természeti környezetre, illetve tágabban a fenntartható fejlődésre gyakorolt hatásával. Nem véletlen, hiszen a természeti erőforrások kiaknázása, a környezetszennyezés, az üvegházhatású gázok kibocsátása, valamint a légszennyezés jelentős részben az emberiség egyre növekvő energia-termelésére, illetve -fogyasztására vezethető vissza.

A legtöbb ilyen munka azonban az energetikai rendszerek normálüzemi működésekor a külvilágba távozó károsanyag-kibocsátások visszaszorításának szükségességére, illetve e probléma valamilyen módon megvalósítható kiküszöbölésének lehetőségeire hívja fel

<sup>15</sup> SACCO et al. 2022: 24.

<sup>16</sup> OHLIGER 2017: 2.

a figyelmet. Az energetikai rendszerek veszélyhelyzeti működése során azonban szintén jelentős mennyiségű szennyező anyag távozik a környezetbe. Ennek ténye pedig nemcsak az energiaágazat, hanem az iparbiztonsági szakterület kiemelt érintettségét is alátámasztja a környezeti fenntarthatóságban.<sup>17</sup> Következésképpen az energetikai rendszerek és rendszerelemek üzembiztos működését szolgáló energiaipari-biztonság minél szélesebb körű érvényre juttatása a környezeti fenntarthatóság alapvető feltétele.

Tekintettel arra, hogy mind az energiaipari-biztonság, mind pedig – a Föld energia-mérlegének kiegyensúlyozására irányuló<sup>18</sup> – geomérnökség a környezeti fenntarthatóság elérését és ezzel párhuzamosan, illetve ennek részeként a biztonságosabb, kiszámíthatóbb és egészségesebb földi élet megvalósítását is célozza, indokolt megvizsgálni a geomérnökség hatásainak – a technológiával kapcsolatban egyelőre még csak korlátozottan rendelkezésre álló ismeretek fényében – néhány lehetséges, energiaipari-biztonsági vonatkozását is. A sikeres – azaz a mellékhatásoktól és kontraproduktív hatásoktól mentes – geomérnökség nyilvánvalóan pozitívan befolyásolná az energiaipari-biztonságot. Ellenkező esetben azonban jelentős, az eddig tapasztaltaknál súlyosabb iparbiztonsági, műszaki biztonsági és ellátásbiztonsági kockázatok merülhetnek fel az energiaágazatban globális szinten.



1. ábra: A geomérnökség és az energiaipari-biztonság a környezeti fenntarthatóság szolgálatában

Forrás: Sibalin Iván szerkesztése

## Az SRM néhány lehetséges energiaipari-biztonsági következménye

Az éghajlatváltozásra visszavezethető, országunkat is évről évre veszélyeztető legjellemzőbb környezeti problémák között említhetők a hóhullámok, az erdő- és vegetációtüzek, a villám-árvizek, a szélviharok, valamint a gyengülő átlagos szélsébség. Ezek mindegyike komoly energiaipari-biztonsági kockázattal jár, mivel az épített infrastruktúrákban, így az energiaágazatban is súlyos ipari baleseteket, üzemzavarokat, műszaki biztonsági és ellátásbiztonsági gondokat idézhetnek elő.<sup>19</sup> Az állítás az alábbi példakkal megfelelően illusztrálható:

<sup>17</sup> SIBALIN 2022: 6.

<sup>18</sup> PIECZKA 2021.

<sup>19</sup> SIBALIN 2022: 103–115.

- A hőhullámok egyes rendszerelemek – köztük a kapcsolóállomások elektronikus irányítástechnikai berendezéseinek, a kábelvezetékeknek, a talajban rögzített tartóoszlopoknak<sup>20</sup> – stabilitását, épségét veszélyeztetik. A forráságban az energiaellátó hálózat is túlmelegedhet. A végső hőnyelőként funkcionáló természetes vizek alacsonyabb vízállása és hőmérséklet-növekedése hatásfokcsökkenést eredményezhet a hőerőművek és vízerőművek esetében.<sup>21</sup> A hőség miatt a gázturbinás erőművek teljesítőképessége romolhat,<sup>22</sup> a magas hőmérséklet pedig a túlhevült napelempanelak teljesítőképesség-csökkenését is előidézheti. Az alacsonyabbá váló légmozgás következtében a szél-erőművek energiatermelése is mérséklődik.<sup>23</sup> Végül egy elhúzódó aszályos periódus az energiaültetvényeket teheti tönkre.<sup>24</sup>
- Az erdő- és vegetációtüzek – a közelükben lévő ipari létesítményekre áttérjedve – súlyos balesetek forrásai lehetnek. A közelmúltban több olyan esemény is történt, amely során erdőtüzek erőművek épségét veszélyeztették. 2020 tavaszán például a csernobili szarkofágtól nem messze elterülő erdőség gyulladt ki,<sup>25</sup> 2021 nyarán pedig az Égei- és Földközi-tenger partjain pusztító erdőtüzek kerültek egy törökországi széntüzelésű hőerőmű közelébe.<sup>26</sup> A megújulóenergia-termelés vonatkozásában elsősorban ellátásbiztonsági példák hozhatók fel. 2020 őszén a kaliforniai erdőtüzek füstje olyannyira lecsökkentette a napelempanelakat érő napsugárzást, hogy a napenergia-termelés is jelentősen visszaesett az államban.<sup>27</sup> Az erdők<sup>28</sup> és energiaültetvények égése következtében a rendelkezésre álló biomassa is számottevő mértékben kárba veszhet.<sup>29</sup>
- Korunk egyik legjellemzőbb hidrológiai eredetű kockázatának számítanak a villámárvizek, amelyek alatt a váratlan gyorsasággal lezúduló, 30 mm/nap intenzitást meghaladó csapadékesemények értendők.<sup>30</sup> Ilyen események során a víz nyomása és sodrása, valamint a korrózió károsíthatja az infrastruktúra-elemeket és -hálózatokat. A sár-lavinák, a földcsuszamlások, a talajfolyások és -beomlások akár veszélyes anyagokkal kapcsolatos balesetek forrásai is lehetnek.<sup>31</sup> A viharokkal gyakran együttjáró villámcsapások jellemzően a szigetetlen szabadvezetékekre, ritkábban a tartóoszlopokra,<sup>32</sup> a fotovoltaikus panelekre<sup>33</sup> és a szél-erőművekre jelentenek veszélyt, azonban volt már példa villámcsapás okozta szénhidrogénipari tartálytüzekre és tartályrobbanásokra is.<sup>34</sup>

<sup>20</sup> FICÉP Kft. 2019: 37.

<sup>21</sup> Aszódi 2018.

<sup>22</sup> ITM et al. 2020: 31.

<sup>23</sup> Aszódi 2018.

<sup>24</sup> BALLA et al. 2014: 122.

<sup>25</sup> OAH 2020.

<sup>26</sup> Euronews–AP 2021.

<sup>27</sup> MNNSZ 2020.

<sup>28</sup> ITM 2020: 45.

<sup>29</sup> SIBALIN 2022: 108.

<sup>30</sup> 23/2018. (X. 31.) OGY hat. (melléklet) 2018: 174.

<sup>31</sup> ÉRCES–VASS–AMBRUSZ 2023.

<sup>32</sup> FICÉP Kft. 2019: 37.

<sup>33</sup> *Féltsük az időjárástól a napelempanelakat?* [é. n.].

<sup>34</sup> TÓTH–KECSKEMÉTHY–ENDRŐDI 2021.

- Miközben az átlagos szélsébség bolygónkon mérséklődést mutat, a szélsőséges szeles események valószínűsége növekszik.<sup>35</sup> Mindkét környezeti jelenség kapcsán azonosíthatók energiaipari-biztonsági kockázatok. Míg a gyenge szélsébség többnyire az ipari balesetek következtében a környezetbe kerülő légszennyező anyagok felhalmozódása miatt nehezíti meg a balesetet megelőző állapot helyreállítását,<sup>36</sup> addig a szélviharok az egyes rendszeres elemeket – köztük az áramátalakító berendezéseket, a légvezetéseket,<sup>37</sup> a telekommunikációs antennákat, kéményeket,<sup>38</sup> a nem megfelelően rögzített napelem-rendszereket,<sup>39</sup> a tartóoszlopok szerkezetét<sup>40</sup> – közvetlenül rongálhatják. Az ipari balesetek emellett súlyos környezeti károkat is okozhatnak,<sup>41</sup> amelyek esetlegesen katasztrofális hatásai miatt jelentős mértékben terhelik a környezeti elemeket.<sup>42</sup>

Az éghajlatváltozást és ezáltal korunk környezeti problémáit is sikeresen kezelő SRM-megoldásokkal a fent ismertetett energiaipari-biztonsági kockázatok is jelentősen mérséklődhetnek. Nem zárható ki azonban, hogy az SRM – a technológiai hozzájárulás pillére kapcsán említett, valamint egyéb – egyelőre teljeskörűen még nem ismert mellék- vagy kontraproduktív hatásai az energiaágazat biztonságát is veszélyeztető környezeti problémák súlyosságát tovább fokozhatják. Az energiaellátás akadályozottsága, sérülése pedig gyakorlatilag a létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről szóló 2012. évi CLXVI. törvény (Lrtv.) 1. mellékletében felsorolt valamennyi ágazat funkcionálását korlátozhatja, amivel akár olyan alapvető létfeltételek biztosítása is hosszabb-rövidebb időre ellehetetlenülhet, mint például az ivóvízellátás.<sup>43</sup>

## A CDR néhány lehetséges energiaipari-biztonsági következménye

A szén-dioxid-elnyelő technológiák kézenfekvő dekarbonizációs megoldásként szolgálhatnak, ami a veszélyhelyzeti működés következtében a környezetbe áramló szén-dioxid kapcsán is relevanciával bír. A CDR kezdetlegessége okán azonban számos biztonsági kockázatot hordoz magában. A legáltalánosabbak között említhetők a szén-dioxid tárolásával kapcsolatos problémák.

<sup>35</sup> PÉLINÉ NÉMETH 2021.

<sup>36</sup> SIBALIN 2022: 115.

<sup>37</sup> 23/2018. (X. 31.) OGY hat. (melléklet) 2018: 165.

<sup>38</sup> Geogold Kárpátia Kft. – Fe-Bio Felső-Bácskai Kft. 2019: 26.

<sup>39</sup> *Féltsük az időjárástól a napelemeket?* [é. n.].

<sup>40</sup> FICÉP Kft. 2019: 36.

<sup>41</sup> ÉRCES-VASS 2019.

<sup>42</sup> KÁTAI-URBÁN 2023.

<sup>43</sup> SIBALIN 2022: 29.



Az Energetikai Ásványvagyon-hasznosítási és Készletgazdálkodási Cselekvési Terv a légkörből kivont szén-dioxid hazai elhelyezésének két lehetséges módját említi: a kimerült szénhidrogén mezőben, valamint a mély sósvízes rezervoárban való tárolását. A dokumentum mindkettő kapcsán azonosít kockázatokat. Ilyen kockázatként jelöli meg például, hogy a szénhidrogénmezőket szénhidrogén termelésére, nem pedig szén-dioxid-tárolásra optimalizták. A sósvízes tárolóba beoldott szén-dioxid viselkedését pedig ugyancsak szükséges vizsgálni. A sűrűn lakott területek vonatkozásában a cselekvési terv külön tesz utalást az esetleges szén-dioxid-szivárgás veszélyére.<sup>44</sup>

A második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia felhívja a figyelmet, hogy a szén-dioxid-leválasztás és -tárolás technológiája kizárólag a legszigorúbb környezeti, biztonsági és fenntarthatósági feltételek teljesülése esetén alkalmazható, amely kapcsán alapvető szempont a hazai intézményrendszer tudására alapuló K+F fenntartása, és a fejlesztéseket hasznosító ipari háttér kialakítása és megerősítése. A stratégia konkrét cselekvési irányokat is megfogalmaz, egyebek mellett a geológiai kutatások folytatását, továbbá a hosszú távú környezeti, természeti és humán egészségügyi hatások, valamint a szén-dioxid ipari nyersanyagkénti hasznosíthatósága vizsgálatának szükségességét.<sup>45</sup>

## **Általános következmény: fosszilis tüzelőanyagokkal való felhagyás elodázásának kockázata**

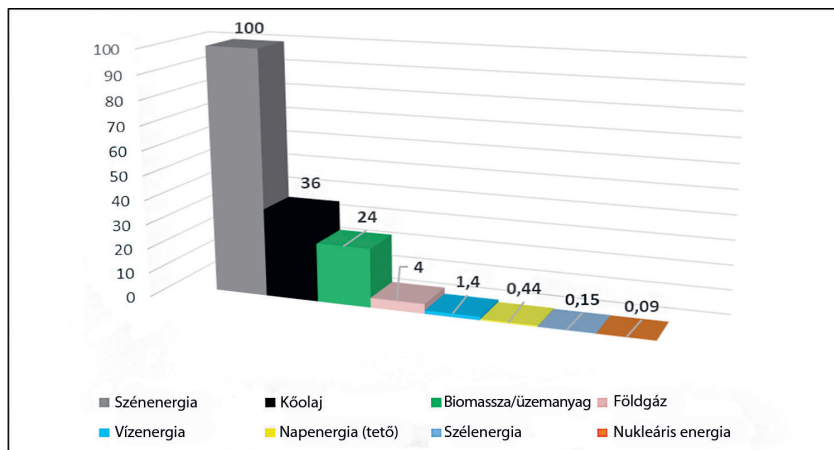
A Center for International Environmental Law washingtoni székhelyű környezetjogi szervezet honlapján 2019-ben közzétett elemzés figyelmeztetésként szolgál egy olyan forгатókönyv bekövetkezésének a lehetőségére, amelyben a CDR- és az SRM-technológiák kiterjedt és hatékony alkalmazása további évtizedekre rendszeresítené a fosszilis tüzelőanyagok energetikai célú hasznosításának gyakorlatát.<sup>46</sup> Ez ugyancsak energiaipari-biztonsági aggályokat hordoz magában, ugyanis – ahogy arra Brian Wang futurológus és James Conca környezettudós nevéhez köthető kutatások is rámutatnak – a fosszilis alapú energia-előállításához globális szinten lényegesen több haláleset kapcsolódik, mint a megújuló energiaforrásokhoz vagy a nukleáris energiához.<sup>47</sup> A vizsgálat eredményeit a következő ábra megfelelően szemlélteti.

<sup>44</sup> NFM 2017: 28–29.

<sup>45</sup> 23/2018. (X. 31.) OGY hat. (melléklet) 2018: 125.

<sup>46</sup> MUFFETT et al. 2019: 1.

<sup>47</sup> A halálesetek számába beleértendők a közvetlen hatások – például balesetek – miatt bekövetkezett, valamint a közvetett hatásokra – például megbetegedésekre – visszavehető elhalálozások is. Forrás: CONCA 2016. A The Energy Factbook közleménye szerint azonban a veszélyes hulladékok okozta haláleseteket a kutatás adatai nem tartalmazzák. The Energy Factbook [é. n.].



2. ábra: 40 év becsült globális halálozási aránya (halálozeset/milliárd kWh) energiaforrások szerinti bontásban  
 Forrás: SIBALIN 2022: 80. Adatok forrása: CONCA 2016 és CONCA 2012

A közzétett adatok alapján a vizsgált energiaforrások közül a legtöbb halálozeset a szénhez kapcsolódik, amelynek különösen a kitermelése és elégetése minősül veszélyesnek. A kőolaj a második legkockázatosabb energiaforrás, amely szintén a fosszilis tüzelőanyagok közé tartozik. A legkevésbé veszélyes fosszilis energiahordozó a földgáz, a rangsorban a negyedik helyen áll. A megújulók közül a biomasszára vezethető vissza a legnagyobb elhalálozási arány. Ennek legfőbb oka feltehetően a fűtéshez és a főzéshez globális szinten egyelőre még nagymértékben használt tűzifa, faszén és trágya által előidézett légszennyezés.<sup>48</sup> A biomassza-üzemű erőművek tartálybalesetei ugyancsak jelentős kihívásként értékelhetők.<sup>49</sup> Bár a halálozesetek számát nyilvánvalóan befolyásolja az energiaforrásoknak a globális energiamixben betöltött részaránya is, figyelemre méltó, hogy a szél-, a nap-, a víz- és a nukleáris energia alkalmazásából eredő halálozesetek együttes száma csupán a töredéke a fosszilis tüzelőanyagokhoz kapcsolódó elhalálozások mértékének.

A halálozeseteken alapuló veszélyességi értékelésen túlmenően további lényeges – a környezeti fenntarthatósággal közvetlenebb összefüggést mutató – szempontként indokolt utalni a fosszilis tüzelőanyagot alkalmazó energetikai létesítmények veszélyhelyzeti működésének kockázatára, amely során hatalmas mennyiségű üvegházhatású gáz kerülhet a légkörbe. Ezek között említhetők a robbanások, tüzesetek során előállt gázkibocsátások, a kútfejek, csőszervek és csővezetékek szivárgásai vagy a tartályhajók olajszivárgása.<sup>50</sup> A kockázat súlyosságának érzékeltetésére megfelelő példa lehet a kaliforniai Aliso Canyon földgáztároló létesítményben először 2015 októberében jelentett,<sup>51</sup> 118 napig tartó<sup>52</sup> gázszivárgás, amely

<sup>48</sup> The Energy Factbook [é. n.].

<sup>49</sup> MUHORAY 2021.

<sup>50</sup> IUC–UNEP 2000.

<sup>51</sup> WARRICK 2016.

<sup>52</sup> MICHANOWICZ 2018.

közel 600 000 gépkocsi éves kibocsátásával megegyező mértékű hőcsapdhatást váltott ki. Ez volt az Egyesült Államok történetének legsúlyosabb ember által előidézett üvegházhatású-gáz-katasztrófája.<sup>53</sup>

2. táblázat: Példák a geomérnökség energiaipari biztonságot érintő lehetséges következményeire

Lehetséges következmények	
SRM	Hőhullámok hatásai Erdő- és vegetációtüzek Hidrológiai kockázatok Széljárással kapcsolatos kockázatok
CDR	Szén-dioxid tárolásával kapcsolatos kérdések
	Fosszilis tüzelőanyagokkal való felhagyás elodázása

Forrás: Sibalin Iván szerkesztése

## Következtetések

A geomérnökség a jövőben az éghajlatváltozás kezelésének kézenfekvő megoldása lehet, jelenlegi ismereteink szerint azonban több geomérnökségi technológia alkalmazhatóságával kapcsolatban jelentős aggályok merülnek fel. Ezek közé tartoznak bizonyos mellék- és kontra-produktív hatások, amelyek az éghajlatváltozás tendenciáját, és ezzel párhuzamosan napjaink környezeti problémáit akár súlyosabbá is tehetik. Következésképp a sikeres geomérnökség nyilvánvalóan pozitívan befolyásolná az energiaágazat biztonságát, ellenkező esetben azonban növekvő energiaipari-biztonsági kockázatokkal lehet számolni. Az éghajlatváltozás erősödő hatásai ugyanis fokozhatják a járulékos környezeti problémákat. Ezekre példaként hozhatók fel a még gyakoribbá és/vagy szélsőségesebbé váló hőhullámok, erdő- és vegetációtüzek, valamint a hidrológiai és széljárással kapcsolatos események, amelyek tovább veszélyeztethetik az energetikai rendszerek és rendszerelemek üzembiztonságát.

Egyes vélemények szerint a geomérnökség széles körű alkalmazásával a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása további évtizedekre kitolódhat. Ennek energiaipari-biztonsági (és részben egészségügyi, környezetbiztonsági, valamint munkabiztonsági) vonatkozása egyfelől abban ragadható meg, hogy a fosszilis tüzelőanyagokhoz globális szinten összességében lényegesen több haláleset köthető, mint az energiatermelés egyéb vizsgált formáihoz. Másfelől a fosszilis tüzelőanyagokat alkalmazó energetikai létesítmények veszélyhelyzeti működése során hatalmas mennyiségű üvegházhatású gáz kerülhet a légkörbe. A mesterséges szén-dioxid-elnyelő technológiák vonatkozásában pedig a szén-dioxid tárolásával kapcsolatban merülnek fel további megoldásra váró kérdések.

Mindezen említett kockázatok elkerülése és/vagy kiküszöbölése a geomérnökség alkalmazhatóságának, valamint a környezeti fenntarthatóságnak – és egyben a fenntartható fejlődésnek is – elengedhetetlen energiaipari-biztonsági feltétele.

<sup>53</sup> WARRICK 2016.

## Felhasznált irodalom

- ASZÓDI Attila (2018): A nyári hőhullám hatása a villamosenergia-termelésre. *Láncreakció – Aszódi Attila információs blogja*, 2018. augusztus 22. Online: [https://aszodiattila.blog.hu/2018/08/22/a\\_nyari\\_hohullam\\_hatasa\\_a\\_villamosenergia-termelesre](https://aszodiattila.blog.hu/2018/08/22/a_nyari_hohullam_hatasa_a_villamosenergia-termelesre)
- BALLA István et al. (2014): *Energianövények, biomassza termelés és felhasználás*. 6. tananyag. Online: [http://nti.mkk.szie.hu/download/Biomassza%20alanyagok%20termel%C3%A9se/Biomassza\\_k%C3%B6nyv.pdf](http://nti.mkk.szie.hu/download/Biomassza%20alanyagok%20termel%C3%A9se/Biomassza_k%C3%B6nyv.pdf)
- CONCA, James (2012): How Deadly is Your Kilowatt? We Rank the Killer Energy Sources? *Forbes*, 2012. június 10. Online: [www.forbes.com/sites/jamesconca/2012/06/10/energys-deathprint-a-price-always-paid/?sh=11ed19cd709b](http://www.forbes.com/sites/jamesconca/2012/06/10/energys-deathprint-a-price-always-paid/?sh=11ed19cd709b)
- CONCA, James (2016): The 'Deathprint' Of Energy Grapples With The Powers Of Regulation. *Forbes*, 2016. szeptember 30. Online: [www.forbes.com/sites/jamesconca/2016/09/30/the-deathprint-of-energy-grapples-with-the-powers-of-regulation/?sh=6b22eb372c6b](http://www.forbes.com/sites/jamesconca/2016/09/30/the-deathprint-of-energy-grapples-with-the-powers-of-regulation/?sh=6b22eb372c6b)
- Euronews-AP (2021): Sikerült megfékezni a széntüzelésű hőerőmű felé terjedő erdőtűzet Törökországban. *Euronews*, 2021. augusztus 5. Online: <https://hu.euronews.com/2021/08/05/sikerult-megfekezni-a-szentuzelesu-hoeromu-fele-terjedo-erdotuzet-torokorszagban>
- ÉRCES Gergő – VASS Gyula (2019): Veszélyes ipari üzemek fenntartható tűzbiztonságának BIM alapú fejlesztési lehetőségei. *Védelem Tudomány*, 4(1), 131–161.
- ÉRCES Gergő – VASS Gyula – AMBRUSZ József (2023): Épületek károsító hatásokkal szembeni rezilienciájának jellemzői. *Polgári Védelmi Szemle*, 15(ksz.), 117–130.
- FICÉP Építőipari Kereskedelmi és Szolgáltató Kft. (2019): *A magyarországi villamosenergiaellátás éghajlati szempontú értékelése*. Online: [FICÉP\\_NATÉR\\_villamosenergia\\_serulekenyseg\\_tanulmany\\_VEGLEGES\\_20190531-ok \(gov.hu\)](https://www.ficp.hu/velemenyek/vegleges-20190531-ok)
- Geogold Kárpátia Kft. – Fe-Bio Felső-Bácskai Bioenergetikai Kft. (2019): *A távhőellátás éghajlati szempontú értékelése*. Online: [https://nater.mbfisz.gov.hu/sites/nater.mfqi.hu/files/files/NA-TeR\\_Tavhoellatas\\_tanulmany.pdf](https://nater.mbfisz.gov.hu/sites/nater.mfqi.hu/files/files/NA-TeR_Tavhoellatas_tanulmany.pdf)
- GYULAI Iván (2013): Fenntartható fejlődés és fenntartható növekedés. *Statistikai Szemle*, 91(8–9).
- Information Unit for Conventions – United Nations Environment Programme (IUC-UNEP) (2000): *Climate Change Information Sheet 22. How Human Activities Produce Greenhouse Gases*. Online: <https://unfccc.int/cop3/fccc/climate/fact22.htm>
- Innovációs és Technológiai Minisztérium (ITM) (2020): *Magyarország Nemzeti Energia- és Klímaterve*. Online: [https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/hu\\_final\\_necp\\_main\\_hu\\_0.pdf](https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/hu_final_necp_main_hu_0.pdf)
- Innovációs és Technológiai Minisztérium (ITM) et al. (2020): *Jelentés az éghajlatváltozás Kárpát-medencére gyakorolt esetleges hatásainak tudományos értékeléséről*. Online: <https://banyasz.hu/images/klimapolitika/Jelent%C3%A9s%20az%20%C3%A9ghajlatv%C3%A1ltoz%C3%A1s%20K%C3%A1rp%C3%A1t-medenc%C3%A9re%20gyakorolt%20esetleges%20hat%C3%A1sainak%20tudom%C3%A1nyos%20%C3%A9rt%C3%A9kel%C3%A9s%C3%A9r%C3%A9l.pdf>
- Féltsük az időjárásától a napelemeket? [é. n.]. Online: <https://napelemrendszer.info/feltsuk-az-idojarastol-a-napelemeket.html>
- KÁTAI-URBÁN, Maxim et al. (2023). Identification Methodology for Chemical Warehouses Dealing with Flammable Substances Capable of Causing Firewater Pollution. *Fire*, 6(9), 345. Online: <https://doi.org/10.3390/fire6090345>
- Magyar Napelem Napkollektor Szövetség (MNNSZ) (2020): *A kaliforniai erdőtűzek lehúzták a napelemek múlt havi termelését*. Online: [www.mnnsz.hu/a-kaliforniai-erdotuzek-lehuztak-a-napelemek-mult-havi-termeleset/](http://www.mnnsz.hu/a-kaliforniai-erdotuzek-lehuztak-a-napelemek-mult-havi-termeleset/)
- MICHANOWICZ, Drew (2018): Op-Ed: The Aliso Canyon Gas Leak was a Disaster. There are 10,000 More Storage Wells Out There Just Like It. *Los Angeles Times*, 2018. május 14. Online: [www.latimes.com/opinion/op-ed/la-oe-michanowicz-aliso-canyon-gas-leak-20180514-story.html](https://www.latimes.com/opinion/op-ed/la-oe-michanowicz-aliso-canyon-gas-leak-20180514-story.html)

- MUFFETT, Carroll et al. (2019): *Fuel to the Fire – How Geoengineering Threatens to Entrench Fossil Fuels and Accelerate the Climate Crisis*. Center for International Environmental Law. Online: [www.ciel.org/wp-content/uploads/2019/02/CIEL\\_FUEL-TO-THE-FIRE\\_How-Geoengineering-Threatens-to-Entrench-Fossil-Fuels-and-Accelerate-the-Climate-Crisis\\_February-2019.pdf](http://www.ciel.org/wp-content/uploads/2019/02/CIEL_FUEL-TO-THE-FIRE_How-Geoengineering-Threatens-to-Entrench-Fossil-Fuels-and-Accelerate-the-Climate-Crisis_February-2019.pdf)
- MUHORAY Árpád (2021): A katasztrófavédelem kihívásai a 21. században a Nemzeti Biztonsági Stratégia tükrében. *Védelmi-biztonsági Szabályozási és Kormányzástani Műhelytanulmányok*, 16. Online: [VBSZK Műhelytanulmányok\\_2021\\_16\\_Muhoray Árpád\\_A katasztrófavédelem kihívásai a 21. században a Nemzeti Biztonsági Stratégia tükrében.pdf](http://VBSZK_Műhelytanulmányok_2021_16_Muhoray_Arpád_A_katasztrófavédelem_kihívásai_a_21_században_a_Nemzeti_Biztonsági_Sztratégia_tükrében.pdf) (uni-nke.hu)
- Nemzeti Fejlesztési Minisztérium (NFM) (2017): *Energetikai Ásványvagyon-hasznosítási és Készlet-gazdálkodási Cselekvési Terv*. Online: [https://2015-2019.kormany.hu/download/6/b/4/81000/%C3%81Cst\\_2018.pdf](https://2015-2019.kormany.hu/download/6/b/4/81000/%C3%81Cst_2018.pdf)
- OHLIGER, Tina (2017): *Környezetpolitika: általános elvek és alapvető keretek*. Online: [www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/fiches\\_techniques/2013/050401/04A\\_FT\(2013\)050401\\_HU.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/fiches_techniques/2013/050401/04A_FT(2013)050401_HU.pdf)
- Országos Atomenergia Hivatal (OAH) (2020): *Magyarországon nem emelkedett a háttérsugárzás a Csernobil melletti erdőtüz miatt*. Online: [www.oah.hu/web/v3/OAHPortal.nsf/web?OpenAgent&article=news&uid=32A2D6D8A302266FC125854200476102](http://www.oah.hu/web/v3/OAHPortal.nsf/web?OpenAgent&article=news&uid=32A2D6D8A302266FC125854200476102)
- PALEJA, Ameya (2022): The UK's Largest Carbon Capture Plant Is Now Operational. *Interesting Engineering*, 2022. június 27. Online: <https://interestingengineering.com/innovation/uk-largest-carbon-capture-plant-operational>
- PÉLINÉ NÉMETH Csilla (2021): Extrém szélsőséges viharokat hoz a klímaváltozás Magyarországon. *Másfélök*, 2021. május 7. Online: <https://masfelfok.hu/2021/05/07/extrem-szelesbessegu-viharokat-hoz-a-klimavaltozas-magyarorszagon/>
- PIECZKA Ildikó (2021): Geomérnökség és klímaváltozás: bizonytalan vészmegoldás, sok kérdőjellel és még több veszéllyel. *Másfélök*, 2021. március 3. Online: <https://masfelfok.hu/2021/03/03/geomernokseg-es-klimavaltozas/>
- RICHTER, Alexander (2021): World's Largest Direct Air Capture and CO2 Storage Plant On in Iceland. *Think GeoEnergy*, 2021. szeptember 13. Online: [www.thinkgeoenergy.com/worlds-largest-direct-air-capture-and-co2-storage-plant-on-in-iceland/](http://www.thinkgeoenergy.com/worlds-largest-direct-air-capture-and-co2-storage-plant-on-in-iceland/)
- SACCO, Nicoletta et al. (2022): Geo-Engineering: A Roadmap Towards International Guidelines. *Publications Office of the European Union*, JRC99777. Online: <https://doi.org/10.2788/29362>
- SCHAFFHAUSER Tibor (2021): Elon Musk pénzdíja és a klímaváltozás mesterséges megfékezése. *Green Policy Center*, 2021. január 29. Online: [www.greenpolicycenter.com/2021/01/29/elon-musk-penzdija-es-a-klimavaltozas-megfekezese/](http://www.greenpolicycenter.com/2021/01/29/elon-musk-penzdija-es-a-klimavaltozas-megfekezese/)
- SIBALIN Iván (2022): *Az energetikai rendszerek fenntartható működésével kapcsolatos iparbiztonsági tevékenységek stratégiai célú kutatása és fejlesztése*. PhD-disszertáció. NKE. Online: [https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/bitstream/handle/20.500.12944/19565/sibalin\\_ivan\\_doktori-ertekezes.pdf?sequence=11&isAllowed=y](https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/bitstream/handle/20.500.12944/19565/sibalin_ivan_doktori-ertekezes.pdf?sequence=11&isAllowed=y)
- The Energy Factbook [é. n.]: *Energy's Deathprint*. Online: <https://khuurer.wordpress.com/energys-deathprint/>
- TOLDI Ottó (2021): Nemzetközi klímaváltozási akciónap a geoengineering tükrében. *Klímapolitikai Intézet*, 2021. május 14. Online: <https://klimapolitikaiintezet.hu/cikk/nemzetkozi-klimavaltozasi-akcionap-a-geoengineering-tukreben>
- TÓTH András – SPOSNÉ KECSKEMÉTH Klára – ENDRŐDI István (2021): A magyar szénhidrogéniparban előfordult katasztrófák, azok tanulságai és a megelőzés módozatai. 2. rész. *Hadmérnök*, 16(1), 129–143. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2021.1.8>
- WARRICK, Joby (2016): California Gas Leak Was the Worst Man-Made Greenhouse-Gas Disaster in U.S. History, Study Says. *The Washington Post*, 2016. február 25. Online: [www.washingtonpost.com/news/energy-environment/wp/2016/02/25/california-gas-leak-was-the-worst-man-made-greenhouse-gas-disaster-in-u-s-history-study-says/](http://www.washingtonpost.com/news/energy-environment/wp/2016/02/25/california-gas-leak-was-the-worst-man-made-greenhouse-gas-disaster-in-u-s-history-study-says/)

## Jogi források

- 18/2013. (III. 28.) OGY határozat a Nemzeti Fenntartható Fejlődés Keretstratégiáról. Melléklet a 18/2013. (III. 28.) OGY határozathoz. Nemzeti Fenntartható Fejlődési Tanács. 2013. Online: <https://njt.hu/jogszabaly/2013-18-30-41>
- 23/2018. (X. 31.) OGY határozat a 2018–2030 közötti időszakra vonatkozó, 2050-ig tartó időszakra kitekintést nyújtó második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégiáról. Melléklet a 23/2018. (X. 31.) OGY határozathoz. Innovációs és Technológiai Minisztérium (ITM). 2018. Online: [https://njt.hu/document/5c/5c6420184130000023\\_1.PDF](https://njt.hu/document/5c/5c6420184130000023_1.PDF)