

# FÖLDRENGÉSEK SZEREPE A CO<sub>2</sub>-GAZDAG FLUIDUMOK SZÁLLÍTÓDÁSÁBAN

Berkesi Márta, Spránitz Tamás, Hencz Mátyás, Békési Eszter, Porkoláb Kristóf  
HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron és MTA FI Lendület FluidsByDepth kutatócsoport

## Bevezető

A Föld külső néhány tíz-néhány száz kilométeres rideg kőzetburkát litoszférának nevezzük. A litoszférát alkotó szilárd kőzeteknek még a mélyebb, tehát nagyobb nyomású (~1–3 GPa) és hőmérsékletű (~900–1100 °C) környezetéről – azaz a mélylitoszféráról – is elmondható, hogy a kőzeteket felépítő ásvány szemcsék határain nincs tökéletes illeszkedés. Ennek szükségszerű következménye, hogy a kőzetekben „üreg” (pórustér) alakul ki különböző mérettartományokban: a nanoléptékű diszkontinuitásoktól a szemcsehatár illeszkedés tökéletlenségéből fakadó térrész-hiányokon át („grain boundary misfit”) akár méteres repedésekig. E pórusteret nem a légüres tér, hanem fluidum tölti ki, szétválaszthatatlan egységet alkotva a kőzettel. A földtudományokban a fluidumok alatt olyan földtani folyamatból eredő entitásokat értünk, amelyek 1) nem szilárd fázisúak (tehát folyadék/gáz/szuperkritikus állapottal jellemezhetők), 2) áramolni képesek, és 3) döntő alkotóelemei a szén, oxigén, hidrogén, nitrogén és kén. Egyszerű, mindannyiunk számára ismert molekulákra kell gondolnunk: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO.

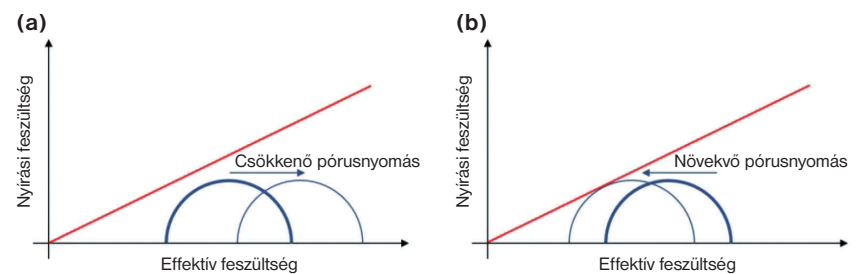
A fluidumok olyan földtani folyamatok kialakulásában és katalizálá-

sában játszanak kulcsszerepet, amelyek kiemelt társadalmi jelentőséggel is bírnak. Fluidumok nélkül nem lennének lemezmozgások, azaz lemeztektonika sem, ami igaz a magmaképződésre és vulkáni tevékenységekre is. Továbbá a litoszféra sekélyebb részein áramló fluidumok számos esetben szállítanak és később kristályosítanak civilizációnk fenntartásához szükséges kritikus elemeket, ásványi anyagokat.

A fentiekhez képest kevésbé széleskörűen vizsgált, fluidum által befolyásolt földi folyamatok lehetnek bizonyos földrengésesemények is. Ennek oka abban keresendő, hogy a fluidumok a kőzetek pórusterében való jelenlétükkel nyomást fejtenek ki a kőzetvázra. A pórustérben a litoszféra mélyebb zónáiból származó, felfelé irányuló fluidummozgás következté-

ben megnövekedhet a pórusnyomás, ezáltal megváltoztatva a kőzet-fluidum rendszer feszültség-viszonyait. Ennek extrém esete az, amikor a fluidumok által megnövekedett pórusnyomás kielégíti a Coulomb-féle törési feltételt, amely a kőzetek töréséhez, és így, akár földrengések kipattanásához is vezethet. A magyarázat abban keresendő, hogy a fluidumok növekvő nyomása „gyengíti” a kőzeteket (csökkenti az effektív feszültséget), amely a Mohr-Coulomb diagramon a Mohr-körök balra tolódásában és a Coulomb-féle törési egyenes érintésében/metszésében nyilvánul meg (1. ábra). Fontos megjegyezni, hogy a fluidumnyomás csökkenése következtében is kialakulhatnak törések, hiszen a kőzetekben uralkodó feszültségek komponenseire a pórusnyomás megváltozása különböző mértékű hatást gya-

1. ábra. Effektív versus nyírási feszültség diagramok egy tipizált normál vető zónában, amelyek egy fluid kivonási/kitermelési (a), illetve egy fluid injektálási (b) helyzet feszültségállapotát írják le a Mohr körök (kék) és a Coulomb-féle törési egyenessel (piros). Módosított ábra [2] után



Berkesi Márta



Spránitz Tamás



Hencz Mátyás



Békési Eszter



Porkoláb Kristóf

A szerzők az MTA FI Lendület FluidsByDepth kutatócsoport tagjai és a Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet munkatársai, akik geológia-geokémia (Berkesi Márta kutatócsoportvezető és Spránitz Tamás), vulkanológia (Hencz Mátyás), szerkezetföldtan-numerikus modellezés (Porkoláb Kristóf) és geofizika-geotermia (Békési Eszter) szakterületeken dolgoznak. A kutatócsoporton belül a litoszféra-léptékű fluidumáramlás földtani, fizikai és kémiai feltételeit vizsgálják a Balaton-felvidéken.

korolhat, amely akár a Mohr-kör megnövekedését is eredményezheti. A fluidumnyomás-változás következtében kipattanó földrengések szilárd és folyékony nyersanyagok bányászata, ki-termelése (pl. szénhidrogén, geotermikus energia) és tárolása (pl. földgáz, CO<sub>2</sub>), valamint ezekhez kapcsolódó injektálási beavatkozások során is előfordulhatnak (ezt hívjuk indukált szeizmicitásnak). Progresszív kutatómunkák már évtizedekkel ezelőtt rámutattak arra, hogy a fluidumok a törésvonalakon belül is jelentős hatással lehetnek a földrengésekre: az effektív normál feszültség csökkentésével a megnövekedett pórnyomás következtében [1].

## Esettanulmányok

Az Appennini-félsziget és szigetei (Olaszország) intenzív szeizmicitással jellemezhető régió. 1997-ben Észak-Olaszországban (Umbria-Marche) 5,7–6-os magnitúdójú földrengésekkel egyidőben feltehetően a földkéreg mélyebb tározójában elzárt, CO<sub>2</sub>-gazdag szuperkritikus fluidum a rengések által keltett töréses zónák mentén tudott több kilométeren át szállítani, jelezve a fluidumok és a földrengések kölcsönhatásait [3]. Szintén Olaszországban a 2009–2018 közötti közel tíz éves időszak – időbeli nullpontként a tragikusan nagy károkat és emberáldozatokat okozó Aquila-i földrengéssel – a szeizmikus tevékenység folyamatos monitorozásával egyidőben a terület felszín alatti vízhálózatán 26

pontból 10 év alatt 270 egyedi oldott szén és δ<sup>13</sup>C-CO<sub>2</sub> idősoros mérést végeztek [4]. Ez utóbbi izotóp arányérték a CO<sub>2</sub> eredetére ad információt. A nagyszámú adatsoron alapuló eredmények igazolják – különös tekintettel a nagyobb magnitúdójú (M ≥ 5) földrengések esetén –, hogy a mélylitoszféra eredetű CO<sub>2</sub> koncentráció növekedése korrelál a szeizmikus szeizmicitás alakulásával: a mély CO<sub>2</sub> fluxus (jelen tanulmány esetében: oldott szén-dioxid koncentráció-változás a felszín alatti vízmintákban) mértéke annál nagyobb, minél nagyobb erejű földrengés előzte meg. A vízminták oldott CO<sub>2</sub>-koncentrációja olyan mértékben növekedett a nagy magnitúdójú rengések esetén, amely a szezonális változás és a rengésből fakadó, mélylitoszféra CO<sub>2</sub> eredetét nem igénylő paraméterek, azaz porozitás (kőzetszemcsék közötti pórustér mennyisége) és permeabilitás (fluidumvezető-képesség) -változás hatásán felüli mértékűek. A két tanulmány arra enged következtetni, hogy a mély litoszférából sekélyebb zónákba áramló CO<sub>2</sub>-gazdag fluidum tehát potenciálisan földrengés-előidéző ágens lehet.

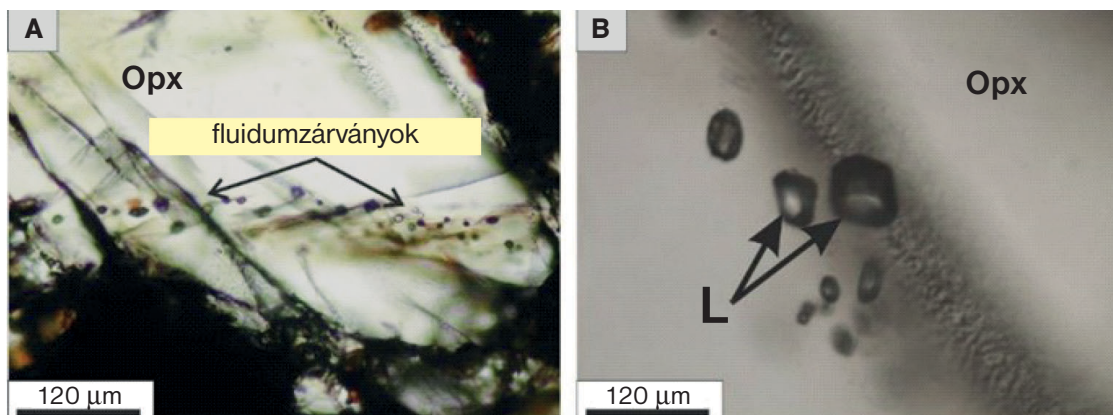
Joggal merül fel a kérdés a fenti tanulmány eredményei alapján, hogy az appennini terület egy általános vagy egyedi, kivételes esetet tár-e fel? Globális megfigyelések ez előbbi sejtetik. Számos más, jelentős magnitúdójú földrengés esetén igazolódott a mély eredetű fluidumok hatása, úgy, mint a 2004-es niigatai (M = 6,8), az északkelet-honshui rengések esetében

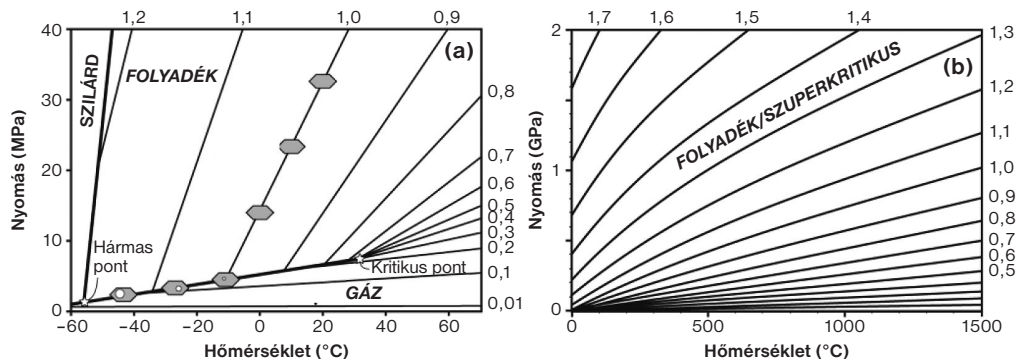
Japánban; továbbá földrengéssorozatnál az Afar-medencében; mindazonáltal mély eredetű fluidum hatásának tekinthető a 2004-es szumátrai földrengés (M = 9,2) utórengéssorozatának jellege is [5 és hivatkozásai]. A köpenyből származó CO<sub>2</sub> játszik szerepet a 2001-es indiai (Bhuj) földrengés (M = 7,9) utórengéssorozatában is [5]. A fenti példák tehát egyértelműsítik, hogy a mélylitoszféra eredetű fluidumáramlások és akkumulációk, valamint a földrengés mechanizmusok egymással potenciálisan összefüggő folyamatok.

## CO<sub>2</sub> a mélylitoszférában

Tanulmányunk megelőző esetei azokra az eseményekre fókuszálnak, amelyek kapcsolatot tártak fel a mélylitoszféra CO<sub>2</sub>-gazdag fluidumok és jelentősebb magnitúdójú földrengésemények között. A δ<sup>13</sup>C-CO<sub>2</sub> és nemesgáz izotópos eredmények mellett azonban a mélylitoszférát felépítő kőzetek ásványainak kristályosodása során (vagy újra-kristályosodásával) csapdázódott fluidumok közvetlen vizsgálatára is van lehetőség a fluidumzárványok tanulmányozása folyamán (2. ábra). A mélylitoszféra kőzeteket döntően olyan láncsilikátok (úgynevezett piroxén-sor ásványai) építik fel, amelyek elasztikus tulajdonságaiknak, keménységüknek, sűrűségüknek és egyéb fizikai jellemzőiknek köszönhetően alkalmasak a csapdázódott fluidumzárványok zárt rendszerű tárolására.

2. ábra. Polarizációs mikroszkópos felvételek mély litoszféra (köpeny)-eredetű kőzetben található fluidumzárványokról, ahol a bezáró ásvány enstatit (Opx - Mg<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>). L - a fluidumzárványt legnagyobb térfogatban kitöltő folyadék-fázis. Módosított ábra [6] után





3. ábra. A CO<sub>2</sub> P (nyomás) - T (hőmérséklet) fázisdiagramja (a) kisebb és (b) nagyobb P-T metszetben. Ez utóbbi a mélylitoszféra P-T állapotokat tükrözi. A hatszögű alakzatok fluidumzárványok sematikus illusztrációi, az adott P-T metszeten mutatott jellegzetes fázisarányokkal. Ahol a zárványban fehér kör is látható, ott folyadék+gáz a fázisarány, a többi esetben a zárványt folyadék tölti ki. A 0,5-től 1,7-ig jelzett görbék azonos sűrűséggel jellemezhetők (g/cm<sup>3</sup>). További részletek a szövegben. Módosított ábra [7] után

Ennek következtében a fluidumzárványok csapdázódásukat követően közel állandó anyagmennyiséggel és térfogattal jellemezhetők. Jelen tanulmányban azért van mindennek jelentősége, mert a mélylitoszféra fluidumok jellemzően 1–2 GPa nyomáson és 850–1100 °C hőmérsékleten csapdázódtak, azonban vizsgálatukra laboratóriumi körülmények között van lehetőség. A fluidumzárványok negatív kristály alakúak, ami a bezáró ásvány és a fluidum közötti felületi feszültség optimum állapotát jelzi, azaz úgynevezett szöveti egyensúlyt mutatnak egymással. Mindezek teszik lehetővé a termodinamikai és fázistológiai megközelítések alkalmazását a zárványokat kitöltő fluidumok fizikai-kémiai tulajdonságainak megismerésére.

A mélylitoszférából származó fluidumzárványok hűtéses-melegítéses kísérletei (mikrotermometria) a fluidum fő kémiai komponense(i)nek megismerését teszik lehetővé a Gibbs-féle fázistörvény alkalmazásával:  $F + SZ = K + 2$ , ahol  $F$  a fázisok számát,  $SZ$  a szabadsági fokok (állapotjelzők) számát,  $K$  a komponensek számát jelenti. A fázistörvény akkor érvényes, ha a rendszer állapotát a nyomás, a hőmérséklet és a koncentrációk határozzák meg és fennáll az egyensúly.

A mélylitoszférában csapdázódott fluidumzárványok -100 °C -ra történő hűtését követő lassú melegítés során a gáz + szilárd → folyadék + szilárd + gáz fázisegyüttes-átalakulást látjuk -56,6 (±0,2) °C-on szinte kivétel nélkül a Föld bármely mélylitoszféra

közetéből. E folyamat a CO<sub>2</sub> P (nyomás) - T (hőmérséklet) fázisdiagramján található nonvariáns pontot (hármaspont, 3. ábra) jelzi, tehát rámutat a fluidum CO<sub>2</sub>-gazdag kemizmusára. További melegítés során a folyadék + gáz kétfázisú univariáns görbe mentén láthatunk fázisváltást, ahol a fluidumzárványok -56,6 °C és 30,9 °C (ez utóbbi a CO<sub>2</sub> kritikus hőmérséklete) között folyadék fázisúak lesznek (homogenizációs hőmérséklet). E hőmérsékletek a CO<sub>2</sub> sűrűségéhez tartozó izochorok és az univariáns görbe metszéspontjait jelzik.

A mélylitoszféra fluidumzárványok a homogenizációs hőmérséklet elérést követő melegítés során folyadék-fázisúak, amely összhangban áll nagy nyomású (mélységű) eredetükkel. E fluidumok csapdázódáskori nyomás és hőmérséklet viszonyát a sűrűségükhez tartozó izochor görbék P-T meredeksége szabja meg (3. ábra), de jellemzően minimum 1 GPa 1000 °C-on.

Összegezve tehát elmondható, hogy a mélylitoszféra fluidumainak természetes reprezentánsai a fluidumzárványokat kitöltő anyag(ok), amelyek egyértelműen rámutatnak arra, hogy a nagy sűrűségű szuperkritikus CO<sub>2</sub>-gazdag folyadékok stabilak a litoszféra alsó szegmensében (40–100 km) akár kontinentális, akár óceáni területről beszélünk. A mélylitoszférát alkotó szilikát és oxid ásványok nem oldják a CO<sub>2</sub>-ot, és számottevő reakció sem várható a fluidum és a közet között, ami a CO<sub>2</sub>-gazdag fluidumok akkumulációjának és áramlásuknak/szállítódásuknak kedvez, elősegítve

ezzel a földrengések kialakulását. Mindezen folyamatok egy-egy pillanatképei annak a litoszféra-, vagy akár még nagyobb léptékű fluidum- (pl. széndioxid) körforgásnak, amely hatással van az emberi életterre is, beleértve a talajt, a földfelszínt és a légkört is.

**Köszönetnyilvánítás:** A szerzők szeretnék megköszönni Kovács István János vendégszerkesztő felkérését a kézirat elkészítésére. A cikk témájához tartozó kutatást az MTA FI Lendület FluidsByDepth kutatási projekt támogatta (LP2022-2/2022).

#### IRODALOM

- Hubbert M.K., Rubey W.W. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. 1. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting. Geological Society of America Bulletin, 70, 1959, 115–166.
- Kim S., Hosseini S.A. Study on the ratio of pore-pressure/stress changes during fluid injection and its implications for CO<sub>2</sub> geologic storage. Journal of Petroleum Science and Engineering, 149, 2017, 138–150.
- Miller S.A., Collettini C., Chiaraluce L., Cocco M., Barchi M., Kaus B.J.P. Aftershocks driven by a high-pressure CO<sub>2</sub> source at depth. Nature, 427, 2004, 724–727.
- Chiodini G., Cardellini C., Di Luccio F., Selva J., Frondini F., Caliro S., Rosiello A., Beddini G., Ventura G. Correlation between tectonic CO<sub>2</sub> Earth degassing and seismicity is revealed by a 10-year record in the Apennines, Italy. Science Advances, 6, 2020, eabc2938.
- Miller S.A. The Role of Fluids in Tectonic and Earthquake Processes. Advances in Geophysics, 54, 2013, 1–46.
- Berkési, M., Guzmics, T., Szabó, Cs., Dubessy, J., Bodnar, R.J., Hidas, K., Ratter, K. The role of CO<sub>2</sub>-rich fluids in trace element transport and metasomatism in the lithospheric mantle beneath the Central Pannonian Basin, Hungary, based on fluid inclusions in mantle xenoliths- Earth and Planetary Science Letters, 331-332, 2012, 8–20.
- Stern S.M., Pitzer K.S. An equation of state for carbon dioxide valid from zero to extreme pressures. Contributions to Mineralogy and Petrology, 117, 1994, 362–374.