

A FELSZÍN ALATTI HIDROGÉNTÁROLÁS KIHÍVÁSAI AZ IDŐSZAKOS MEGÚJULÓ VILLAMOSENERGIA TERMELÉS EGYENSÚLYOZÁSÁBAN

Vadászi Marianna – Tomkóné Nyiri Katalin

Absztrakt: A legújabb tudományos kutatások a szén-dioxid-mentes gazdaság előmozdítására irányulnak a megújuló energiaforrásokból származó villamos energia használata mellett. Bár a megújuló energiaforrások megoldást jelenthetnek a fosszilis tüzelőanyagokból származó antropogén üvegházhatású gázok kibocsátására, mégis szezonfüggőek, ezáltal az évente változó, de állandó energiakereslettel kombinálva a megújuló energia többletét vagy hiányát eredményezik. Ezért alapvető fontosságú egy hosszú távú tárolórendszer kidolgozása, amely egyensúlyba hozza időszakos keresletüket és kínálatukat. Cikkünkben bemutatjuk a hidrogén tárolóterre kifejtett hatásait, ismertetjük a földalatti tárolás formáit, amit a termeléshez kezdetben felhasznált energia, a végső elfogyasztott energia formája, az energiaátalakítási módszerek és ezen elemek kombinációi határoznak meg.

Abstract: The latest scientific research is aimed at promoting a carbon-free economy in addition to the use of electricity from renewable energy sources. Although renewable energy sources can provide a solution to anthropogenic greenhouse gas emissions from fossil fuels, they are seasonal, thereby resulting in a renewable energy surplus or deficit when combined with the annually changing but constant energy demand. Therefore, it is essential to develop a long-term storage system that balances their periodic demand and supply. In our article, we present the effects of hydrogen on the storage reservoir, we describe the types of underground storage, which are determined by the energy initially used for production, the form of the final energy consumed, energy conversion methods and combinations of these elements.

Kulcsszavak: felszín alatti hidrogén tárolás, integrált energiarendszer, hidrogéngazdaság, hidrogén értéklánc

Keywords: underground hydrogen storage, integrated energy system, hydrogen economy, hydrogen value chain

1. Bevezetés

A legfrissebb tudományos kutatások előterében a szén-dioxid-mentes gazdaság előmozdítására irányuló lehetőségek és módszerek helyezkednek el. A megújuló energia felhasználásával előállított zöld hidrogén éppen ezért vált az integrált energiarendszer és a hidrogéngazdaság alapvető elemévé, hiszen a víz elektrolizálása során nyert hidrogén előállítása szinte emissziómentes, ezáltal csökkenti az üvegházhatást okozó gázok kibocsátását. A zöld hidrogén tehát valóban előre mutat egy szén-dioxid-mentes gazdaság irányába, a szürke és kék hidrogénnel ellentétben. Ezen típusok előállítása metánon alapul és rendkívül karbonintenzív. Míg az előbbi esetben a keletkező CO₂ teljes mértékben az atmoszférába kerül, addig az utóbbi típusnál CCS (Carbon Capture Storage) technológiával a keletkező CO₂ -t leválasztják, tárolják és optimális esetben hasznosítják is. A probléma azonban adott a szürke és a kék hidrogén esetében, hiszen előállításuk során mindenképpen keletkezik CO₂. A szén-dioxid-mentes gazdaság előremozdításában tehát megkérdőjelezhetetlen jelentősége és szerepe van a zöld hidrogénnek.

Az Európai Bizottság hidrogénstratégiájában elismerte, hogy a föld alatti hidrogéntárolásra szükség van a megújuló energiaforrásokra nagymértékben támaszkodó jövőbeli energiarendszerek egyensúlyának megteremtéséhez az ellátásbiztonság érdekében. A kínálati oldalon a nagyléptékű tárolás iránti igény a hidrogénellátás időszakosan történő villamosenergia-termelése által előidézett nagyobb változékonyságával magyarázható. A keresleti oldalon meg kell felelni a maradék terhelés által létrehozott magasabb villamosenergia-keresleti csúcsoknak. Ahhoz, hogy eszközeinket a megoldás részeként mutassuk be, és előkészítsük a terepet a beruházásokhoz és a politikai döntésekhez, kiemelten fontos egy olyan áttekintés, amely bemutatja a föld alatti gáztárolásban rejlő lehetőségeket e tekintetben. A hidrogéntárolás követelményeit a hidrogén iránti kereslet és -kínálat alakulása, valamint más ágazatokkal (energia, közlekedés, fűtés, hűtés) való kölcsönhatások és az ágazatok egyéb rugalmassági eszközei (akkumulátorok, hő- és hűtőtárolás, szivattyús vízenergia stb.) határozzák meg. Az elektromos és gázrendszerek esetében a rendszer megfelelőségének teljes vizsgálatát el kell végezni az energiahálózatok hatékony használatának lehetővé tétele érdekében, beleértve a tárolást is. Mind a tárolási kapacitásokat, mind a működési profilokat elemezni kell.

A hidrogén vonzó energiatárolási lehetőség magas, 120 MJ/kg fajlagos energiakapacitással és tiszta égéstermékkel (Energy.Gov, 2021). Jelenleg többnyire fosszilis tüzelőanyagból (kék és sötét hidrogén), többek között földgázból (metán gőzreformálása – SMR) állítják elő 65–85%-os energiahatékonysággal (Amid et al., 2016), vagy megújuló energia felhasználásával a víz elektrolízisével, 55–75%-os energiahatékonyságú energiaforrás esetén az elektrolizáló kapacitás alapján (Gahleitner, 2013). Míg a kék hidrogén előállítására szolgáló SMR módszer tisztának tekinthető, mivel a keletkezett CO₂ megköthető, addig a sötét H₂ előállítása során használt egyéb SMR eljárások gyakran tartalmaznak olyan szennyeződések, mint a CH₄, Ar, CO, CO₂ és N₂ (Laban, 2020). A H₂, mint energiahordozó, alacsony sűrűségű, normál körülmények között 0,089 kg/m³, ezért nagy mennyiségű H₂ tárolására van szükség. A csúcsideszakban felmerülő fogyasztói kereslet és kínálat egyensúlyba hozásához GWh-TWh léptékű energiatárolást kell megvalósítani (Hashemi et al., 2021). A geológiai képződmények, pl. sókavernák, víztartó rétegek, kimerült olaj- és gáztelepek (Zivar et al., 2021; Tarkowski, 2019), szilárd köztettben mélyített tárolók (Lord et al., 2014) és széntelepek felhasználásával (Keshavarz et al., 2021) ilyen nagy léptékű energia H₂ formájában tárolható a föld alatt. Ezt a nagymértékű tárolást gázimmobilizációs mechanizmusokkal, például szerkezeti/rétegtani, maradék/kapillaris, ásványi és oldódási csapdázódással (Kumar et al., 2021) vagy adszorpcióval hajtják végre.

Az irodalomban számos áttekintés létezik a H₂ tárolására vonatkozóan, amelyek többsége vagy a fizikai (komprimált, folyékony vagy kriogén tartályok), vagy a kémiai (szorbensek, fém- vagy kémiai hidridek) tárolás megoldásaival vagy a tárolás hatékonyságának különböző aspektusaival foglalkozik. A közelmúltban azonban kevés áttekintés született a földalatti hidrogéntárolás (Underground Hydrogen

Storage - UHS) koncepciójáról. Így ebben az összefoglalóban az UHS-re vonatkozó meglévő adatok alapján átfogó áttekintést adunk. A következő, 2. számú fejezet háttérinformációkat nyújt a H₂ tulajdonságairól a felszín alatti tárolásra vonatkozóan, az azt követő szakasz pedig a H₂ föld alatti tárolásának formáira összpontosít. A vizsgált rendszert befolyásoló hidrodinamikai tényezőket a 4. fejezet tárgyalja. Az irodalmi feldolgozás célja, hogy az olvasó számára szükséges, de tömör információt nyújtson a H₂ felszín alatti viselkedésének mechanizmusáról.

2. A hidrogén jellemzői

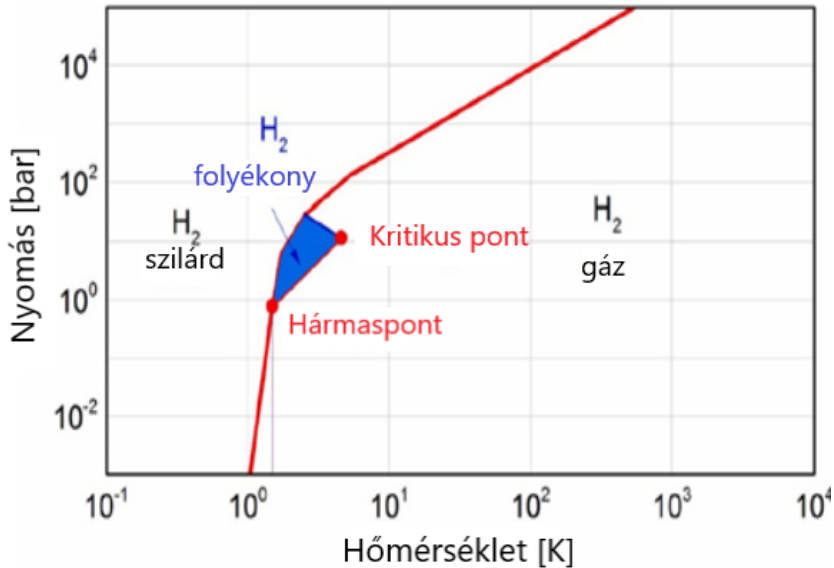
A H₂ az energiaellátási lánc létfontosságú eleme, amely gyakorlatilag minden szektorban hozzájárul az energiahálózatok stabilitásához, a megújuló energiák részarányához, a fosszilis tüzelőanyagok megőrzéséhez és az energiatermelés által okozott környezeti hatások csökkentéséhez (Zhang et al., 2016). 1 m³ hidrogént elégetése során körülbelül 120 MJ/kg energiát nyerünk. Ennek a folyamatnak azonban lényegesen kisebb az energiapotenciálja, mint a metán égetésének, amelynek 50 MJ/kg (Energy.Gov, 2021). Mivel egy egységnyi H₂ előállítása során felszabaduló energia kisebb, mint a felhasznált, a H₂-t nem energiaforrásnak tekintik, hanem energiahordozónak. Könnyűsége és elektromos árammá vagy hővé alakíthatósága is alátámasztja hatékonyságát, mint energiahordozó, a szállítási és energiátárolási képességei miatt (Zivar et al., 2021). Konvertálhatósága mellett jelentős energiapotenciáljának köszönhetően a nem ipari tevékenységekhez felhasznált földgáz közel 60%-ának pótlására képes (Davison et al., 2010). A gáz formájában történő energiaszállításból származó veszteségek 0,1%, az elektromos hálózat vesztesége 8% (Zivar et al., 2021). A power to gas technológia (a „felesleges” áram hidrogénné alakítása elektrolízis segítségével, majd szükség esetén annak visszaalakítása üzemanyag cella alkalmazásával vagy égetéssel (Gahleitner, 2013)) esetében ügyelni kell arra, hogy az ilyen veszteségeket minimálisra csökkentjük a szállítás során a gazdaságos működés érdekében.

A hidrogén fizikai-kémiai tulajdonságainak ismerete segíti a sikeres tárolási műveletet. A hidrogén kétatomos gázként (H₂) fordul elő, sűrűsége 0,089 kg/m³ normál hőmérsékleten (25 °C) és nyomáson (1 bar). Alacsony hőmérsékleten (– 262 °C) 70,6 kg/m³ sűrűségű folyékony anyagnak tekintjük, amint azt az *1. ábra* mutatja.

–253 °C hőmérsékleten folyékony halmazállapotú, sűrűsége 70,8 kg/m³, a kiterjedése a hármaspont és a kritikus pont közötti szűk zónába esik. A H₂ nagy diffundáló képességgel rendelkezik, mert mint a létező legkisebb kémiai részecske, gyorsabban diffundál szilárd anyagokban, mint más gázok, például a metán (Züttel, 2004). A H₂ körülbelül 8-szor kisebb sűrűségű, mint a CH₄, és 22-szer kisebb, mint a CO₂, ami azt jelenti, hogy nagyobb térfogatra és magasabb nyomásra van szükség azonos tömegű hidrogén tárolásához. A H₂ alacsonyabb viszkozitása és molekulatömege annak szivárgását eredményezheti, mivel a metánhoz viszonyítva erősen diffúzív marad, ha nagy nyomásnak van kitéve. Azonban nagyobb mobilitása (az alacsony viszkozitás és sűrűség miatt) azt jelzi, hogy kisebb mennyiségű H₂ megtalálható a tárolási ciklus után. Ez kihívást jelent a tárolt gáz visszatartásában.

Ez azt mutatja, hogy a H_2 tárolása a nagy hatékonyság érdekében biztonságosabb záróréteget igényel, mint a CH_4 és a CO_2 .

1. ábra: **Hidrogén fázisdiagramja**



Forrás: Tarkowski (2019)

A H_2 nagy áthatolhatósága a földalatti környezetben különös nehézséget jelent sós kavernás tárolás esetén, mivel ezek kevésbé tömítenek, mint a víztartó rétegek és a kimerült szénhidrogén-tárolók. A víz jelenléte a pórusterben a H_2 vízben való csekély oldhatósága mellett (0,00079 mol/mol 25 °C-on) javítja a víztartó rétegek és a kimerült olaj- és gázlelőhelyek zárását. (Tarkowski, 2019)

3. A föld alatti hidrogéntárolás fő típusai

Az UHS egyértelműen a teljes energiacyklus (kezdeti energia – H_2 előállítás – H_2 tárolás – H_2 konverziója más energiátípusba – végső energiafelhasználás) egységét jelenti. Az UHS céljai és módszerei erősen függenek mindezen lépések közötti kölcsönhatástól. Ha a cél a tiszta H_2 tárolása és későbbi felhasználása, például üzemanyagcellákban, akkor kerülni kell a H_2 kémiai módosítását a tárolás során. Abban az esetben, ha H_2 -t gáztüzelésű turbinákban használják fel, vagy földgázvezetékhez táplálják, a metán vagy más energiahordozó hozzáadása a tárolt gázhoz kivitelezhető. Ezen a ponton a földalatti tárolás négy formáját különböztethetjük meg, attól függően, hogy az előállításához felhasznált energiát, a végső felhasználás formáját, az átalakítás módszereit ez ezen elemek kombinációit milyen módszerekkel hajtják végre.

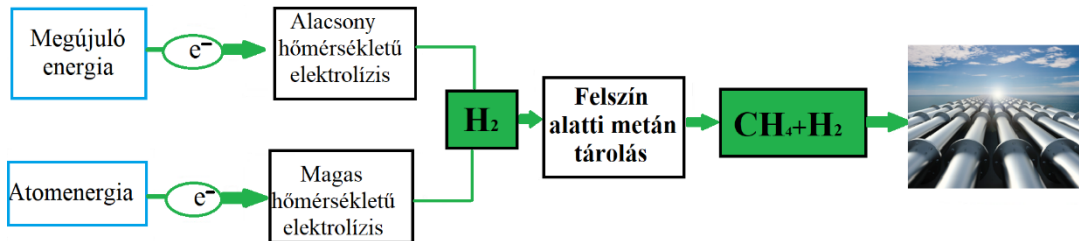
3.1. A tiszta hidrogén föld alatti tárolása

Ennél a módszernél tiszta hidrogént tárolnak a föld alatt, kitermelés után üzemanyagcellában történik a hidrogén elégetése. Az ultratiszta H_2 legmegfelelőbb tárolóhelyei a nagy tisztaságú só kavernák, jellemzőjük az alacsony kockázatu gázszennyeződés. Az egyenlőtlenségek egyensúlyozását a hidrogén végzi, a megújuló energiával előállított többlet villamos energiát hidrogén előállítására használják, melyet a megnövekedett energia igények kielégítésére alkalmaznak.

3.2. Hidrogén földgázelegy föld alatti tárolása

Ebben az esetben a tiszta H_2 előállítása szintén vízbontással történik, ezt követően sajtolják a földgázt is tartalmazó felszín alatti tárolóterbe. Megnövekedett igény estén kitermelés után keverik a földgázszállító rendszerbe. A gáziparban jelenleg kis mennyiségű hidrogén bekeverés (6-15%) engedélyezett, ami a tárolt gáz energiapotenciálját érdemben nem csökkenti és a hidrogén által okozott ridegedés sem okoz károsodást a csővezetékben (Panfilov, 2016). Ez a vezetékben történő hidrogén tárolási mód akkor megfelelő alkalmazás, ha a gáztermelés és felhasználás közötti távolság kevesebb mint 2000 km (He et al., 2019). Nyomásingadozásos adszorpciót (<20% H_2 -koncentráció), membránleválasztást (viszonylag magasabb H_2 -koncentráció) és elektrokémiai H_2 elválasztási technológiákat alkalmaznak, a hidrogén metán elegy igény szerinti szétválasztására. Ennek a folyamatnak az energiacyklusát a 2. ábra mutatja.

2. ábra: Megújuló villamos energiából vagy atomerőművi forrásból, elektrolízatorból és föld alatti földgáztárolóból álló energiacyklus, amelyből az előállított elegyet gázvezetékbe táplálják.



Forrás: Panfilov (2016) kutatásai alapján a szerző szerkesztése.

3.3. Szintézisgáz és hidrogén gazdag elegy felszín alatti tárolása

A szintézisgázt H_2 (20–40%) és CO elegyből állítják elő, míg a városi gáz a H_2 (50–60%) CO és CH_4 elegye. A CO mindkét esetben energiahordozónak tekinthető, de kisebb potenciállal, mint a H_2 . A CO_2 jelenléte nagymértékben függ a gyártási technológiától; így a CO_2 a szintézisgázban és a városi gázban is jelen lehet (Panfilov et al., 2006; Panfilov, 2010). Ez az elegy felszíni vagy földalatti szénelgázosítással (Underground Coal Gasification - UCG) jön létre, amelynek során 800 °C-on a gőzt oxigén jelenlétében vezetik be.

A földalatti szénelgázosítás technológiája a hagyományos bányászati és erőművi elégetésen alapuló energiatermeléstől sokkal gazdaságosabb és kevésbé

környezetszennyező (Tomba, 2011). A CO₂ tárolásával és hasznosításával összekapcsolva a technológiát, a hatékonyságot még tovább lehet fokozni. A rendszer kialakításának legfontosabb lépése a betápláló kút létesítése, mégpedig olyan anyagok felhasználásával, melyek a rendkívüli hőhatásnak, mechanikai felszűrésnek, nagy nyomásnak, hőmérsékletnek, szulfidációs és oxidációs reakcióknak ellenállnak. Ezért elengedhetetlen feltétele a rendszer üzemeltetésének a kút integritása, vagyis annak biztosítása, hogy ne történjenek a cementpaláston keresztül ellenőrizetlen gázáramlások, a felszínre vagy a fedőrétegekbe. A betápláló és termelő kutak közötti kapcsolatot a nagy permeabilitású rétegek biztosítják.

Az előállított szintézisgáz kb. 70% hidrogént tartalmaz, kétféleképpen használható fel:

- gázturbinában történő elégetéssel villamosenergia előállítására
- tüzelőanyagként világításhoz és fűtéshez

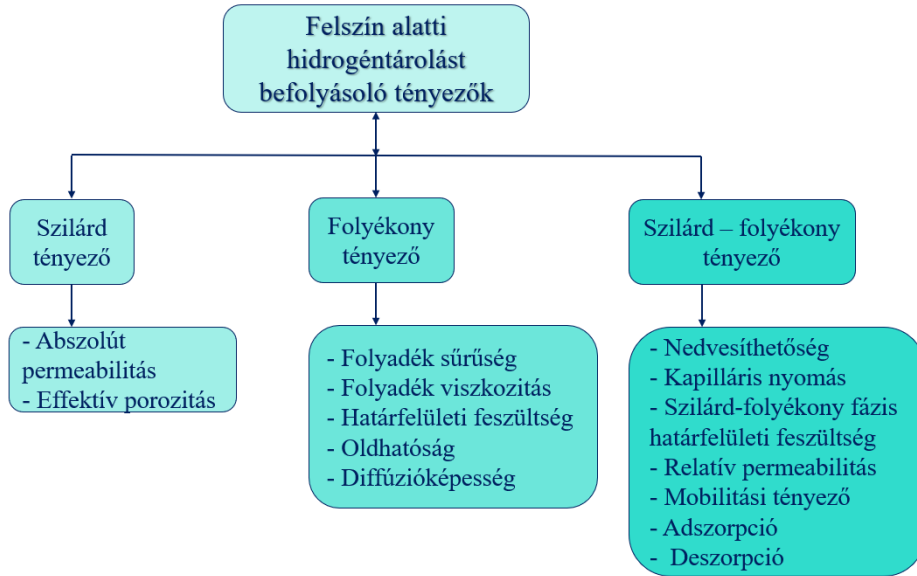
3.4. Felszín alatti metanálás (Underground Methanation Reactor - UMR)

A hidrogén tárolásának ezt a formáját először Panfilov javasolta (Panfilov, 2010). A szintézisgázhoz vagy a városi gázhoz képest a gázelegyet H₂ és a CO₂ keveréke alkotja metanogén baktériumok jelenlétében. A fő különbség a két forma között az, hogy az utóbbi esetben a H₂ és CO₂ CH₄-é alakul, ezáltal nő a felszín alatti gáz energiatartalma. A jelenség felszín alatti kimerült porózus gázrezervoárban nagy gyakorisággal előfordul. A baktériumok a föld alatti térben alacsonyabb hőmérsékleten működnek, ami költséghatékonyabb, mint a felszíni jelenleg alkalmazott magas hőmérsékletű katalizátoros vízbontás. (Panfilov et al., 2016). Továbbá a teljes besajtolt CO₂ mennyisége teljesen átalakul CH₄-vé. Így az UMR-ből származó gázt betáplálva a földgázhálózatba a rendszer szerves részeként tudják felhasználni, míg a szintgáz vagy a városi gáz különböző összetevőinek aránya nincs szabályozva, az előállított gázt villamos energia termelésére használják.

4. A felszín alatti hidrogéntárolást befolyásoló paraméterek hidrodinamikája

A megvalósítható és biztonságos rezervoár megfelelő kiválasztása döntően a H₂ felszín alatti transzport folyamatainak ismeretétől függ. Az áttekintés ezen része részletesen tárgyalja a H₂ porózus közegben való áramlásának háttérében meghúzódó folyamatokat, tekintettel a közet, folyadék és ezek kombinációjának rendszerére. A porózus közegben a szilárd, folyékony és szilárd-folyékony tulajdonságok határozzák meg a H₂ tárolási potenciáljának szimulációját, fejlesztését és előrejelzését, valamint az áramlási képet. A szakirodalmi felmérés szerint a jelenlegi kutatások eredményei azt mutatják, hogy az UHS áramlási dinamikájának tanulmányozásához szükséges adatok elérhetősége még gyerekcipőben jár. A kevés rendelkezésre álló és aktuális ismeretanyagot mutatjuk be az UHS további megfontolására. A 3. ábrán látható tényezőket használjuk az UHS szilárd, folyadék és szilárd-folyadék mechanikájának magyarázatára. A következő alfejezetekben az egyes tényezőkhöz 2-2 befolyásoló paramétert részletezünk.

3. ábra: A felszín alatti hidrogéntárolás befolyásoló tényezői



Forrás: saját szerkesztés.

4.1. Szilárd paraméterek

A permeabilitás (k) annak mértéke, hogy a porózus közeg milyen mértékben engedi át a folyadékot, míg az abszolút permeabilitás (k_a) egyetlen folyadéknak a tárolókőzeten keresztül történő áramlásának a mértéke. Ez egy közettulajdonság (azaz a folyadék és a szilárd-folyadék kölcsönhatások nem befolyásolják), amely független a folyadék típusától (gáz, víz, olaj), feltéve, hogy a folyadék a pórusrét 100%-át elfoglalja. Ez a pórusméret függvénye 100%-os pórustérelítettség mellett. A UHS műveletekben a H_2 besajtolás és kitárolás ciklusok szerint követi egymás. A k_a értéke a besajtolás időtartama alatt növekszik, a kitermelési időszakban csökken. Homokkő és mészkő esetén a k_a értéke nagyobb, mint az agyagpala esetén, ami arra utal, hogy porózus és repedezett rezervoárakba történő besajtolás energiahatékonyság szempontjából kedvezőbb (Pan et al., 2021).

Az abszolút permeabilitás kvantitatívna és nem kvalitatívna tekinthető, mivel például a csúszási hatások is befolyásolhatják a H_2 mozgását. A hidrogén a legkönnyebb gáz, nagy diffúzióképessége eltérő pórusméretek esetén is kiemelkedő, ezért ennek a hatásnak a számszerűsítése elengedhetetlen a különböző közettípusok esetén.

A porozitás (ϕ) a kőzet hézagainak százalékos arányát jelenti. Az abszolút porozitás (ϕ_{abs}) a teljes pórustérfogat és az egész térfogat arányára vonatkozik, míg az effektív porozitás ($\phi_{effektív}$) az összekapcsolt pórustérfogat és a teljes térfogat aránya. Mivel a $\phi_{effektív}$ nagyobb a hagyományos tározókban (homokkő és mészkő), mint nem hagyományos rezervoárban (szén és agyagpala), a tárolókapacitás jelentősen megnő. Nem hagyományos tárolótér esetén a felszín alatti hidrogéntárolás rendkívül kiszámíthatatlan. A k_a -val összehasonlítva hasonló viselkedés figyelhető meg, a $\phi_{effektív}$ csökken a besajtolás során.

4.2. Fluidum paraméterek

A geotermikus és hidrosztatikus gradienseknek köszönhetően (Iglauer, 2016) a fluidum sűrűsége jelentősen befolyásolja a nyomás és a hőmérséklet hatását (Pan et al., 2019) a tárolótérben. A H_2 sűrűsége (ρ_{H_2}) jelentősen nő a nyomással és kis mértékben a hőmérséklettel. Például, amikor a nyomás 5 barról 160 barra emelkedett, 25 °C hőmérsékleten a ρ_{H_2} 0,4 kg/m³-ről 12 kg/m³-re nőtt, 200 baron viszont, amikor a hőmérséklet 40 °C -ról 100 °C-ra emelkedett, a ρ_{H_2} 14 kg/m³-ről 11 kg/m³-re csökkent. 300, 400 és 500 baron hasonló folyamat játszódott le, mutatva, hogy a hidrogén sűrűsége ritkán emelkedik a hőmérséklettel.

Hasonló megfigyelést tapasztaltak Heinemann és társai (2021) metán és széndioxid sűrűségének összehasonlításakor. A ρ_{CH_4} 0,6 kg/m³-ről 136 kg/m³-re nőtt 50 °C-on, 2 barról 200 barra történő nyomásnövelés esetén. A ρ_{CO_2} 1,5 kg/m³-ről 784 kg/m³-re nőtt ugyanezen a nyomásváltozáson. A ρ_{CH_4} -vel és ρ_{CO_2} -vel ellentétben a ρ_{H_2} gyakran viszonylag alacsony magas nyomásértékeken, és kevésbé reagál a nyomás- és hőmérsékleti hatásokra. Továbbá kimutatható, hogy a hidrogén sűrűsége sokkal kisebb, mint a víz sűrűsége azonos termofizikai feltételek mellett. Ez a jelentős hidrogén rétegvíz sűrűségkülönbség erős gravitációs szegregációs hatást eredményez, így a hidrogén nagyobb, a fedőközet felé irányuló mozgása alakul ki, mint metán és szén-dioxid gázok esetén (Rossen et al., 2010).

A hidrogén kis sűrűsége (0,089 kg/m³) jelentős hidrogénvesztést eredményez standard körülmények között a felszín alatti tárolás során. Alvarez és társai (1988) kísérletei azt mutatják, hogy a hidrogén oldhatósága a nyomástól, a hőmérséklettől és a sótartalomtól függően változik. Azonban a hidrogén eltérően viselkedik vizes és olajos környezetben. A kutatások alapján kijelenthetjük, hogy a környezeti körülmények között rögzített H_2 oldhatósági értékek más folyadékok jelenléte miatt nem igazán reprezentálják a rezervoárt. Az oldhatóság miatt fokozott figyelmet kell fordítani a hidrogénvesztés vizsgálatára kimerült olajtelepben létesített hidrogéntárolás esetén.

4.3. Szilárd – folyékony paraméterek

Paterson kísérleteket végzett a hidrogén okozta ujjasodás mechanizmusának megismerésére. Az eredményei azt mutatták, hogy ez a folyamat jelentős mennyiségű hidrogén veszteséghez vezet. A legfontosabb meghatározó tényező a gáz besajtolásának sebessége, az idő előtt bekövetkező áttörés és a hidrogén nagy mobilitása miatt (Paterson, 1983). A nem megfelelő sebesség számottevő veszteséget okozhat, mivel befolyásolja a fluidum stabilitását, ami hatással van a folyadék és a H_2 közötti határon kialakuló reakciókra. Az injektálási sebesség jellemzésére létrehozták a kapilláriszám egyenletet. Ez egy dimenzió nélküli eredmény, amelyet a viszkózus és kapilláris erők arányaként határoznak meg és széles körben használnak a porózus közegben történő folyadékkiszorítás hatékonyságának értékelésére. A besajtolás sebességén túl az ujjasodás kialakulását, a viszkozitás, a sűrűség és a felületi feszültség különbségei indukálják.

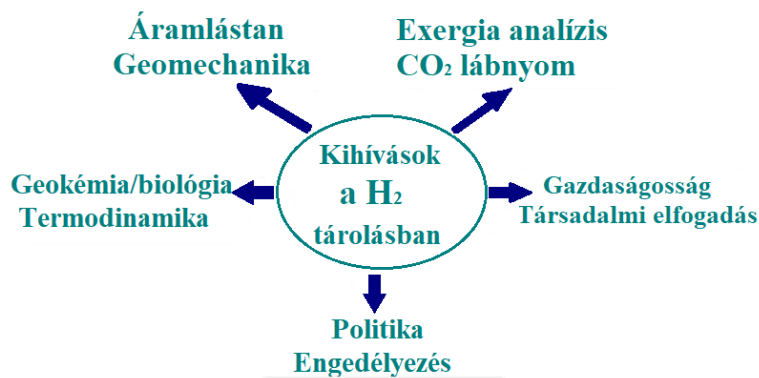
Két nem elegyedő folyadék közötti nyomás egy vékony csőben, amely a folyadékok és a cső szilárd falai közötti erők kölcsönhatásából adódik, kapilláris

nyomásként (Pc) ismert. Ez kulcsfontosságú tényező a porózus közegben történő többfázisú folyadékáramlás vizsgálatában, és gyakran a kapillaris erők igenis meghatározóak (Iglauer, 2017). A kapillaris nyomást általában relatív permeabilitási görbékkel kombinálják (mindkettőt a víztelítettség függvényében), hogy értékeljék a folyadék mozgását és az általános áramlási geometriát (Tarkowski, 2019).

5. Összegzés

A környezet és a társadalom jövője szempontjából a legérdekesebb kihívásnak a tiszta tüzelőanyagok és energiaforrások kiválasztása és felhasználása bizonyul. A felszín alatti hidrogéntároláshoz kapcsolódó kihívásokat a 4. ábra tartalmazza.

4. ábra: A felszín alatti hidrogéntárolás kihívásai



Forrás: Hajibeygi (2021) kutatásai alapján a szerző szerkesztése.

A különféle alapanyagokból előállított hidrogén, például a fosszilis tüzelőanyagoktól a megújuló energiaforrásokig terjedő előállítási módok rugalmassága miatt, alkalmas az energiarendszerekben mind üzemanyagként, mind energiahordozóként való alkalmazásra. A hidrogéntárolás lehetőségeit vizsgálva, ahogy azt a publikációk száma is mutatja, egyre nagyobb figyelmet kap. A karbonsemleges ökoszisztéma elérését célzó üvegházhatást csökkentő új technológiák, ezáltal a UHS rendszere sem mentes a kihívásoktól, még kevés tapasztalat áll rendelkezésre ezen a szakterületen. Ezen túlmenően, a lehetséges helyszínekkel kapcsolatos nehézségek mellett (beleértve a geológiai, mérnöki és gazdasági) egyéb tényezők, mint például a jogi és társadalmi kölcsönhatások, együttesen járulnak hozzá a sikeres megvalósításhoz. Bár ezen tényezők egy része (pénzügyi, kormányzati politikák, mérnöki, jogi és szociális) szabályozható, több eleme, például a geológiai alkalmazhatóság kötött. Ezért elengedhetetlen annak biztosítása, hogy az említett kritériumok mindegyike megfelelő legyen a hatékony UHS működéshez.

Záró megjegyzésként fontos leszögezni, hogy a különböző szakértők egyetértenek azzal az elképzeléssel, hogy a jövő energiagazdasága a villamosenergiával kombinált hidrogénre épül. A jelenlegi energiarendszerről a hidrogéngazdaságra való átállás számos tudományos, technológiai és gazdasági

kihívással néz szembe, melyek jövőbeli megvalósításhoz fokozatos átmenetre van szükség. Ezt a folyamatot leginkább kutatási és fejlesztési projektek segítségével lehet támogatni, melyek a hidrogéngazdaságra való átállás legjelentősebb mérföldköveit is megmutatják, további, eddig még nem ismert lehetőségekkel és kihívásokkal egyetemben.

Köszönetnyilvánítás

A publikáció a „RRF-2.3.1-21-2022-00009, azonosítószámú, Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium megnevezésű projekt a Széchenyi Terv Plusz program keretében, az Európai Unió Helyreállítási és Ellenállóképességi Eszközének támogatásával valósul meg.”

Irodalomjegyzék

- Alvarez, J., Crovetto, R., Fernandez-Prini, R. (1988): Dissolution of N₂ and of H₂ in water from room temperature to 640 K. *Berichte Der Bunsengesellschaft/Physical Chem Chem Phys*, 92 (8): 935–940. <http://www.doi.org/10.1002/bbpc.198800223>
- Amid, A., Mignard, D., Wilkinson, M. (2016): Seasonal storage of hydrogen in a depleted natural gas reservoir. *Hydrogen Energy*, 41 (12): 5549–5558. <http://www.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.036>
- Davison, J., Arienti, S., Cotone, P., Mancuso, L. (2010): Co-production of hydrogen and electricity with CO₂ capture. *Int. J. Greenh Gas Control*, 4 (2): 125–130. <http://www.doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.10.007>
- Energy. Gov. (2021): Hydrogen storage department of energy 2021. <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>> (2021.11.22.)
- Gahleitner, G. (2013): Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. *Hydrogen Energy*, 38 (5): 2039–2061. <http://www.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.010>
- Hajibeygi, H. (2021): Underground Hydrogen Storage: A multiscale experimental and numerical study. <<https://www.youtube.com/watch?v=2VqAeYU22n0>>
- Hashemi, L., Blunt, M., Hajibeygi, H. (2021): Pore-scale modelling and sensitivity analyses of hydrogen-brine multiphase flow in geological porous media. *Sci. Rep.*, 11: 8348, 1–13. <http://www.doi.org/10.1038/s41598-021-87490-7>
- Heinemann, N., Alcalde, J., Miocic, J. M., Hangx, S. J. T., Kallmeyer, J., Ostertag-Henning, Ch., Hassanpouryouzband, A., Thaysen, E. M., Strobel, G. J., Schmidt-Hattenberger, C., Edlmann, K., Wilkinson, M., Bentham, M., Haszeldine, R. S., Carbonell, R., Rudloff, A. (2021): Enabling large-scale hydrogen storage in porous media—the scientific challenges. *Energy Environ. Sci.*, 14 (2): 853–864. <http://www.doi.org/10.1039/d0ee03536j>
- He, T., Rong, Z., Zheng, J., Ju, Y., Linga, P. (2019): LNG cold energy utilization: Prospects and challenges. *Energy*, 170: 557–568. <http://www.doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.170>
- Iglauer, S., Wüiling, W. (2016): The scaling exponent of residual nonwetting phase cluster size distributions in porous media. *Geophys. Res. Lett.*, 43 (21): 11. 253–11, 260. <http://www.doi.org/10.1002/2016GL071298>
- Keshavarz, A., Abid, H., Ali, M., Iglauer, S. (2021): Hydrogen diffusion in coal: Implications for Hydrogen Geo-Storage. *J. Colloid Interface Sci.*, 608 (2): 1457–1462. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.10.050>
- Kumar, K. Ramesh., Makhmutov, A., Spiers, C. J., Hajibeygi, H. (2021): Geomechanical simulation of energy storage in salt formations. *Sci. Rep.*, 11: 1–24. <http://www.doi.org/10.1038/s41598-021-99161-8>
- Laban, M. P. (2020): Hydrogen storage in salt caverns. Diplomadolgozat. e Delft University of Technology, Delft.

- Lord, A. S., Kobos, P. H., Borns, D. J. (2014): Geologic storage of hydrogen: Scaling up to meet city transportation demands. *Hydrogen Energy*, 39 (28): 15570–15582. <http://www.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.07.121>
- Pan, B., Yin, X., Ju, Y., Iglauer, S. (2021): Underground hydrogen storage : Influencing parameters and future outlook. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 294: 102473. <http://www.doi.org/10.1016/j.cis.2021.102473>
- Panfilov, M., Gravier, G., Fillacier, S. (2006): Underground storage of H₂ and H₂-CO₂-CH₄ mixtures. In: *10th Eur Conf Math Oil Recover.* ECMOR 2006. <http://www.doi.org/10.3997/2214-4609.201402474>
- Panfilov, M. (2010): Underground storage of hydrogen: In situ self-organisation and methane generation. *Transp. Porous Media*, 85: 841–865. <http://www.doi.org/10.1007/s11242-010-9595-7>
- Panfilov, M. (2016): Underground and pipeline hydrogen storage. *Compendium of Hydrogen Energy, Volume 2.* Elsevier. 91–115. <http://www.doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00004-3>
- Paterson, L. (1983): The implications of fingering in underground hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 8 (1): 53–59, [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(83\)90035-6](https://doi.org/10.1016/0360-3199(83)90035-6)
- Rossen, W. R., Duijn, C. J. Van, Nguyen, Q. P., Shen, C., Vikingstad, A. K. (2010): Injection strategies to overcome gravity segregation in simultaneous gas and water injection into homogeneous reservoirs. *SPE Journal*, 15 (1): 76–90. <https://doi.org/10.2118/99794-PA>
- Tarkowski, R., 2019. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 105: 86–94. <http://www.doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.051>
- Tompa R. (2011): A felszín alatti széneldgázosítás (UCG) technológiai folyamatainak áttekintése, Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar Szekciókiadvány, Doktoranduszok Fóruma, Miskolc, 2011. november 8.
- Zhang, F., Zhao, P., Niu, M., Maddy, J. (2016): The survey of key technologies in hydrogen energy storage. *Int. J. Hydrogen Energy*, 41 (33): 14535–14552. <http://www.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.293>
- Zivar, D., Kumar, S., Foroozesh, J. (2021): Underground hydrogen storage: A comprehensive review. *Int. J. Hydrogen Energy*, 46 (45): 23436–23462. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.138>
- Züttel, A. (2004): Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften*, 91: 157–172. <http://www.doi.org/10.1007/s00114-004-0516-x>