

A természetes előfordulású hidrogén rezervoárok

The Naturally Occurring Hydrogen Reservoirs

VADÁSZI Marianna PhD¹, NASIRI Masoud PhD²

¹Miskolci Egyetem–Bányászat és Energia Intézet, H-3515 Miskolc-Egyetemváros, Magyarország; marianna.vadaszi@uni-miskolc.hu; <http://www.bei.uni-miskolc.hu>;

²Senman University, Iran, Postal Code: 35131-19111, Faculty of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, mnasiri@semnan.ac.ir; <http://semnan.ac.ir/>

Abstract

Hydrogen is promising in decarbonizing energy systems as a low-carbon fuel. Its central role is due to the possibility of producing it using renewable energy without releasing carbon dioxide into the atmosphere. However, until now, a promising source, naturally occurring hydrogen, also known as gold hydrogen, has been largely ignored. It was hypothesized that hydrogen had a low chance of occurring in geological formations, but this turned out not to be the case. However, there are limited data about gold hydrogen, and the discovery of this energy source poses many questions: Are there accumulations available in commercial quantities? How to exploit it? What are the production costs? Is it able to participate in the process of decarbonization and compete with existing blue or grey hydrogen or even green hydrogen?

Keywords: hydrogen, gold hydrogen, hydrogen economy, engineering geology, energy

Kulcsszavak: hidrogén, gold hidrogén, hidrogén gazdaság, műszaki földtudomány, energia

1. BEVEZETÉS

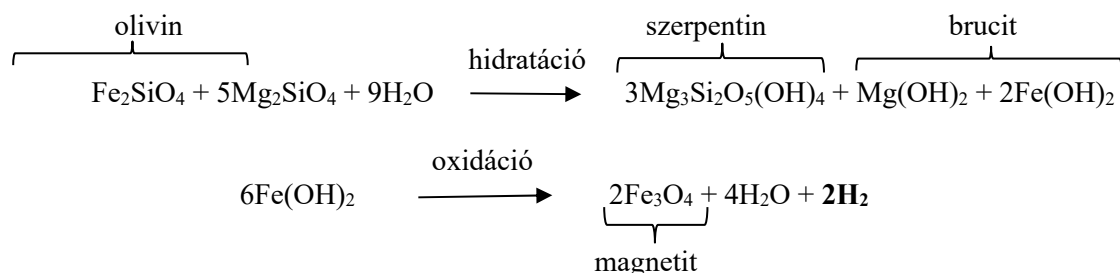
A természetes formában, geológiai formációkban előforduló hidrogén fontosságát évtizedeken át figyelmen kívül hagyták. Napjainkban ezzel ellentétben intenzív kutatások zajlanak mind a hidrogén előállításával mind pedig a felszín alól kitermelhető hidrogénnel kapcsolatosan. VOITOV és RUDAKOV a Global Onshore Gas-Oil Seeps Dataset (GLOGOS) adatbázisára hivatkozva, amely egyáltalán nem tartalmaz hidrogénre vonatkozó vizsgálatokat, jutnak arra a következtetésre, hogy a molekuláris hidrogén magas koncentrációjával rendelkező gáz előfordulások száma szórványos [14]. A hidrogénre vonatkozó földgáz összetétel elemzések hiánya az 1930-60-as években még az elavult analitikai technikáknak és protokolloknak tudhatók be [6]. Később a gázkromatográfia standard analitikai alkalmazásai gyakran hidrogént használnak vivőgázként [1]. Ezért, abban az esetben, ha hidrogén van a gázmintában, nem tudják kimutatni. Még a 90-es években sem alkalmaztak hidrogén észlelésére alkalmas eszközöket. Jelenleg is csak néhány természettudományos célra használatos hordozható gázelemző készülék tartalmaz hidrogén érzékelőt. A fentiek alapján megcáfolható az az állítás, miszerint a természetes előfordulású hidrogén megjelenése ritka. Ezt igazolja MENGYELEJEV még 1888-ban megjelent publikációjában is, miszerint az ukrainai Donyeck régióból, Makiivka városából származó széntelep gázmintájában 5,8-7,5% hidrogén tartalmat dokumentált [9]. Szembe tűnő, hogy a globális hidrogén előfordulások detektálása a volt szovjet államok területére, Kelet-Európára és Észak-Ázsiára koncentrálódik. Ez az olaj- és gáztermelés abiogén elméletének népszerűségével függ össze, ebben a régióban, nem pedig azzal, hogy ez a világ hidrogénben gazdag régiója [15].

Célunk, hogy szakirodalmi feldolgozás után bemutassuk a természetes hidrogén képződésének potenciális folyamatait és képet adjunk a hidrogén felfedezések széles tartományáról. A természetes hidrogén előfordulásokat bemutató áttekintések is állítják, hogy ez a gáz sokkal elterjedtebb, és kiemelt figyelmet kell fordítani a képződésének és kiaknázásának lehetséges mechanizmusaira.

2. A HIDROGÉN KÉPZŐDÉSE A TERMÉSZETBEN

A természetes hidrogén képződésének mentét az 1. ábra szemlélteti, mely több folyamatot is magában foglalhat, beleértve biológiai (pl. szerves anyag lebontása, fermentációs folyamatok) és abiotikus (pl. radiolízis, közvetlen H₂O redukció) folyamatokat, amelyek közül a szerpentinizáció a legjelentősebb [10].

Szerpentinizálódás akkor következik be, amikor a víz kölcsönhatásba lép ultramafikus kőzetekkel, amelyek alacsony szilícium-dioxid-tartalmú kőzetek és redukált fémekben gazdagok. Elsősorban vasból és magnéziumból állnak, fő összetevője az olivin. Ultramafikus kőzetek alkotják a Föld felső köpenyét, amelynek felső része a litoszféra része. A víznek kitett ultramafikus kőzetek könnyen szerpentinizálódnak, melléktermékként pedig hidrogén keletkezik [4]. Az olivin szerpentinizálása, két fő reakciót foglal magába, a hidratációt és az oxidációt:



Az olivin hidratálása során új ásványok keletkeznek, például szerpentin és brucit. A szerpentin a víz oxidálja magnetitté, amely során hidrogén képződik. Az alapkőzet összetételétől függően a szerpentinizációs folyamat sokkal összetettebb lehet, mivel pl. a nikkell és a szén jelenléte további fázisokat és reakciókat (pl. Ni₃Fe és Fe₅C₂ képződését) indukál [5].

A szerpentinizáció mellett a felszín alatti hidrogén más abiotikus folyamatok és mikrobiális anyagcsere útján is képződhet. Számos mikroorganizmus termel hidrogént fermentációs és nitrogénmegkötési reakciókon keresztül az anyagcseréjük során. Ez a fajta mikrobiális aktivitás a felszín alatt is megtalálható. Sok mikroorganizmus csak fermentáció során jut energiához, és fontos szerepet játszanak a mély felszín alatti biogeokémiai ciklusokban [5]. Sajnos a biológiai aktivitás a felszín alatti hidrogénképződés folyamatában nem teljesen ismert. A közelmúltban kimutatták, hogy az Ibériai Pirit-öv felszín alatti hidrogénjének jelentős része biológiai úton termelődik [11]. Fontos megemlíteni, hogy a hidrogént más mikroorganizmusok is felhasználhatják energiaforrásként a felszín alatti ökoszisztémában. Ezeket a folyamatokat az 1. ábra 5, 6, számmal jelöli.

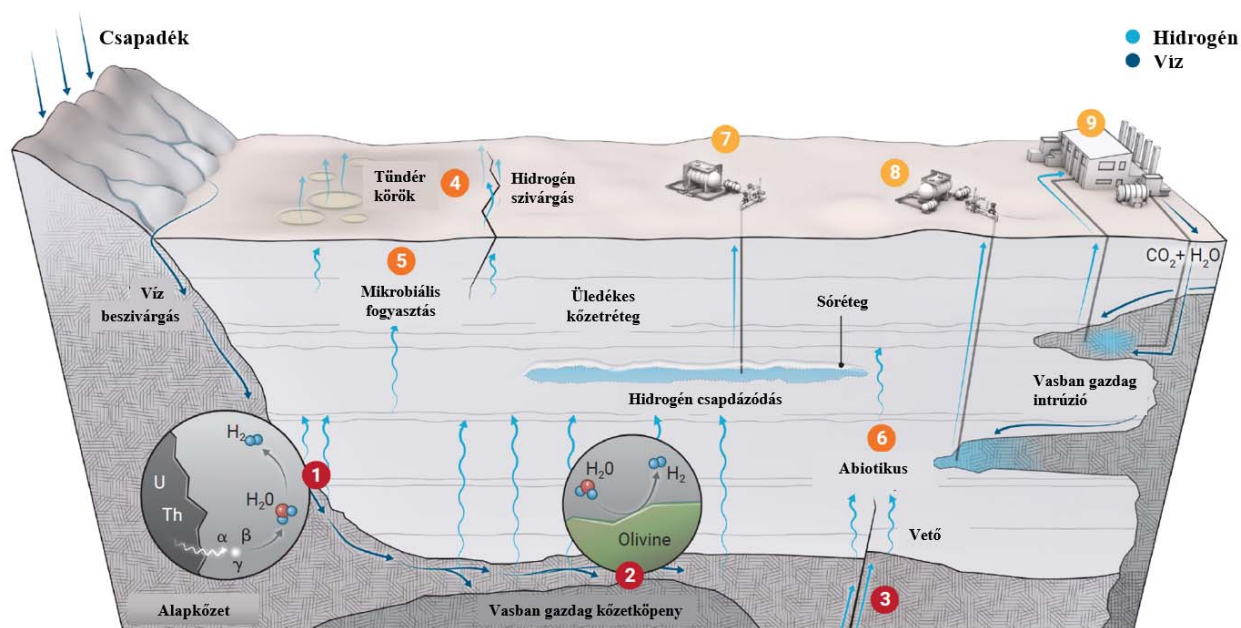
A radiolízis folyamata szintén fel van tüntetve az 1. ábrán, az 1. szám alatt. A folyamat során a kőzetekben lévő radioaktív nyomelemek olyan sugárzást bocsátanak ki, amely képes a vizet bontani. A kutatók feltételezik, hogy a radiolízis generálhatja a többi reakciót. A kéreg radioaktív elemei, mint például az urán és a tórium bomlásuk során, alfa-részecskéket, más néven héliummagokat bocsátanak ki más sugárzással együtt. A folyamat eredménye a hidrogén képződése. [3]. A mélyen fekvő, a Föld köpenyéből származó hidrogénfolyamatokat az 1. ábra 3 száma mutatja. A hidrogén a tektonikus lemezhatárok és kéregtörések, vetők mentén emelkedhet fel. Ezeknek a hatalmas, mélyen fekvő raktáraknak az elmélete ZGONNIK szerint azonban ellentmondásos. [15] A hidrogén a töréseken és repedéseken keresztül, vagy a kőzeteken átdiffundálva egészen a felszínig is eljuthat. A gyenge szivárgások magyarázatot adhatnak a sekély mélyedésekre, tündérkörökre – amely a felszínig eljutó hidrogén szivárgás okozta növényzet/talaj elszíneződése – hozva létre. (1. ábra 4.) Abban az esetben, ha a felszín felé szivárgó hidrogén át nem eresztő kőzetet ér el, felhalmozódhat. Ez történhet sósóréteg alatt vagy a szénhidrogén telepekhez hasonlóan porózus kőzettestben. Ebben az esetben az olajiparban használt termelőkutakhoz hasonlóan lehet kiaknázni a felhalmozódott hidrogént. További lehetőséget rejt a vasban gazdag anyakőzetek közvetlen megcsapolása is, ha viszonylag sekélyen fekszenek és repedezettek a hidrogén kitermeléséhez. (1. ábra 7, 8 szám) Továbbfejlesztett módszer a víz nagy vastartalmú kőzetekbe történő sajtolása. A leválasztott szén-dioxid felszín alatti elhelyezésével az emisszió csökkentésére is lehetőség adódik az eljárás alkalmazásával. Ezt a folyamatot a 9 számmal jelöltük az 1. ábrán.

3. A TERMÉSZETES HIDROGÉN ELŐFORDULÁSOK

A hidrogén három fő kategóriába: szabad gáz, zárvány és vízben oldott gáz formájában került besorolásba. E három kategória jelentős hidrogén koncentrációjú előfordulásait az 1. táblázatban foglaltuk össze [15].

3.1. A hidrogén szabad gázként történő megjelenése

A szabad hidrogén észlelése egyidős az emberiséggel. Már több mint 2500 éve ismert a Cirali település folyamatosan égő „fáklyája”. A gázszivárgás mérési eredményei 7,5-11,3% hidrogén tartalmú, amely HOS-GÖRMEZ és mtársai mérései alapján szezonális ingadozásokat mutat [7]. Hasonló jelenség található a Fülöp-szigeteken, ahol több mint két évszázada folyamatosan égő gázlángokról számoltak be. A hely neve *Los Fuegos Eternos* (örök láng), ahol a mért hidrogénkoncentráció 41,4 és 44,5% között változik. Mindkét előfordulás az ofiolitokhoz kapcsolódik, és olyan régiók, ahol az elméletek szerint az óceáni kéreg tektonikus erők hatására emelkedett fel. A szakirodalmi dokumentációkban az ofiolitokból származó gázok összetételét is megvizsgálták. Ez alapján további kategóriákat, hidrogénben gazdag, nitrogénben gazdag és vegyes N_2 - H_2 - CH_4 vagy H_2 - CH_4 . különíthetünk el [13].



1. ábra

A hidrogén képződés lehetséges felszín alatti folyamatai [3]

3.2. A hidrogén megjelenése zárványokban

A kőzetek zárványaiból kinyert gázok elemzése nagy értékkel bír a kutatók körében. Kiemelt gondossággal kell követni a gáz kivételére alkalmazott módszertant. Ha a kőzetmintát magas hőmérsékletnek teszik ki, megolvastják vagy savban oldják fel, téves információkat kaphatunk a hidrogéntartalommal illetően. Magmás eredetű kőzetek gázzárványaiban akár 99% hidrogéntartalommal is találkozhatunk. A vulkáni eredetű kőzetminták gázzárványainak összetételéről Szokolov kutatásai átlagban 45% koncentrációt prognosztizálnak [15]. A hidrogént különféle bányákból és ércetekből származó ásványok zárványaiban is kimutatták, például vas, urán, arany, nikkel, króm és polifémes ércekben. Kimutatták továbbá, hogy a hidrogén koncentrációja az arany- és volfrámérc-lelőhelyek kvarczzárványaiban a mélységgel nő. Aranytartalmú erekben rendkívül magas is lehet: 200-460 cm³/kg a kőzetben, ami több százszorosa a szomszédos kőzettestekének. A hesseni és türingiai sólelőhelyekből származó gázzárványok sok mintában hidrogén jelenlétét mutatták ki, és a maximális koncentrációt a türingiai mintáknál 32,9%-os, a hesseni mintáknál a 26,4%-os aránnyal érték el [15].

3.3. A felszín alatti vizekben oldott hidrogén

A korábbi Szovjetunió területéről származó felszín alatti fluidumokban oldott hidrogéntartalmat részletesen tanulmányozták. A mintegy 2000 elemzés feldolgozásából hidrogén anomália térkép is született. A tanulmányok kimutatták, hogy magasabb hidrogénkoncentráció figyelhető meg azokon a területeken, amelyek tektonikus tevékenységhez kapcsolódnak. Ezeken a területeken a szabad hidrogéngáz magas koncentrációját figyelték meg a talajvíz-figyelő kutakban. A szakirodalmi forrásokra támaszkodva változatos képet kapunk a felszín alatti vizek hidrogéntartalmára vonatkozóan. A feldolgozott források alapján nem tudunk semmilyen általános következtetést levonni a hidrogéntartalomra vonatkozóan, a mélység és a kőzettípus alapján, mivel a felszín alatti vizek

hidrogéntartalma széles skálán mozog. Például a nyugat-szibériai talajvizekben oldott gázok a statisztikai vizsgálatok alapján, az összes minta 15%-ában tartalmaztak hidrogént. Koncentrációja pár % és több 10% között változott és a mintavételi mélységgel nőtt. Magas hidrogénkoncentráció ismert 24 dél-afrikai kút esetében, melyek repedezett vízadóban létesültek. Az oldott hidrogén koncentrációja nem korrelált a mélységgel, a sótartalommal, a pH-értékkel, a kőzettípussal, a fúrások korával, a repedezett víztartó korával vagy más mérésekkel, de a legmagasabb koncentrációkat jellemzően a mélyebb, erősen sós, régebbi, repedésekből származó vizekben találták. Az ukrain Krím-félszigetről származó 45 talajvízminta elemzése 0,2-53,6%-os koncentrációban tartalmazott oldott hidrogént, a hidrogénkoncentráció és az összes oldott anyag tartalom a mélységgel egy nagyságrenddel nőtt [15].

1. táblázat *Hidrogén felfedezések [15]*

Szabad hidrogéngáz felfedezések		
Hidrogén tartalom [%]	Megjegyzés	Helyszín
81-97	Gáz szivárog a felszínre. Feltételezett eredet: szerpentinizáció	Omán Bahla, 97
48,3	A szerpentinezett dinári ofiolit öv, hiperalkáli talajvizeiben lévő gázok	Bosznia Hercegovina, Vaiceva voda
41,4-45,6	Égő gáz a Zambales ofiolit komplex peridotitjaiban. Feltételezett eredet: szerpentinizáció	Fülöp szigetek, Mount Lanat
67 felett	A Hekla vulkánból származó gázok	Izland
72–90.2	A Mihara vulkánból származó gázok	Japán
Közetek gázzárványaiban található hidrogén [cm³/kg]		
8,8-40,8	A Mayndayntal-hegységből származó zúzott kvarcban.	Kazahsztán
76,4	A Kola bázikus masszívumok piroxenitjeiben	Oroszország
20% legfeljebb	Az összes szénminta 40%-a legfeljebb 10% H ₂ -t tartalmaz; A karagandi szénbányákban a kőzetminták 80%-a legfeljebb 18% H ₂ -t tartalmaz	Kazahsztán
Hidrogén felfedezések vízmintákban		
25,4	Édes rezervoár jura kori üledékekben, Robe 917 kút	Ausztrália
26	Édesvíz rezervoár, J. Polasky 1 kút.	USA, Washtenaw
0,05-10,3	A DR548-as kút repedezett prekambriumi kőzeteiből származó vizekből. Eredet valószínűleg radiolízis, 7410 µmol/L (a legmagasabb koncentrációjú mintánál 10,3%)	Dél-Afrika

4. A TERMÉSZETES HIDROGÉN KIAKNÁZÁSÁRA FÓKUSZÁLÓ PROJEKTEK

A természetes hidrogén kitermelése a szénhidrogén kitermelésre alkalmazott technológia adaptálásával valósítható meg. A kőzetrétegek harántolására fűróberendezést használnak geofizikai szeizmikus eredmények birtokában. Az utóbbi években az intenzív kutatások eredményére egyre több természetes hidrogén rezervoárok termelésére létesülnek projektek. Az alábbi fejezetben három megvalósult, illetve megvalósítás alatt lévő munkaprogramot mutatunk be. A világ vezető természetes hidrogén kutatással foglalkozó országai között említhetjük meg az Egyesült Államokat, Ausztráliát, Franciaországot. Utóbbi jelentős eredményeket ért el több magasabb hidrogéntartalmú forrás azonosításával.

4.1. Bourakebougou gázmező

A természetes hidrogéntermelés egyik példája különösen meggyőző. Maliban egy kis falu határában 1987-ben víz után kutattak, és ebből a célból kezdték a kút fúrását. Víz nem találtak, de tiszta gáz áramlását figyelték meg. Miközben mélyítették és már 112 méter mélységnél jártak, a kút berobbant. Ekkor vált

világossá, hogy a gáz nagy mennyiségű hidrogént tartalmaz. A kutat sikerült elfojtani, elcementezni. Majd 25 év elteltével nyitották újra meg, hidrogén termelésre. A gázelemzés 98% hidrogén, 1% nitrogén és 1% metán jelenlétét igazolta. A hidrogént a szomszédos falu villamosenergia ellátásra használták fel [2]. Bourakébougou természetes hidrogénkészletének becsléséhez a Hydroma 24 kutat fűrt 2018 óta 8 km sugarú körben. Ezek mélysége 105 és 1807,4 m között változik és öt rezervoárt azonosítottak. A magfűrésok teljes hossza eléri az 5,4 km-t. A Bourakébougou-ban található hidrogén pontos forrása, valamint az, hogy aktívan szivárog-e, és így hosszabb időn keresztül feltöltődik-e a mező, nem ismert. A kutak termelési adatai alapján megállapítható, hogy a rezervoárnak folyamatos hozzá táplálása van, a termelésbe állítás óta csupán 4 báros nyomáscsökkenés volt észlelhető. A felszínre telepített hidrogén érzékelők nem mutatnak szivárgást, ezek alapján az valószínűsíthető, hogy a molekulaméret és a kémiai rekombinálóképesség alapján a vártakkal ellentétben a fedőkőzetek lehetővé teszik a hidrogén felhalmozódását a rezervoárban [2].

Ha a költségek tekintetében vizsgálódunk értékelnünk kell a Maliban felszínre hozott hidrogén árát is. Összehasonlítva az eddig ismert legolcsóbb technológiával, ami a metán gőzreformálása, az itt megtermelt hidrogén 1 dollár/kg alatti értékkel mintegy ötöd annyi költséggel kiaknázható. Sajnos Mali jelenlegi bonyolult politikai és biztonsági helyzete miatt a természetes hidrogén kitermelése áll, a jövőbeli tervek között szerepel a hidrogén villamos energia előállítására történő felhasználása.

4.2. Ausztrália

Dél-Ausztrália jelenleg a hidrogénláz közepén van. A terület kedvező geológiával rendelkezik a természetes hidrogén rezervoárok tekintetében. Bizonyítja az is, miszerint a Kenguru-szigeten 1921-ben fűrt szénhidrogén kút gázösszetétel adatait elemezve a kihozott gáz 80% hidrogént tartalmazott. A közeli Yorke-félszigeten, közel 70% hidrogéntartalommal termeltek gázt. 2021. februárban, Dél-Ausztrália kiterjesztette az olajiparra vonatkozó szabályozását, lehetővé téve ezáltal hidrogéntermelő kutak fűrésát. A Gold Hydrogen 100%-os tulajdonosa a Ramsay Project zászlóshajójának, amely 7820 km² területet fed le a Yorke-félszigeten és a Kenguru-szigeten. A Ramsay Project ideális helyen, a dél-ausztráliai Gawler-kratonban található, ahol a vasban gazdag kőzetek radiolízise és hidrolízise folyamatban van, és természetesen előforduló hidrogén keletkezik. A tároló több mint 5 km mélységig terjed, akár 84%-ban természetes hidrogénáramlással, valamint további, akár 89%-os természetes hidrogén áramlásokkal, amelyek az alapkőzetek felett helyezkednek el. A prognosztizált hidrogénvagyon 1,3 Mrd kg [8].

4.3. Egyesült Államok

Az Egyesült Államokban, a hidraulikus rétegrepesztés és a palagáz szülőföldjén a szabályozási környezet lazább. A geofizikai adatok alapján úgy tűnik az Egyesült Államok valószínűleg két hidrogénben gazdag területtel rendelkezik. Az egyik körülbelül 10-20 kilométerre van a Keleti Parttól, ahol vasban gazdag köpenykőzetek fekszenek körülbelül 10 kilométerrel a tengerfenék alatt. Ezekben a kőzetekben keletkezett hidrogén porózus üledékeken keresztül felfelé vándorol – talán ez a magyarázata annak, hogy miért található tündércörök a Carolina-öböl térségében a keleti parton. Egy másik potenciális forró pont Közép-Nyugaton, ahol egymilliárd évvel ezelőtt egy vulkáni hasadéknak nem sikerült kettévágnia Észak-Amerikát. Vasban gazdag köpeny eredetű kőzeteket hozott közel a felszínhez egy Minnesotától Kansasig tartó övezetben [3].

A Natural Hydrogen Energy 2019-ben fejezte be a 3,4 kilométer mély kútját egy tündércör közepén, kukorica- és szójaföldekkel körülvéve. A Nebraska államban található kút olyan mély repedések közelében található, amelyek összekapcsolhatják a hasadékvonal közeteivel. A termelvényről nincsenek fellelhető konkrét adatok, a HyTerra cég által interneten fellelhető anyagokban az írják, hogy a „gáz tiszta lánggal ég, vagyis hidrogén az uralkodó gáz” [3].

5. KONKLÚZIÓK

A természetes hidrogén jelentős lehetőségeket kínál több ágazat szén-dioxid-mentesítésében, beleértve az olyan iparágakat, mint a finomítók, a metanolgyártó üzemek és az ammóniagyártó létesítmények, villamosenergia ipar. Ezen túlmenően a közlekedési ágazat terjeszkedésre készül az új e-üzemanyagok fejlesztése és az ammónia alternatív üzemanyagként történő elfogadása révén. A hidrogént használó lokális energiatermelés vonzó lehetőség, és a földgázhálózatba történő hidrogén bekeverésével kapcsolatos, folyamatban lévő vizsgálatok azt prognosztizálják, hogy bizonyos hidrogén tartalomig kompatibilisek lehetnek a meglévő infrastruktúrával. A fosszilis tüzelőanyagok ígéretes helyettesítőjeként jelenik meg. A természetes hidrogén különféle ágazatokba való integrálása így felgyorsíthatja a fenntarthatóbb és alacsony szén-dioxid-kibocsátású gazdaságra való átállást hozzájárulva a költségek csökkentéséhez.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) támogatta.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1.] ANGINO, E.E., ZELLER, E.J., DRESCHHOFF, G.A.M., GOEBEL, E.D., COVENEY, R.M.J., 1988: Anomalous hydrogen soil gas concentrations: relations to Kansas gravity, magnetic and structural anomalies. *Geological Society of America Abstracts*, **c. 4636**.
- [2.] PRINZHOFER, C.S., TAHARA CISSE, A., BOUBACAR, A.B., 2018: Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*, **43/42**, 19315–19326.
- [3.] HAND, E., 2023: Hidden Hydrogen, Does Earth hold vast stores of a renewable, carbon-free fuel? *Science*, **379/6633**: 630-636
- [4.] FROST, B.R., BEARD, J.S., 2007: On silica activity and serpentinization. *Journal of Petrology*, **48/7**, 1351–68.
- [5.] GREGORY, S, BARNETT, M., FIELD, L., MILODOWSKI, A., 2019: Subsurface microbial hydrogen cycling: natural occurrence and implications for industry. *Microorganisms* **7/2**, 53.
- [6.] HEADLEE, A.J.W., 1962: Hydrogen sulphide, free hydrogen are vital exploration clues. *World Oil*, **Nov.**, 78–83.
- [7.] HOSGÖRMEZ, H., 2007: Origin of the natural gas seep of Cirali (Chimera), Turkey: site of the first Olympic fire. *Journal of Asian Earth Sciences*, **30/1**, 131–141.
- [8.] <https://www.goldhydrogen.com.au/ramsay-project/>
- [9.] MENGYELEJEV, D. 1988: Выписка из протокола заседания отделения химии русского физико-химического общества. *Журнал Русского Физико-Химического Общества* **20**, 536.
- [10.] MILKOV, A.V., 2022: Molecular hydrogen in surface and subsurface natural gases: abundance, origins and ideas for deliberate exploration. *Earth-Science Reviews*; **230**, 104063, 1–27.
- [11.] SANZ, J.L., RODRIGUEZ, N., ESCUDERO, C., CARRIZO, D., AMILS, R. 2021: Biological production of H₂, CH₄ and CO₂ in the deep subsurface of the iberian pyrite belt. *Environmental Microbiology* **23/7**, 3913–3922.
- [12.] STEINTHORSDDOTTIR, K., DIPPLE, G.M., CUTTS, J.A., TURVEY, C.C., MILDRAGOVIC, D., PEACOCK, S.M., 2022: Formation and Preservation of brucite and awaruite in serpentinized and Tectonized mantle in central British columbia: implications for carbon mineralization and nickel mining. *Journal of Petrology*, **63/11**, 1–25.
- [13.] VACQUAND, C., DEVILLE, E., BEAUMONT, V., GUYOT, F., SISSMANN, O., PILLOT, D., ARCILLA, C., PRINZHOFER, A., 2018: Reduced gas seepages in ophiolitic complexes: Evidences for multiple origins of the H₂-CH₄-N₂ gas mixtures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **223**, 437–461.
- [14.] VOITOV, G.I., RUDAKOV, V.P, 2000: Hydrogen in the air of subsoil deposits: its monitoring and application potential. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*, **36/6**, 511–518.
- [15.] ZGONNIK, V., 2020: The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review, *Earth-Science Reviews*, **203**, 103140.