Természetes hidrogén és kutatásának aktuális helyzete

Mayer Zoltán[1], Békési Eszter[2], Gelencsér Orsolya[3], Tari Gábor[4]

[1] *Magyar Hidrogén és Tüzelőanyag-cella Egyesület, Budapest*
[2] *HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron*
[3] *The University of Texas at Austin, United States*
[4] *OMV Energy, Vienna, Austria*

Az elmúlt időszakban – az egyébként is sokféle hidrogéntípus mellett – egyre gyakrabban kerül említésre az ún. természetes vagy geológiai hidrogén kérdésköre. Angolul ezt „native", „natural" vagy „geological hydrogen" néven említik, és a manapság oly divatos színkódok szerint fehér vagy arany, esetleg narancssárga hidrogénként szokták hivatkozni. Jelen cikk keretében elsődlegesen a természetes hidrogén kifejezést használjuk, melynek ennek fő jellemzője, hogy a földkéreg egyes természetes folyamatai eredményeként spontán keletkezik. Szerencsés földtani adottságú helyeken becsapdázódhat, felhalmozódhat és – a jövőben, többé-kevésbé hasonlóan a földgázhoz – akár bányászati módszerekkel kitermelhetővé válhat. Ez szöges ellentétben áll az összes, eddig használt és ismert hidrogéntípussal, amelyeket valamilyen eljárással (pl. földgáz reformálással (SMR), elektrolízissel stb.), és valamilyen primer energia (fosszilis energiahordozók, megújuló vagy nukleáris energia alapú villamos energia stb.) felhasználásával állítanak elő. A természetes hidrogén a szakemberek, a befektetők, és szakpolitikai döntéshozók figyelmét is kezdi vonzani, mivel alacsony költségű, kedvező klímavédelmi paraméterekkel rendelkező energiaforrásként tekintünk rá. Azonban azt is tudni kell, hogy nagyon sok még körülötte a bizonytalanság, különösen a valós potenciálját és a kitermelés technológiai érettségi szintjét tekintve.

*

In recent times, in addition to the already diverse types of hydrogen, the issue of so-called natural or geological hydrogen has been mentioned more and more often. It is referred to as "native", "natural" or "geological hydrogen", and according to the color codes that are so fashionable today, it is usually referred to as white or gold, or even orange hydrogen. In the framework of this article, we primarily use the term natural hydrogen, the main characteristic of which is that it is formed spontaneously as a result of certain natural processes in the earth's crust. It can be trapped, accumulated in places with fortunate geological conditions and – in the future, more or less similarly to natural gas – it can even be extracted by mining methods. This is in stark contrast to all the hydrogen types used and known so far, which are produced by some process (e.g. natural gas reform (SMR), electrolysis, etc.) and by using some primary energy (fossil fuels, renewable or nuclear-based electricity, etc.). Natural hydrogen is starting to attract the attention of professionals, investors and policymakers as well, as it is seen as a low-cost energy source with favourable climate protection parameters. However, it should also be known that there is still a lot of uncertainty surrounding it, especially in terms of its real potential and the level of technological maturity of extraction.

* * *

Bevezetés: energiaforrás vagy energiahordozó?

A hidrogénnel kapcsolatos egyetemi előadások során – fő szabályként – hangsúlyozni szoktuk, hogy a hidrogén nem energiaforrás, hanem egy másodlagos (szekunder) energiahordozó, hiszen alapvetően valamilyen vegyületéből és valamilyen primer energiaforrás felhasználásával kell előállítani. Tiszta, molekuláris hidrogén ugyanis – nagyon csekély kivételtől eltekintve – nem fordul elő földi körülmények között, hanem csak valamilyen vegyületként. A természetes hidrogén esetében e fő szabály tulajdonképpen nem érvényes, ugyanis, ha a következőkben leírtak szerint bizonyos geokémiai folyamatok során spontán keletkezik és bányászati módszerekkel kitermelhető ipari léptékben is értelmezhető mennyiségben, akkor e hidrogéntípusra valóban akár primer energiaforrásként is tekinthetünk majd a jövőben, és nem csak szekunder energiahordozóként értelmezhetjük.

Geokémiai, geológiai háttér: hidrogénképződés, migráció, felhalmozódás

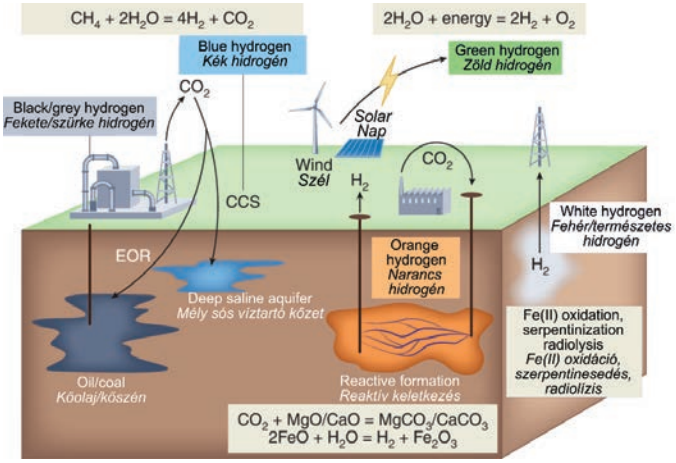
A geológusok jelenlegi ismeretei szerint számos természetes folyamat létezik, amely hidrogént képes termelni a földkéregben, de a geológiai hidrogén potenciál megértéséhez meg kell határozni, hogy ezek közül melyek képesek érdemi mennyiségű hidrogén termelésre, és a keletkező hidrogén hol képes felhalmozódni. Az egyik ilyen fő folyamat a szerpentinizáció, melynek során a víz nagy hőmérsékleten (~300 °C) reagál vasban gazdag ásványokkal. Egy másik természetes hidrogéntermelő folyamat a víz radiolízise, melynek során a földkéregben lévő radioaktív elemek ionizáló sugárzás hatására bontják a pórusvizet, és ennek során keletkezik a hidrogén. Mielőtt rátérnénk ezen folyamatok elemzésére, érdemes tisztázni, hogy a felszín alatti gázok közül a hidrogén mozgékonysága és reakciókészsége kiemelkedő, ezért hosszú ideig azt feltételezték, hogy nagy mennyiségű hidrogéngáz nem halmozódhat fel. Ezt a véleményt alátámasztotta a szénhidrogén fúrások során szerzett tapasztalat is, hiszen az elsősorban üledékes medencékben mélyített kutakban ritkán, de találtak jelentős hidrogéngáz-koncentrációt.

Az elmúlt néhány évtizedben lényegesen megváltozott a hidrogéngáz-felhalmozódásokról alkotott kép, főként a mali Bourakébougou hidrogénmező 1987-es felfedezésének köszönhetően, ahol víz keresése közben majdnem tiszta (98%) hidrogéngázt találtak [1]. Ezt követően, 2017-től körülbelül 30 kutatófúrást mélyítettek, amelyek jelentős hidrogéngáz-készletet tártak fel. Az itt nyert hidrogént helyben hasznosítják is, például közvilágítás céljára, kisléptékű helyi energiatermelésre. Azonban a mennyiség és a távoli lokáció miatt nincs valós ipari potenciálja a Bourakébougou hidrogénmezőnek. Viszont példájának hatására a Föld különböző területein indultak kutatások a potenciálisan kitermelhető hidrogénfelhalmozódások feltérképezésére.

A hidrogénképződés fő folyamatai:

1.) A legjelentősebb hidrogéntermelő folyamatok közé tartoznak a víz és kőzet közötti kölcsönhatások, különösen a szerpentinesedés, amely során a víz a redukált vas (ferro) ionban (Fe_2+) gazdag ásványokkal lép reakcióba, és ennek következtében molekuláris hidrogén keletkezik (2 FeO + H_2O = Fe_2O_3 + H_2). A szerpentinesedés során történő hidrogénképződés magasabb hőmérsékleten (200–300 °C) a leghatékonyabb, és főként köpenyeredetű ultramafikus kőzetekhez, például kontinensre tolódott óceáni kőzetlemez darabjaihoz, azaz úgynevezett ofiolit sorozatokhoz kapcsolódik.

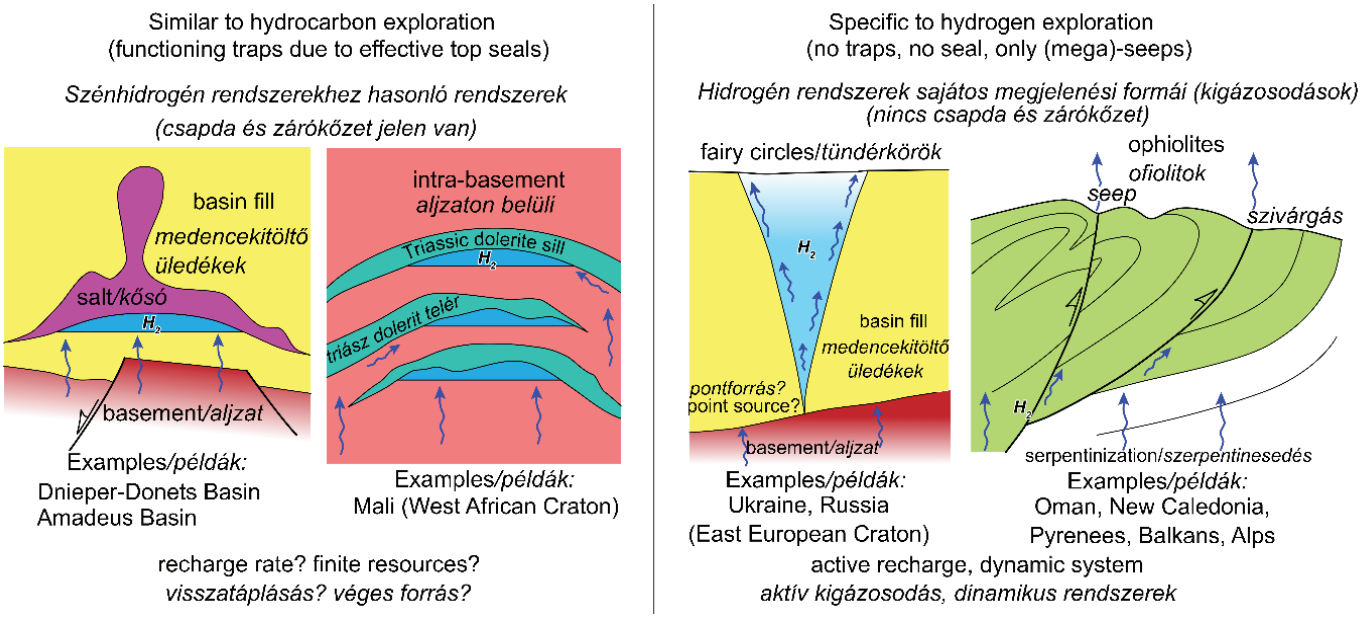
2.) Egy másik lényeges hidrogéntermelő mechanizmus a radiolízis, amely a földkéregben, főként az idős, archaikum-proterozoikumi kontinens magokat, ősmasszívumokat alkotó kőzetekben előforduló, az átlagos földkéreghez képest nagyobb mennyiségben jelenlévő radioaktív elemek (urán, tórium, kálium40) által kibocsátott ionizáló sugárzás hatására bontja a kőzetben keringő felszín alatti vizet. A szénhidrogén fúrások ritkán érnek el ezekhez a hidrogéntermelő kőzetekhez, mivel a szénhidrogének elsősorban ezek fölött elhelyezkedő üledékes medencékben találhatók meg. Emiatt kevés adat áll rendelkezésre a potenciális hidrogén felhalmozódásokról, ami rámutat a hidrogénközpontú további kutatások szükségességére.



1. ábra. **A hidrogén és a kőzetek kapcsolata.**
Forrás: Gelencsér O. előadása 2024.04.11
MHTE tagvállalati workshopon. (Eredeti ábra: [2])

Bár a hidrogéngáz oldhatósága a felszín alatti közeg fluidumaiban mélységtől erősen függ, a hidrogén elsősorban gázkeverék formájában, nem pedig tiszta gázként vándorol a forráskőzettől sekélyebb mélységtartományba. A migráció legvalószínűbb útja vetőzónákhoz és repedéshálózatokhoz kötődik, azonban a hidrogénmolekula kis kinetikus átmérője (2,89 Å), valamint a szénhidrogénektől eltérő fizikai és kémiai jellemzői – különösen a hidrogéngáz diffuzivitása szilárd fázisokban – miatt a migrációs folyamatok modellezése komoly nehézséget jelent. A szénhidrogéniparban alkalmazott migrációs modellek csak jelentős átalakítás után használhatók, figyelembe véve a hidrogén specifikus tulajdonságait és viselkedését [3].

A hidrogén magas mobilitása miatt hatékony zárókőzetek szükségesek annak csapdázódásához, amelyek megakadályozzák az oldalirányú és felfelé irányuló migrációt, és geometriai szempontból optimálisak a csapda kialakulásához. A hidrogén csapdázódási lehetősége a szénhidrogénekkel szemben jóval korlátozottabb, elsősorban rendkívül kis permeabilitású zárókőzetekhez, főként evaporitokhoz (kősó, gipsz, anhidrit) kötött, amelyek egyben a szénhidrogének esetében is a leghatékonyabb zárókőzetek. Ugyanakkor az előzőekben említett mali példa azt is mutatja, hogy tömör, repedésmentes magmás kőzet vagy teleptelér is képes zárást biztosítani. A potenciális hidrogéncsapdák élettartamára vonatkozóan még nem állnak rendelkezésre becslések (a bizonyított hidrogénmezők hiánya miatt), de a hidrogén nagy mobilitása miatt valószínűleg rövidebb ideig maradnak fenn, mint a szénhidrogén rendszerek. A szénhidrogén rendszerekkel való hasonlóságok és eltérések alapján alapvetően két nagy csoportba sorolhatók a hidrogén rendszerek (2. ábra, [3]): az egyikbe tartoznak azok, amelyeknél 1) jelen vannak a szénhidrogén rendszerek alapvető elemei (csapda-zárókőzet), a másikba pedig 2) azok, amelyek zárókőzet hiányában felszíni hidrogén kigázosodással jellemezhetők, sajátos megjelenési formákban.



2. ábra. **Potenciális hidrogén play típusok a szénhidrogén rendszerekkel való hasonlóságok és különbségek tükrében.** (forrás: [3])

Potenciál

Annak érdekében, hogy a természetes hidrogén előfordulás ne csak egy természettudományos érdekesség legyen, hanem valós ipari alkalmazás, az első lépések egyike potenciáljának meghatározása. Az USA Geológiai Szolgálatának (USGS) legfrissebb kutatása alapján a földkéregben több millió megatonna természetes hidrogén halmozódhatott fel [4]. Ez az elméleti potenciál elviekben tehát sok ezer évre képes lenne kielégíteni a globális hidrogénigényeket. A becslés azonban jelentős bizonytalanságot hordoz, mivel a hidrogénfelhalmozódások pontos mérete és elhelyezkedése egyelőre ismeretlen. A készletek jelentős része vélhetően túl mélyen, túl távol a partoktól, vagy túl szétszórtan helyezkedik el a gazdaságos kitermeléshez. Ugyanakkor még a becsült mennyiség töredéke is több száz évre biztosíthatná a globális keresletet. Az USGS a globális kitekintés mellett az Egyesült Államok potenciálját is részletesen vizsgálta [5], ám mindkét tanulmány kiemeli: a tényleges készletek pontos meghatározásához elengedhetetlen a hidrogénképződéshez köthető geológiai folyamatok teljesebb körű megértése.

Adott helyszínre, adott előfordulás mennyiségére, kitermelhetőségére irányuló kutatások több országban elkezdődtek, például Franciaországban, Kínában, USA-ban, amelyekről részletesebb információkat a következő fejezet tartalmaz. A természetes hidrogénnel kapcsolatban ugyanakkor számos kérdés merül fel. Keletkezési, migrációs és felhalmozódási folyamatai még nem teljesen ismertek, a kutatáshoz szükséges eszközök és tapasztalatok pedig fejlesztésre szorulnak. Bár a természetes hidrogén rendszerek bizonyos vonatkozásokban hasonlítanak a szénhidrogén rendszerekhez – így a már bevált kutatási módszertanok részben alkalmazhatók [3] –, a források kiaknázása érdekében elengedhetetlen a hidrogén rendszerek teljesebb körű megértése, és további a kutatási eszközök, módszertanok fejlesztése.

Annak ellenére, hogy az első természetes hidrogén forrás véletlen felfedezése 38 éve történt Maliban, a hidrogén felhalmozódását a föld alatt korábban valószínűtlennek tartották, mivel a hidrogén képes átszivárogni a kőzetrétegeken. Ma már azonban olyan új berendezések, például hidrogénérzékelő gázszondák állnak rendelkezésre, amelyek akár 1500 méteres mélységben is képesek kimutatni az oldott hidrogént a kőzetformációkban [11].

Bár a természetes hidrogén kitermelése még meglehetősen gyerekcipőben jár, de a támogatói szerint a kőolaj- és földgázkitermelésben alkalmazott, meglévő technológiák és eljárások e hidrogénforrás esetében is felhasználhatók; kiegészítve néhány olyan elemmel, amelyeket az ásványi és geotermikus erőforrások feltárásából vehetők át. Ugyanezen a véleményen van az ausztrál Gold Hydrogen vállalat is, amely szerint az Eyre-félszigeten található Ramsay projektje[1] „nem különbözik” a sikeres olaj- és gázprojektektől, különösen a korai szénparázs-gáz (CSG) és palagáz vállalkozásoktól.

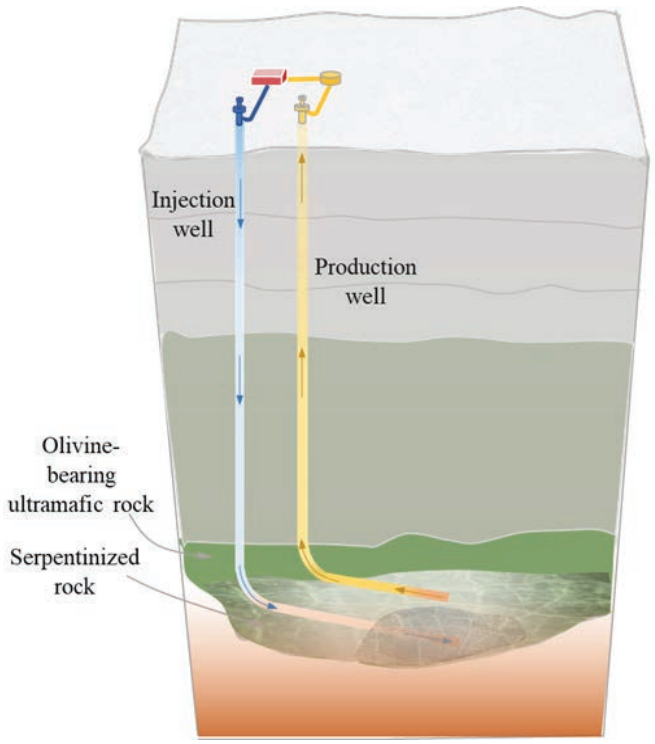
Egy további érdekes hidrogéntípus: stimulált hidrogén

A természetes (geológiai) hidrogén mellett meg kell említenünk egy, ezekkel „rokon” hidrogéntípust, a stimulált hidrogént, amelyet – a nem hivatalos színkódos nevezéktan szerint – esetenként narancssárga hidrogénként említenek. A stimulált hidrogén koncepciója is megjelenik az 1. ábrán. Az angol szaknyelvben *„stimulated hydrogen”, „enhanced hydrogen generation”, „engineered / induced geochemical hydrogen production”* kifejezésekkel illetik.

A stimulált geológiai hidrogén olyan technológiai megközelítések összessége, amelyek célja a földkéregben természetes módon jelen lévő, de alacsony intenzitással zajló hidrogénképző folyamatok mesterséges felerősítése [2]. A koncepció abból indul ki, hogy a korábban említett, geológiai környezetben keletkező hidrogén (pl. szerpentinesedés, radiolízis) reakciósebessége lassú, vagy lokálisan korlátozott, hogy gazdaságosan kitermelhető mennyiség képződjön. A stimuláció célja, hogy ezeket a reakciókat felgyorsitsa. A természetes folyamatok műszaki megoldásokkal való felgyorsítása bevett gyakorlat a nyersanyagkutatás hagyományosabb szegmenseiben, mint az ércbányászat, a szénhidrogén kitermelés. Ami a stimulált hidrogént illeti, alapvetően két fő technológiai irány bontakozott ki eddig.

i) Injektált fluidummal gyorsított kőzet-víz reakciók

Egyik elképzelés szerint a kőzet-víz reakciók során képződő hidrogén egy a felszínről fúráson keresztül injektált fluidummal lehetne felgyorsítani. Tehát az injektált oldat lejutva a kőzethez, megváltoztatná a meglévő pórusvíz összetételét, továbbá nagyobb nyomással érkező fluidum repedéshálózatot képezve növelné a kőzet reaktív felületét, ezáltal felgyorsítaná a hidrogénképző folyamatokat. Bár valódi példa még nincs stimulálásra, a más területről szerzett tapasztalatok alapján feltételezhető, hogy a reagens oldatok (pl. CO_2 telített víz) injektálása elősegítheti a kőzet oldódását, mivel a szilikát ásványok oldódása pH-függő. A CO_2 telített (pH~4) víz jobban oldja a kőzetalkotó ásványokat, mint a neutrálisabb vizek, igy segítve elő a hidrogénképződést. Olivin és piroxén ásványok a fő Fe-tartalmú szilikátok bizonyítottan gyorsabban oldódnak alacsony pH-jú ol-



3. ábra. **A stimulált hidrogén termelés elmélete. Injektáló kút olyan fluidumot juttat a redukált vasat tartalmazó kőzetrétegbe, amely elősegíti a hidrogén képződést, amelyet egy termelő kúton keresztül juttatnak a felszínre.** (Forrás: Berkeley Lab)

[1] Gold Hydrogen öt évre szóló engedélyt kapott az ausztrál kormánytól a Ramsay projektjének fejlesztésére. A vállalat a 2023 végén végzett fúrások során magas, akár 86%-os hidrogénkoncentrációt talált. A Gold Hydrogen 2024-ben további fúrásokat tervezett, és kísérleti megvalósíthatósági tanulmányt dolgoz ki.

datban. A módszer előnyei, hogy viszonylag jól kontrollálható oldat a CO_2-telített víz. Az oldat és a kőzet kölcsönhatása során a CO_2 megkötődik a felszín alatt, így elősegítheti a CO_2 emisszió csökkentését is. Az injektálásra már viszonylag jól fejlett technológia elérhető. Azonban számos kérdés vár még megválaszolásra. Ha az ásványok oldódását sikerül is felgyorsítani, még kevés információ van arról, hogy a kioldódó vas egy az egyben átváltható-e hidrogén gázzá, vagy nem épül-e be új ásvány fázisba redukált formájában. Az injektálás költségei jelentősek és szigorúbb szabályozás várható, mint egy egyszerű kitermelő kút esetében.

ii) Elektromos kőzetrepesztés (electro-fracturing)

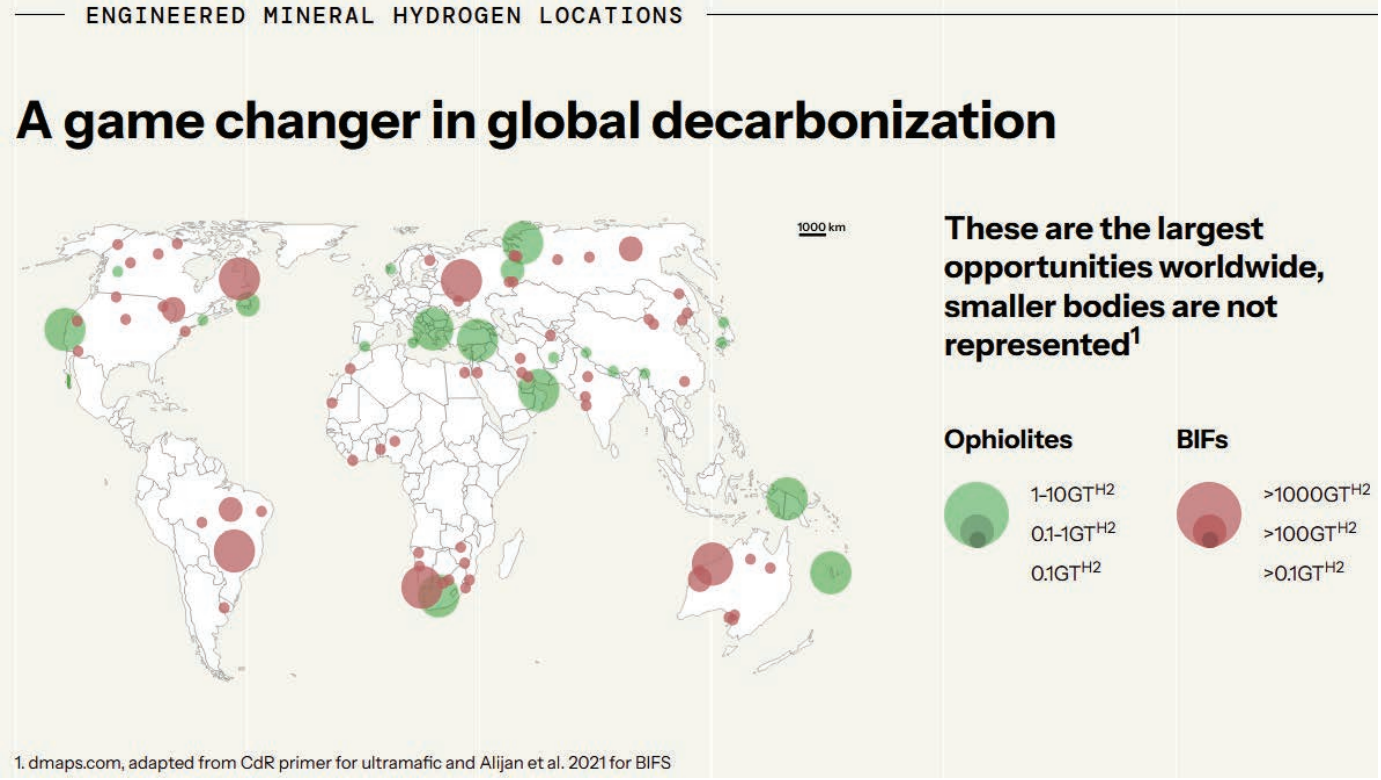
Másik, aránylag új megközelítés, az elektromos kőzetrepesztés (electro-fracturing), amelyet az elmúlt évben a világon először Ománban teszteltek (Eden GeoPower, 2024). A szabadalmaztatott technológia alapja, hogy a felszínről nagyfeszültségű elektromos impulzusokat juttatnak a célrétegekbe, amely lokálisan megemeli a kőzet hőmérsékletet és repedések keletkeznek. Ezek együttesen növelik a reakció sebességét és a reaktív felületet. A hagyományos rétegrepesztéssel ellentétben, itt nincs szükség fluidum injektálásra és a repedésrendszer kialakítása kontrolláltabb körülmények között zajlik.

E technológia hatékonyságának a bizonyítása még szintén várat magára. Kihívás lehet a repesztéshez szükséges energiaigény optimalizálása, a mesterségesen létrehozott repedéshálózat környezetre, igy pl. a felszínre gyakorolt hatása (indukált szeizmicitás).

Valószínűsíthetően az első, tényleges terepi projekt a stimulált hidrogén előállítására és kitermelésére 2026 márciusában kezdődött a kanadai Québecben. Itt a kaliforniai székhelyű Vema Hydrogen kezdte meg két pilot jellegű fúrás mélyítését. A cég által fejlesztett technológia segítségével vizet injektálnak a vasban gazdag ásványokból álló kőzetbe, hogy ezzel serkentsék a természetes hidrogénképződési folyamatokat. A start-up vállalat szerint ezzel 1 USD/kg alatti hidrogénár érhető el, ami alatta van még a hagyományos, földgáz alapú, „szürke" („unabated") hidrogén előállítási költségének is. A pilot kutakat arra fogják használni, hogy elemezzék a felszín alatti fluidum-áramlásokat, reakciókat és azok sebességét, valamint a hidrogénkihozatalt. A Vema Hydrogen szándékai szerint a pilot projektből nyert adatok felhasználhatók a kereskedelmi léptékű működés modellezésére. E kritikus adatok szükségesek ahhoz, hogy a stimulált (mérnöki) hidrogén technológiája validálható legyen kereskedelmi léptékben és bizonyítható legyen az is, hogy Québec megfelelő földtani adottságú területein van értelme stimulált hidrogén projektekbe kezdeni [13].

Bár a technológia még korai érettség fázisában van, de a Vema Hydrogen-nek sikerült 2025 végén egy felvásárlási megállapodást kötni a kitermelendő hidrogénre a Verne Power céggel, amely adatközpontok energiaellátásához használná fel a hidrogént 2028-tól. Ha sikeres lesz a projekt, akkor ez versenyképes hidrogénellátását tudna biztosítani a jelenlegi low-carbon és/vagy zöld hidrogén árszintekhez képest, miközben a kitermelés helyszínválasztása rugalmasabb lehet, mint ha tisztán a természetes (geológiai) hidrogén formációk helyéhez lenne kötve a kitermelés. A Vema Hydrogen főként ofiolitos (felszínre került óceáni földkéreg és felsőköpeny együttese) és BIF (Banded Iron Fromation, magyarul sávos vasérc) formációkat tartja szem előtt a stimulált hidrogén projektjeihez, amelyek szerencsésen gyakran nagy ipari központok közelében helyezkednek el, tehát nőhet az esély a stimulált hidrogén technológiájának alkalmazására. A legjelentősebb ilyen előfordulásokat az 4. ábra szemlélteti [13], [14].

Összefoglalva: a stimulált geológiai hidrogén technológia a természetben lezajló folyamatokat erősíti fel. Azonban a megfelelő geológiai környezet kiválasztása és a geokémiai reakciók kinetikájának megértése kulcsfontosságú ahhoz, hogy a stimuláció



4. ábra. **Az ofiolitos és sávos vasérc (BIF) főbb előfordulások világszinten.** Kép: Vema Hydrogen

hatékony és gazdaságilag is életképes legyen. Bár a stimulált hidrogén technológiája, illetve gyakorlati megvalósítása még nagyon korai fázisban van, de alapkoncepciója hasonló a hőszivattyús megoldásokhoz: némi primer energiabefektetéssel nagy mennyiségű (többszörös) környezeti hő nyerhető, amely az EU-s és hazai szabályozás értelmében megújuló energiának minősül. Az analógia hidrogénre: a fent említett injektálásos vagy kőzetrepesztéses módszerrel nagyobb hidrogénkihozatal érhető el, miközben a hidrogénelőállításhoz szükséges körülményeket dominánsan a környezet adja.

Kormányzati kezdeményezések

Míg a fosszilis alapú „szürke" hidrogén ára átlagosan ~2 USD/kg (a földgáz árától erősen függően), addig a természetes hidrogén ára - a lelőhely tisztaságától és mélységétől függően – várhatóan 1 USD/kg körül lesz. Nyilván ennek is köszönhető, hogy 2021 óta egyre több új természetes hidrogénkutató vállalkozás indult. A Rystad Energy 2024. márciusi becslése szerint 2023 végén 40 vállalat kutatott természetes hidrogénlelőhelyek után, szemben a 2020-as mindössze 10 vállalattal.

A kérdéskörrel még az amerikai szenátus is foglalkozott a közelmúltban, a szenátus energiaügyi és természeti erőforrásokkal foglalkozó bizottságában. Evelyn Wang, a DoE (US Department of Energy) Advanced Research Projects Agency-Energy igazgatója a szenátorok előtt elmondta, hogy a természetes hidrogén kinyerési technológiák megvalósítása – részben - „elsődleges energiaforrássá" tenné a hidrogént – ahogy erre a cikk bevezetőjében már utaltunk. Ugyanez a szenátusi bizottság meghallgatta Dr. Geoffrey Ellis-t, az Amerikai Földtani Intézet (USGS) kutatógeológusát, aki elmondta, hogy az USGS egyik jelentése szerint a földkéregben mintegy ötmilliárd tonna természetes hidrogén lehet. Ezen „általános", nagyívű becslés mellett azért az USGS honlapján az a megállapítás is szerepel, hogy „mindössze egy probléma van: kevés tudományosan megalapozott információ áll rendelkezésre arról, hogy mennyi hidrogén van a föld alatt, és hogy az hol található" [12].

Az egyik előfordulás helyén, a franciaországi Lotaringiában található lelőhely felfedezését követően Emmanuel Macron, francia elnök felszólította a vállalatokat, hogy tárják fel a természetes hidrogénben rejlő lehetőségeket, és engedélyezte egy kutatási projekt elindítását a Pyrénées-Atlantiques régióban, miközben finanszírozást is ígért ehhez.

Jelenleg – Franciaországon túlmenően - Ausztráliában, az Egyesült Államokban, Spanyolországban, Albániában, Kolumbiában, Dél-Koreában, Kanadában, Kínában és a Fülöp-szigeteken folynak természetes hidrogén feltárási munkálatok.

Vállalati kezdeményezések, befektetések, kutatások

Franciaország:

2025 decemberében a La Française De L'Énergie (FDE) – önmagát low-carbon energiatermelőként azonosító vállalat – 8,8 millió eurós támogatással – megkezdte Franciaország első mély, természetes hidrogén kútjának fúrását Moselle megyében. Az adott helyszínen, a „Folschviller 1A" kútnál még 2023-ban fedezte fel az FDE a természetes hidrogén előfordulást, amit a mostani fúrással terveznek elérni és kitermelni. Az új, dedikált PTH-2 kút fúrásával az FDE további innovációkat hajt végre, amellyel közvetlenül a föld alatti hidrogénképződési zónát veszi célba. A fúrás kb. 3000 méter mélységű, amelyben mérik a hidrogén koncentrációját, és igyekeznek minél pontosabban meghatározni a potenciális mennyiségét.

A „REGALOR II" néven ismert K+F program célja továbbá az új generációs mérőberendezések (SysMoG szondák) tesztelése, ezen elsődleges energiaforrás eredetének megerősítése és mennyiségének validálása. A PTH-2 kút fúrása körülbelül három hónapot vesz igénybe, a mérések, elemzések és kiértékelések további két évig folytatódnak.

5. ábra. **Az első, geológiai hidrogén kitermelésre létesített kút az USA-ban egy nebraskai kukoricamezőn.** Kép: Natural Hydrogen Energy

6. ábra. **Természetes hidrogén kutatófúrás Franciaországban.** Kép: NatH2Investing

A fentiekkel páthuzamosan az FDE vállalat engedélykérelmet dolgoz ki a Lotaringia-medence 2254 km^2-es területére kiterjedő kizárólagos kutatási engedély megszerzése érdekében, amelynek keretében természetes hidrogénre irányuló kutatásokat végeznének. Ez a terület számos ismert felszín alatti hidrogénindikátor tekintetében mutat bíztató értékeket és a meglévő kútinfrastruktúra is kiterjedt, ami lehetővé teszi az FDE számára, hogy az engedélyek megadása után intenzifikálja a kutatásokat.

Az említett 8,8 millió eurós támogatást a Grand Est régió és az Európai Unió – a Fair Transition Alapon keresztül – biztosítja. A kereskedelmi jellegű kitermelést 2030-ra prognosztizálják, de pontosabb kitermelési adatokat a nyilvánosan elérhető források nem adnak meg.

Kína

2025 őszén Kína is megkezdte első, természetes hidrogén kutatásra irányuló kútjának (Jinhydrogen Ketan 1.) fúrását Xilinhot régióban, Belső-Mongóliában. Ezzel Kína is átlépett az elméleti kutatások fázisából a geológiai hidrogén kitermelhetőségének validálási fázisába. A tervezett kútmélység 800 méter, és célja alapvető geológiai adatok gyűjtése, valamint a hidrogénpotenciál értékelése a Xilinhot régióban. A kutatást a Pekingi Egyetem Ordos Energetikai Intézete vezeti, de a konzorciumi formában részt vesz még – mások mellett – az Inner Mongolia Gold Hydrogen Geological Exploration Co., a Pekingi Egyetem, a China National Petroleum Group olajvállalat, és a Kínai Földtani Szolgálat. A Jinhydrogen Ketan 1. kút (Arany Hidrogén Tudomány Felfedezés 1. Kút) az Erlian-medencében található a Gilgalang Tu depressziójának szélén [12].

Kanada

A Primary Hydrogen[2] vállalat 2024-ben 69,2 km^2 területű természetes hidrogén bányászati projekthez szerzett jogokat a kanadai Ontario tartományban. A terület ritkaföldfém, tórium és vasforrásokról ismert és a geológiai környezet radiogén tulajdonságai miatt természetes hidrogént is termelhet. A hidrogéntermelés itt a víz magnetittel vagy vasban gazdag kőzetekkel való kölcsönhatása révén és radiolízis során keletkezhet. 2025 tavaszán a Primary Hydrogen megállapodást írt alá a Wicheeda North projekt 75%-os részesedésének megszerzéséről, amely egy korai fázisban lévő, természetes hidrogén feltárási kezdeményezés a kanadai Brit Kolumbiában. Ez alapján a Primary Hydrogen megvásárolja a részesedést a Power One Resources-tól, egy ritkaföldfém-bányászati vállalattól, amely 2024 elején szerezte meg a területet, mert az adott helyszínen természetes hidrogén mellett egyidejűleg ritkaföldfém-jelenlét is kutatható és Wicheeda North a feltételezések szerint potenciális ritkaföldfém ásványi lelőhelyekkel is rendelkezik.

Ugyancsak Kanadában, Brit Kolumbia tartomány délkeleti részén található természetes hidrogénre irányuló engedélykérelmeket nyújtott be 2024 nyarán a Max Power nevű cég („Rider projekt"). Az első gázszondás mintavételezés egyes célterületekre kiterjedően már megtörtént, ahonnan a vállalat várja az eredményeket és az engedélykérelmek megerősítését. A MAX Power további, bányászati szempontból érdekes területeket is megvizsgál ebben a kanadai tartományban.

[2] H2-View (2024.11.26.): Primary Hydrogen secures promising natural hydrogen project in Canada

Spanyolország

Spanyolországban a Helios Aragón[3] jelentős geológiai hidrogén forrásokat feltételez a Pireneusok lábánál található területen, mindössze 0,75 €/kg költségen, ami körülbelül még a fele sincs a tradicionális, földgáz alapú szürke H_2 előállítás költségének. Ehhez a jogi környezet itt nem kedvező, mert a spanyol olajellenes szabályok útjában állnak az ilyen jellegű, természetes hidrogén kitermelési projekteknek is. A Helios Aragon Spanyolországon kívül is aktív: 2024 őszén a Rex International Holding-gal összefogva Ománban mérik fel a természetes hidrogén potenciált és a kitermelés lehetőségeit.

USA

A Fortescue megállapodott a HyTerra természeteshidrogén-kutató vállalat 39,8%-os részesedésének megvásárlásáról 14,9 millió dollárért, amivel a bányavállalat a vállalat legnagyobb részvényesévé vált még 2024-ben. A közölt információk alapján a HyTerra a befektetést arra fogja felhasználni, hogy támogassa az Egyesült Államokban, Kansas államban hat kút fúrására vonatkozó terveit a természetes hidrogén kutatására, amelyre 2024 júliusban kapott engedélyt. A ~40%-os részesedés a részvényesek jóváhagyásától függ, amelyet várhatóan a Nemaha projekt kibővített kezdeti feltárási szakaszának finanszírozására fordítanak. Ennek során a fúrás előtti területeket bővítik, és új fúrási lehetőségeket nyitnak meg, amelyeket azonosítanak. A Nemaha projekt területe mintegy 200 méterre északra található egy 2009-ben fúrt kúttól, amelyből akár 92%-os hidrogén- és 3%-os héliumtartalmú gáz nyerhető; de mértek már 96%-os hidrogén-koncentrációt is egyes kutakban. A HyTerra ezután hat kutat fúr több geológiai területen, hogy kiválassza a fejlesztésre legalkalmasabb területeket, és a Fortescue-val kötött stratégiai szövetség révén ezt a tudást, valamint az adatokat használná fel más globális lehetőségek keresésére.

A cég Nebraskában is végez természetes hidrogénre irányuló kutatásokat. Itt a hidrogén mellett a hélium is célpont, mivel a hélium piaci ára magas, jól értékesíthető és a két gáz viszonylag gyakran fordul elő együtt abban a térségben.

Összefoglalva: a természetes hidrogén témaköre – szokás szerint – kezd „hype-olt” lenni, de a valóság azért egyelőre az, hogy jelenleg csak egyetlen működő természetes hidrogén projekt van, amely Maliban, Bourakebougou településen található, amely évente mintegy 5 tonna hidrogént termel. Ez ipari méretben még értelmezhetetlenül kicsi mennyiség. Ez a kísléptékű projekt egy évtizede működik, és egy falu energiaellátását biztosítja. A világ különböző részein megvalósuló további projektek még a feltárás korai szakaszában vannak, az első európai természetes hidrogéntermelés várhatóan 2029-ben kezdődik.

Szabályozási háttér

Szintén nyitott kérdés egyelőre, hogy mi lenne a státusza a geológiai hidrogénnek a közelmúltban kidolgozott, és hatályba lépett EU-s jogszabályi környezet vonatkozásában. Az EU-s jogszabályok, elsődlegesen a Megújuló Energiák Irányelv (RED-III, (EU) 2023/2413), illetve a módosított Gázpiaci Irányelv a zöld, pontosabban RFNBO[4] státuszú, valamint az ún. low-carbon (alacsony karbonintenzitású) hidrogént definiálja, és kapcsolódó rendeletekben részletszabályokat állapít meg ezek jellemzőiről, a hozzájuk kapcsolódó, maximálisan megengedhető fajlagos üvegházgáz-kibocsátásról.

Klímavédelmi oldalról az eddigi elemzések egyike, amely a Joule című folyóiratban [8] jelent meg, a természetes hidrogénhez kapcsolódó üvegházhatásúgáz-intenzitására ~0,37 kg_{CO2eq}/kgH_2 értéket ad meg, a felszínre hozott gáz tisztaságától is függően. Ez rendkívül kedvező érték, ugyanis az EU fent említett szabályozása alapján ~3,38 kg_{CO2eq}/kgH_2 karbonintenzitás alatt már low-carbon (alacsony karbonintenzitású) hidrogénről beszélhetünk; míg a „baseline” érték ~10-11 kg_{CO2eq}/kgH_2 a széndioxid-leválasztás nélküli, földgáz alapú (szürke) hidrogén előállításra. Hangsúlyozzuk, hogy az említett, jóval 1 kg_{CO2eq}/kgH_2 alatti érték a nagy tisztaságú természetes hidrogénre igaz; azonban például egy 75% hidrogént és 22% metánt (továbbá kis koncentrációban egyéb gázokat) tartalmazó kitermelt gázelegy karbonintenzitása már ~1,5 kg_{CO2eq}/kgH_2 [6], [8]. Ez utóbbi is még mindig igen kedvező érték, de érzékelhető mértékben romlik a hidrogéntartalom csökkenésével, hiszen ez a gázelegy már fosszilis alapú metánt is tartalmaz.

Nincs még rá gyakorlati tapasztalat, de a geológiai hidrogén tehát nagy eséllyel besorolható lenne az ún. „low-carbon hidrogén” jogi kategóriába, amelyet olykor „kék” hidrogénként is említenek. Eddig e kategóriába jellemzően a földgáz alapú (SMR), de széndioxid-leválasztási és tárolási (CCS/CCUS) technológiával előállított hidrogént szokták sorolni, esetleg a nukleáris alapon előállított hidrogént. A jelenleg hatályos EU-s szabályozás alapján a geológiai hidrogén egyértelműen nem lenne besorolható a megújuló (RFNBO, „zöld”) hidrogén kategóriába. Azonban elvi alapon akár ez is megvalósulhat a jövőben, mert a geológiai hidrogén képződési sebessége igen nagy; nem hasonlítható a fosszilis energiahordozók (pl. kőolaj, földgáz) millió éves nagyságrendű képződési sebességéhez. Külön kérdés lehet – a még meglehetősen csak elméleti lehetőséget képező - stimulált („narancssárga”) hidrogén jogszabályi kategóriába sorolása, ugyanis a hőszivattyús energiatermelés analógiájára a stimulált hidrogén is minősülhetne megújuló energiának, ennek következtében pedig zöld (RFNBO) hidrogénnek. A hőszivattyúknál ugyanis – összhangban az európai szakmai és energiastatisztikai gyakorlattal – a környezeti hőt is elszámolhatjuk a kinyert nettó megújulóenergia mennyiségként. Mindez egyelőre még csak elvi lehetőség, de arról már most célszerű gondolkodni, hogy a vonatkozó EU-s jogszabályi keretekben a természetes hidrogén, annak különböző típusai milyen státuszt kaphatnak a jövőben. E jogi biztonság nagyban segítené a befektetéseket e területen és végső soron a természetes hidrogén mielőbbi piaci megjelenését.

Kapcsolódó EU-s pályázat és várható eredményei

A fentiek miatt az EU hidrogéntechnológiák demonstrációjának pályázati támogatására szakosodott szervezete, a Clean Hydrogen Partnership JU 2025-ös pályázati kiírása [11] már tartalmazott célzottan természetes hidrogénre vonatkozóan is projektet[5]. E témakiírás célja, hogy *„támogassa mindazon új módszerek, technológiák és munkafolyamatok fejlesztését, amelyek lehetővé teszik a természetes (geológiai) hidrogén kutatásának és kitermelésének fejlesztését Európában. Előállítását azonban jelentős mértékben nehezíti, hogy viszonylag kevéssé ismerjük a keletkezésének folyamatait és geológiai feltételeit, nincsenek jól bevált munkafolyamatok, és a feltárására szolgáló szabványos módszerek kidolgozása is nehéz-*

[3] H2 Insight (2024.04.06.): Massive underground reservoir of natural hydrogen in Spain ‘could deliver the cheapest H2 in the world’.

[4] RFNBO: Renewable Fuels from Non-biological Origin-gyűjtőfogalom a RED-III irányelv szerint, amely – erős leegyszerűsítéssel – főként a „zöld” hidrogént jelenti.

[5] A 2025-ben kiírt összes Clean Hydrogen Partnership hidrogéntechnológiai pályázat, magyar nyelvű változatban itt megtalálható: https://hfc-hungary.org/tan/CleanHydrogen_JU_Palyazati_Kiiras_2025.pdf

ségekbe ütközik. Hatékony detektálási módszerekre van szükség a regionális feltárásra alkalmas ígéretes területek azonosításához, míg analitikai és numerikus munkafolyamatokra van szükség annak számszerűsítéséhez, hogy egy-egy geológiai formációban mekkora potenciál rejlik az ipari méretű termeléshez megfelelő mennyiségű természetes hidrogén tárolására". A hivatkozott pályázati kiírásra 2025.04.23-ig lehetett ajánlatokat benyújtani. Azért érdemes röviden áttekinteni e pályázati kiírás szakmai követelményeit [11], mert ez jól tükrözi, hogy milyen kutatások, feladatok elvégzése szükséges jelenleg a természetes (geológiai) hidrogén terén. Másrészt – mivel e pályázatnak már megvan a győztes konzorciuma – az itt bemutatott feladatlista azt is tükrözi, hogy milyen kérdésekre várhatunk – ideális esetben – választ e kutatási projekt eredményeként. Ez értékes információforrás lehet az európai hidrogénszektor, de talán az energetikai szektor egésze számára is:

- a hidrogén felszín alatti képződését, migrációját és felhalmozódását, valamint a felszínre történő természetes kibocsátását irányító folyamatok jobb jellemzésére és megértésére szolgáló technikák, eszközök és módszerek fejlesztése, valamint a potenciális területek megbízható azonosítására szolgáló kritériumrendszer kialakítása,
- azon konkrét geológiai folyamatok és környezetek azonosítása, leírása és értékelése, amelyek potenciálisan képesek természetes hidrogént gazdaságilag életképes mennyiségben előállítani Európában,
- iránymutatások a potenciális európai természetes hidrogénforrások szisztematikus azonosítására a keletkezésükhöz szükséges kulcsfontosságú paraméterek és feltételek kombinációjának meghatározásával,
- analóg kísérletek a természetes hidrogén keletkezését és kinetikáját (mol/kg/s-ban) szabályozó in-situ körülmények (hőmérséklet, nyomás, kőzet- és fluidum összetétel) szimulálására,
- numerikus modellek a hidrogénrendszerek teljesebb körű megértésére, a forrástól (keletkezés, migráció és átalakulás), adott esetben a tározókban való csapdázódástól a felszíni szivárgásig. Lehetővé kell tennie a „hidrogénablak" meghatározását, azaz a természetes hidrogén előállításához szükséges kémiai és fizikai felszín alatti feltételeket, amelyek adott vagy általános körülmények között alkalmazhatók. Végső soron a numerikus modelleknek lehetővé kell tenniük a természetes hidrogén lehetséges mennyiségének (tonnában) és termelési arányának (tonna/évben) számszerűsítését a kiválasztott európai helyszíneken az elkövetkező években, valamint a potenciális megújuló szempontok jellemzését,
- koncepcionális tanulmány a hidrogéntermelés kiegyenlített költségéről (LCOH, *Levelized Cost of Hydrogen,* €/kgH_2) értékeléséről, figyelembe véve az olyan kulcsfontosságú paramétereket, mint a fúrás tervezése, az üzemeltetési költségek, a gáztisztítási követelmények, a várható mennyiség és a kút felhagyásának költségei.

Időközben kiderült, hogy a fenti hivatkozott HORIZON-JU-CLEANH2-2025-01-07 pályázati kiírást a „H2-QUEST" nevű projekt nyerte. Ennek konzorciumvezetője az Institutt for Energiteknikk (Norvégia). A projekt 2026-2028 között valósul meg és 2 millió € EU-s támogatást tartalmaz. A projektben tervezett terepi vizsgálatok, esettanulmányok helyszínei: Franciaország, Románia, Olaszország, Spanyolország. Ezeken a helyszíneken geofizikai, geokémiai és szenzoros mérésekkel próbálják azonosítani a potenciális természetes hidrogén-rendszereket. Fontos azzal tisztában lenni, hogy e témakiírás, illetve maga a projekt kifejezetten alacsony TRL-szintű (TRL 2–4) kutatás, tehát inkább alapkutatás és explorációs módszertan fejlesztésére szolgál, azaz még nem konkrét kitermelési projektekre. Ennek köszönhetően a konzorciumban geológiai intézetek és egyetemek dominálnak, nem klasszikus olaj-gáz kitermelő vállalatok.

Köszönetnyilvánítás

A bemutatott áttekintő tanulmány a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által támogatott, PD147116 számú kutatási projekt és a Magyar Tudományos Akadémia által támogatott, FluidsByDepth Lendület projekt (LP2022-2/2022) keretein belül készült el.

Felhasznált irodalom:

[1] Prinzhofer, A., Cissé, C. S. T. & Diallo, A. B. 2018: Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). International Journal of Hydrogen Energy 43/42, 19315-19326. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193

[2] Osselin, F., Soulaine, C., Fauguerolles, C., Gaucher, E., Scaillet, B. & Pichavant, M. 2022: Orange hydrogen is the new green. Nature Geoscience 15/10, 765-769. doi: https://doi.org/10.1038/s41561-022-01043-9

[3] Tari, G. C. 2025: Natural hydrogen exploration: some similarities and differences with oil and gas exploration. In: R. Rezaee & E. B. (szerk.): Natural Hydrogen Systems: Properties, Occurrences, Generation Mechanisms, Exploration, Storage, and Transportation De Gruyter Academic Publishing, Berlin. doi: https://doi.org/10.1515/9783111437040-003

[4] Ellis, G. S. & Gelman, S. E. 2024: Model predictions of global geologic hydrogen resources. Science Advances 10/50, eado0955. doi: https://doi.org/10.1126/sciadv.ado0955

[5] Gelman, S. E., Hearon, J. S. & Ellis, G. S. 2025: Prospectivity mapping for geologic hydrogen. 2330-7102, US Geological Survey. doi: https://doi.org/10.3133/pp1900

[6] RystadEnergy: The white gold rush and the pursuit of natural hydrogen. (2024.03.13.) https://www.rystadenergy.com/news/white-gold-rush-pursuit-natural-hydrogen

[7] US Geological Survey: The Potential for Geologic Hydrogen for NEXT-Generation Energy. (2023.04.13.) https://www.usgs.gov/news/featured-story/potential-geologic-hydrogen-next-generation-energy

[8] Greenhouse gas intensity of natural hydrogen produced from subsurface geologic accumulations 2023.08.16.) https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S254243512300274X

[9] H2-view: Fortescue acquires 40% stake in natural hydrogen exploration company HyTerra https://www.h2-view.com/story/fortescue-acquires-40-stake-in-natural-hydrogen-exploration-company-hyterra/2114177.article/

[10] Olivier Lhote (Natural Hydrogen Projects Director, Storengy): Natural hydrogen - Exploring the opportunity (Előadás: 2024.02.22.)

[11] HORIZON-JU-CLEANH2-2025-01-07: Towards exploration and evaluation of European natural hydrogen potential. Clean Hydrogen Partnership JU, Call for Proposals, 15.01.2025.

[12] Peking University Energy Research Institute: China's natural hydrogen exploration to achieve a historic leap - the country's first natural hydrogen science exploration well in Inner Mongolia Xilinhot drilled. https://energy.pku.edu.cn/tzgg/yjyxw/c75a6553941644e4a81663c49dfc6db9.htm Hozzáférés: 2026.01.15.

[13] H2-View Magazine: Start-up begins subsurface hydrogen field trials. Issue#73; p. 18. March, 2026.

[14] Vema Hydrogen honlapja. https://www.vema.earth/ Hozzáférés: 2026.03.30.