

Okozhatnak-e vulkánkitöréseket a földrengések?

^{1,2,3} Németh Károly

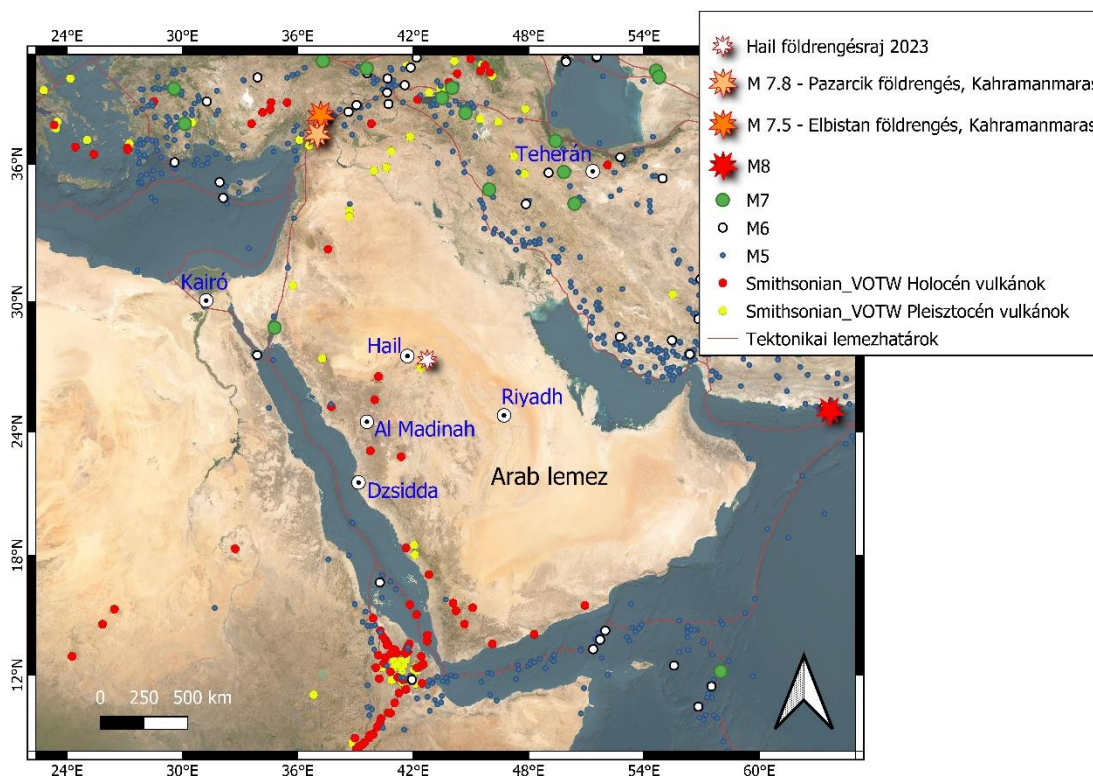
¹ Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Litoszféra Kutatócsoport, 9400 Sopron, Csatkai E. u. 6-8.

² Saudi Geological Survey, National Program of Earthquakes and Volcanoes, Jeddah, Szaúdi Arábia

³ Massey University, Volcanic Risk Solutions, Palmerston North, Új-Zéland

Email: knemeth69@gmail.com, nemeth.k@epss.hu, nemeth.k@sgs.gov.sa, k.nemeth@massey.ac.nz

Mind a közvéleményt, mind a kutatókat régóta foglalkoztató kérdés, hogy lehet e kapcsolat, és ha igen milyen, a földrengések kipattanása és a vulkanizmus között. Ez a kérdés újra felelevenedett a 2023 február 6-án bekövetkezett, több mint 50 ezer áldozatot követelő, 7.8 magnitúdójú kelet-törökországi földrengés után (1. ábra). A kérdés nem ok nélküli, hisz a Kelet-Törökországot átszelő Kelet Anatóliai Törésvonal mentén lemeztektonikai értelemben véve is igen változatos vulkanizmusról tudunk, amely során az elmúlt 1 millió évben több száz vulkánkitörést tartunk számon, több tucat vulkáni központból, amelyek e fontos lemezhatárt kijelölő tektonikai vonaltól 1000 km-es távolságon belül helyezkednek el. A régió geológiai szolgálatai így teljes készütségbe kerültek és minden olyan szeizmikus jelenséget fokozott figyelemmel kísérnek, ahol a legenyhébb gyanú is felmerülhet földrengésekkel kapcsolatos vulkán kitörések bekövetkeztére.



1. ábra Az Arab lemez térsége a 2023 február 6-i törökországi földrengés epicentrumához képest "Arc GIS World" térképen. A térképen feltüntettük az ezt követő, Hail városa mellett 2023 február 14 és 23 közötti idő intervallumban kialakult földrengésraj helyzetét a lemez közepén (Saudi Geological Survey), valamint az összes, 1900 óta jegyzett M5-nál nagyobb magnitúdójú földrengések helyszíneit (USGS Earthquake Database), a lemezhatárokat (Global Tectonism) és az utóbbi 1,7 millió év után született vulkánokat is (Smithsonian Global Volcanism Program). Nagyobb városok lila színnel és fehér – fekete körökkel vannak jelölve.

A kérdés azonban továbbra is "költői", hogy ez ilyen formában valós veszélyeztetettséget jelent-e? A témában mérvadó, és kellő alaposágú kutatások szinte érthetetlen módon, igen ritkák. Bár, ha elmélyedünk a probléma összetettségében ez érthetővé válik. Mindössze az elmúlt évtizedben láthattunk néhány komolyabb, de globálisan semmi esetre sem általánosítható munkát, amely azt mutatja, hogy létezik kapcsolat a földrengések és a vulkanizmus között, de az teljesen más idő és térléptékben kezelendő, mint azt elsőre gondolnánk.

A vulkanizmus és a földrengések két látszólag különböző természeti jelenség, ott, ahol együttesen (például közös területen) fordul elő, egy kölcsönös visszacsatolási rendszer része. Nevezetesen: a vulkánosság (szinte?) mindig szeizmicitással jár, vagyis a magma felszínre jutása maga okoz olyan feszültségeket, amelyek földrengésekben oldódnak fel. Az ilyen rengések leginkább a kúrtóban „fortyogó” magma által keltett rezonanciára, vagy a kúrtó fala mentén gyorsabban hűlő, és merevebb olvadék és a kúrtófal súrlódása által alakul ki. Az ilyen földrengések sajátos frekvenciával, a földrengéshullámok jellegzetes formával jellemezhetők, és az ezen szeizmicitás követése a modern vulkanológia egyik legfontosabb vulkánkitörés előrejelzés technikájának tekinthető [1-3].

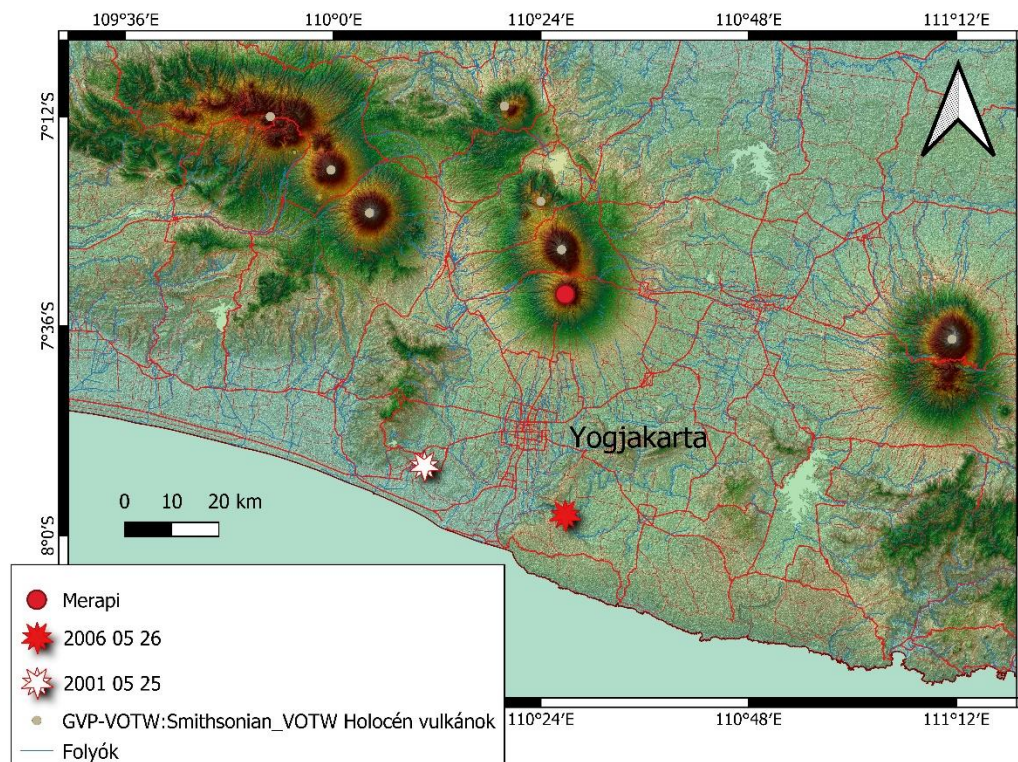
Nem lehet egyértelműen kijelenteni, hogy vulkánkitörést megelőző kisebb-nagyobb földrengés magának a kitörésnek a kiváltója/okozója vagy éppen fordítva, a magma kitörés előtti mozgása okozza a földrengés(ek)e)t (lásd az úgynevezett bradiszeizmikus kríziseket a Campi Flegreii vagy a Yellowstone kalderák esetében). Tehát van egy vulkánossággal közvetlenül kapcsolt szeizmicitás.

Azonban van egy kizárólagosan tektonikus eredetű szeizmicitás is, amely vagy vulkáni területektől távol, a vulkánosságtól függetlenül zajlik (pl. Vrancea Romániában), vagy az aktív vulkáni területeken vagy azok közelében (pl. Taupó Vulkan Zóna, Új-Zéland). Ebben az utóbbi esetben beszélhetünk igazán, és erre vannak a dokumentált példák is, arról, hogy földrengés okoz(ott) kitörést. Ebben a dolgozatban bemutatjuk azon feltételeket, amelyek mellett e kapcsolat lehetséges.

Vulkánok és földrengések, mint a földtani örökség részei

A természeti katasztrófák kiemelt szerepet játszanak az emberi társadalmak fejlődésében. Az a tény, hogy a vulkanizmus például kitűnő alapanyagot ad jó minőségű talajok létrejöttéhez, amelyen fejlett mezőgazdaság alakulhat ki, régóta ismert tény. A vulkanizmus, mint a természeti katasztrófák "nagy ötösének" az egyike, az egyik legváltozatosabb geokulturális eleme az emberi társadalmak korai fejlődésének, aminek hatásait, nyomait mind az emberek mindennapi életében, vagy egy-egy társadalom világképének alakulásában is megfigyelhetünk mind a mai napig [4,5]. Teljesen természetes, hogy az olyan társadalmak, melyek vulkáni területeken fejlődtek, évezredek tapasztalatokkal rendelkeznek a vulkánkitörésekről és arról is, hogy azok milyen kapcsolatban lehetnek a földrengésekkel. Olyan aktív vulkáni területeken, ahol több évezredek emberi kultúrák fejlődtek ki, mint például az indonéziai Jáva szigetén, egészen pontos megfigyelés-alapú legendákra, azok művészeti ábrázolásaira bukkanhatunk [6]. A Merapi, a Középső-Jáva területén emelkedő aktív rétegvulkán az egyik olyan fontos helyszín (2. ábra), ahol a mai társadalom életére is hatással vannak a több ezeréves legendák. A Merapi körül élő népcsoportok szinte mindegyikében feltűnik egy-egy hasonló motívum, amely szerint a Merapiban élő természetfeletti szellem és a déli óceán (az Indiai-óceán) úrnője, aki a Merapitól délre eső Parangtritis tenger partjának a közelében él, komoly ellenségek. E két természetfeletti erő megbékítésére Jogjakartában, mintegy félúton a vulkán és a tengerpart között, a királyi palotában speciális ceremóniákon biztosítják, hogy a két erő egyensúlyban és békességben létezzen egymás mellett. Nyilván többféleképpen lehet értelmezni a vulkán és a tenger

közelségét, és a kettő között félúton kialakult kulturális szokások sokféleségét, de azért a geológiai feljegyzések igen egyértelműen azt mutatják, hogy a térségben intenzív (M6+) földrengések gyakoriak, és azok után hetekkel, hónapokkal a Merapi gyakran intenzív kitörési sorozatba kezd. Egész pontos dokumentáció van arról, hogy 2006-ban és 2010-ben is egy jelentős földrengést követően, a Merapi aktivitása jelentősen megnövekedett. Hasonló helyen korábban is előfordult, például 2001-ben. Mitöbb, ezekben az esetekben a földrengések valóban a legendákban megnevezett tengerparton történtek. Ez alapvetően azért nem annyira meglepő, mert Jáva déli pereme a szubdukciós fronttól úgy 300 km-re fekszik. Hasonló legendák nyomaira lehet bukanni szinte egész Jáva és Szumátra területén, és szinte minden esetben kimutatható, hogy egy-egy intenzív kitörési ciklust, nagy intenzitású földrengések előzték meg. Ez a kapcsolat azért is figyelemreméltó, mert egész Indonéziát tekintve az aktív vulkánok száma jelentős. Indonézia geotektonikai helyzete pedig tipikusan lemezek konvergenciájához, lemez-alábukáshoz kötődik és az egymáshoz közeledő lemezek drámai geológiai erejére utalnak egy olyan területen, ahol több tíz millió ember van kitéve a vulkán- kitörések veszélyeinek. Így ezek a legendák, és az azokra épülő geokulturális jelenségek, fontos információval szolgálnak arra nézve, hogy minél pontosabban előre tudjuk jelezni, hogy hol és milyen típusú vulkáni katasztrófákra számíthatunk. Főleg az őslakosság körében fontos, hogy egy-egy jelentősen érezhető (és a M6-nál nagyobb magnitúdójú rengések ide tartoznak) a vulkánok közelében élő közösség tudja mit és mikor kell tenni, ha egy ilyen intenzív rengést élnek át. Ez azért is fontos, mert a jávai vulkánok döntő többsége olyan vulkán, ami alapvetően semleges vagy savanyúbb andezit – dácit összetételű magmával táplált. Ezek a magmák viszkózusok, a felszínre jutva lávadómokat hoznak létre, melyeken keresztül a kigázosodás során egyensúlyi állapotban lehetnek évekig, melyet egy-egy jelentős földrengés változtathat meg úgy, hogy hónapokkal a rengés után az adott vulkán újabb aktív fázisba léphet.



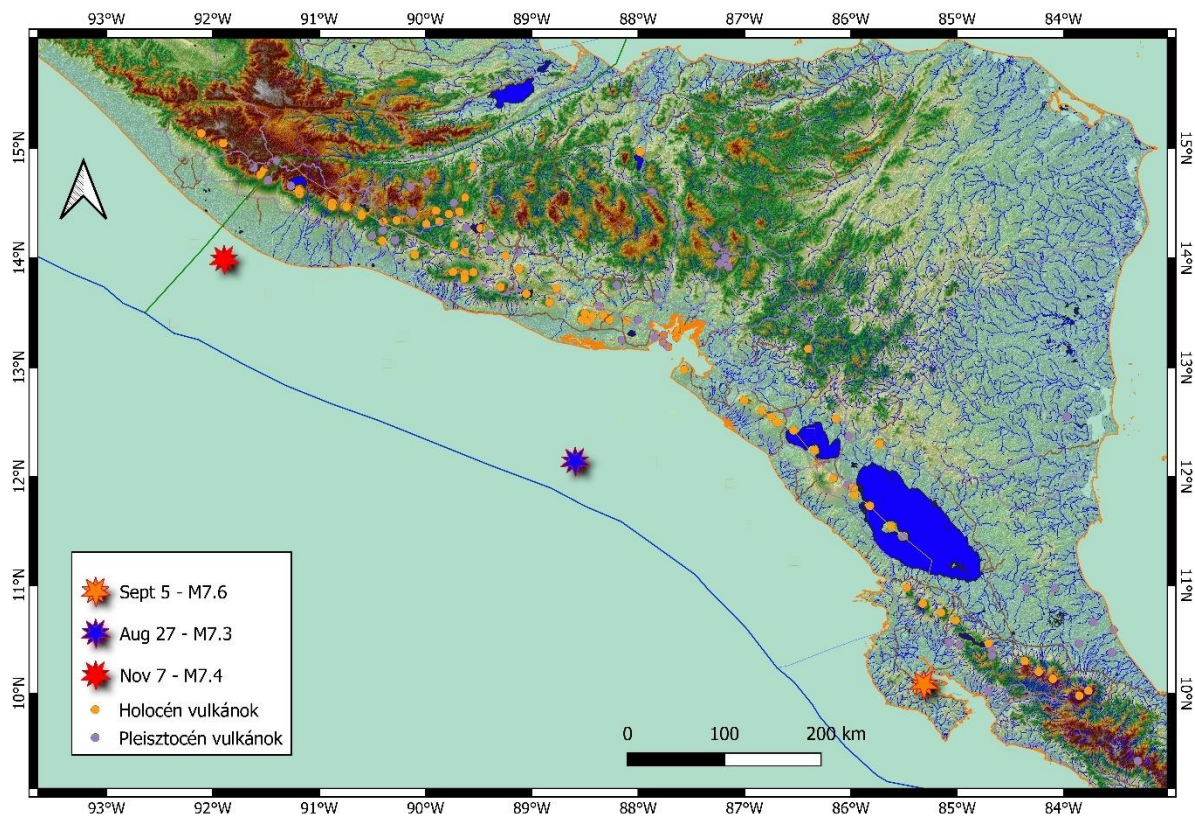
2.ábra Jáva (Indonézia) déli partvidéke Jogjakarta körül SRTM30 digitális terepmodellen. A 2006-os M6.4 erősségű földrengés a Merapi vulkán aktivitását drámaian megnövelte. A terület úthálózata (OpenStreet - piros vonalak) jól szemlélteti a vulkánkitörések és földrengések lehetséges katasztrófális hatását a terület lakosságára.

A 2006-os év a Merapi életében eseménydús volt. Áprilistól október végéig szinte folyamatosan működött. A május 26-án bekövetkezett, a tengerpart közelében 15 km mélységben kipattant földrengést követő 3 hétben a Merapi aktivitása, a kitörések számát és intenzitását tekintve is 3 nagyságrenddel megnövekedett. A vulkán csúcsán a lávadóm növekedése felgyorsult és folyamatos blokk-és-hamuár aktivitást láthattunk. Június 14-én a vulkán déli lejtője alatt meghúzódó Kaliadem települést pedig egy izzófelhő típusú piroklaszt ár teljesen elpusztította [6]. A földrengés és az általa kiváltott intenzív vulkánkitörés közel 1 millió ember kitelepítését eredményezte. Hasonló történetet láthattunk 2001-ben is, csak a 2006-os földrengés epicentruma kissé más helyen volt. A 2010-es esemény érdekes módon kisebb magnitúdójú földrengésekkel hozható kapcsolatba (<M5), de a vulkán egy igen expozív fázisba lépett azokat követően. Az Merapi példája jól mutatja, hogy a földrengések és vulkanizmus közötti kapcsolat nem olyan egyértelmű, nagyban függ attól, hogy az adott vulkán éppen egy aktív periódusát éli át, illetve attól, hogy maga a vulkán milyen típusú, azaz a földrengéseket okozó tektonikai feszültség, és annak levezetése, mennyire képes a vulkánban amúgy is éppen folyó geológiai folyamatokat befolyásolni.

Vulkán típusok és földrengések kapcsolata

Többször megfigyelték és dokumentálták, hogy alapvetően olyan helyeken tapasztaljuk a vulkanizmus felerősödését, ahol jelentős intenzitású, tipikusan M6-nál erősebb földrengések következtek be, többnyire konvergens lemeztektonikai helyzetben, mint például a szubdukciós zónákban vagy jelentős méretű kompressziós tektonikai helyzetben lévő területeken, hosszú eltolódásos szerkezeti elemek mentén. Ilyen helyek például Észak-Amerika északnyugati partvidéke, ahol a Juan de Fuca óceáni lemez a kontinenssel éles szögben közeledve, viszonylag lapos szögben bukik Észak-Amerika alá. Ez nem egy folyamatos esemény, hanem hosszú feszültség-felhalmozódási időszakok és hirtelen bekövetkező, földrengések által kiváltott feszültséglevezetési időszakokra bontható. Ilyen területeken gyakoriak az óriási, akár M9-es erősségű katasztrófális földrengések is. Ezen a területen viszonylag jól dokumentált adatbázis áll a rendelkezésünkre arról, hogy mikor, hol és milyen erősségű földrengések történtek [7]. Mindemellett a terület geológiai szerkezete és fejlődéstörténete, valamint a Cascade-hegységvonulat vulkánjainak a kitöréstörténete is jól ismert. Ezen adatok egybevetéséből jól látszik, hogy egy 1700-ban kipattant M9 erősségű megaföldrengést úgy 100 évet követően a Cascade vulkánjainak kitörései megtöbbszöröződtek [7].

Hasonló kapcsolatot mutattak ki a közép-amerikai vulkánkoszorú esetében is [8]. 2012-ben három M7.3+ szubdukciós földrengés pattant ki Közép-Amerika partjaitól alig 100 km-re (3. *ábra*).



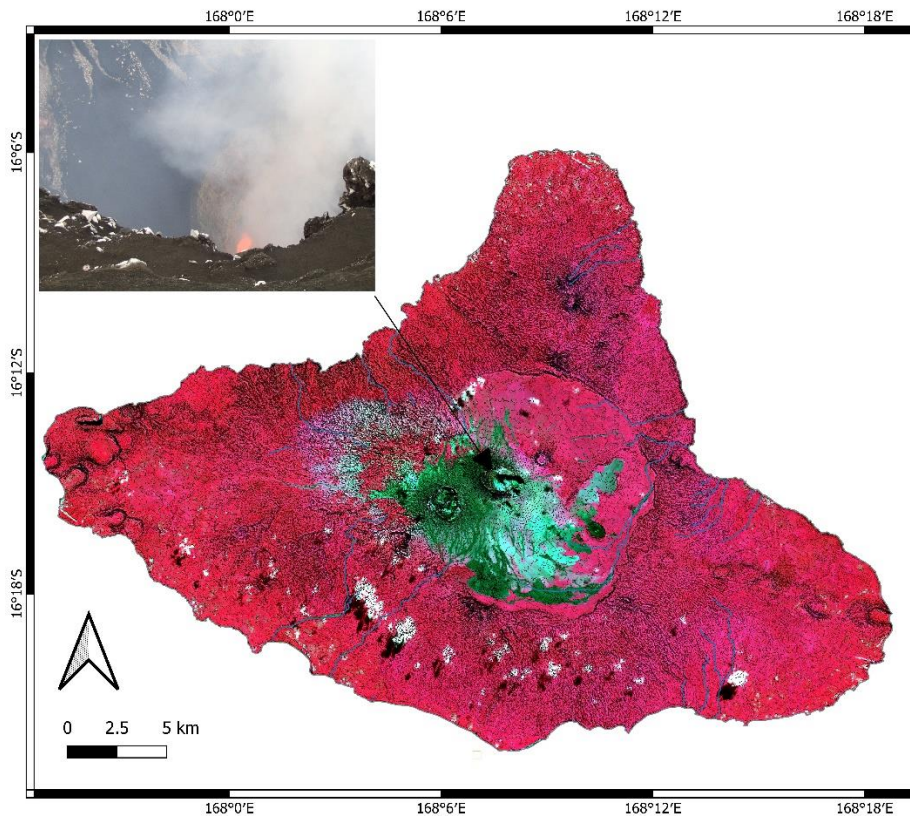
3.ábra Három M7.3+ földrengés 2012-ben felerősítette a közép-amerikai vulkánok aktivitását [8]. A területen több tucat aktív, és még annál is több pleisztocén vulkán található a szubdukciós fronthoz (kék vonal) alig 200-km-re. A terület domborzata SRTM30 digitális magasság modellből lett készítve, míg a vulkánok helyzetét a Smithsonian Global Volcanism Database adta.

A terület két vulkánja (San Cristóbal és Fuego) 3 – 8 nappal a földrengések után intenzív kitörésbe kezdett. Ha az összes vulkanizmust vizsgáljuk e három földrengés előtt található összes aktív vulkánra, akkor világosan látható, hogy 2012 után, 2019-ig bezárólag, átlagosan 4.9 kitörés volt évente, a 2012 előtti, 2000-ig vizsgált periódus átlagosan 1.6 évenkénti kitöréséhez viszonyítva. Ez a kitörések számának megháromszorozódását jelenti. Mivel nyilván ez lehet a „véletlen” dolga is, statisztikai tesztekkel, Monte Carlo szimulációval 10000 szimulációt lejátszva vizsgálták azt, hogy ez a jelentős kitörési frekvencia-növekedés lehet-e pusztán a véletlen terméke. A statisztikai teszt egyértelműen azt mutatta, hogy ez nem a véletlen műve, azaz volt oksági kapcsolat a három hatalmas földrengés és a megemelkedett vulkáni aktivitás között [8]. Az ezirányú kutatások komolyságát jelzi, hogy számos remek tudományos munka jelent meg a témában az utóbbi években. Egyre nagyobb adatbázisokat egyre komolyabb statisztikai vizsgálatoknak vetnek alá. Egy átfogó statisztikai vizsgálat a meglévő teljes földrengés (*USGS – <https://earthquake.usgs.gov>*) és vulkánkitörés (*Smithsonian – <https://volcano.si.edu/>*) katalógust tekintette át. A munka során egyértelműen kiderült, hogy a földrengések valóban okozhatnak vulkánkitöréseket, amennyiben bizonyos peremfeltételek teljesülnek. Ezek közül kettő kulcsfontosságúnak tűnik: 1) a vulkán kitörésképes állapotban kell legyen (pl. legyen kitörőképes magma valahol a vulkáni felépítményben vagy az alatt viszonylag sekély mélységben), illetve 2) a földrengésnek a vulkánhoz kellő közelségben kell bekövetkeznie adott magnitúdóhoz számítva (pl. a nagy, M7+ földrengések képesek távolabbi vulkánokat is kitörésre készíteni, mint a kisebb erősségűek) [9]. Leegyszerűsítve, a földrengésnek vagy nagyerejűnek kell lennie, ha távoli vulkánokra történő hatásukat vizsgáljuk, vagy csak közeli vulkánokra hathatnak, ha kisebb magnitúdójúak. Ez azonban csak egy nagyon leegyszerűsített koncepció, számos kivétellel. A

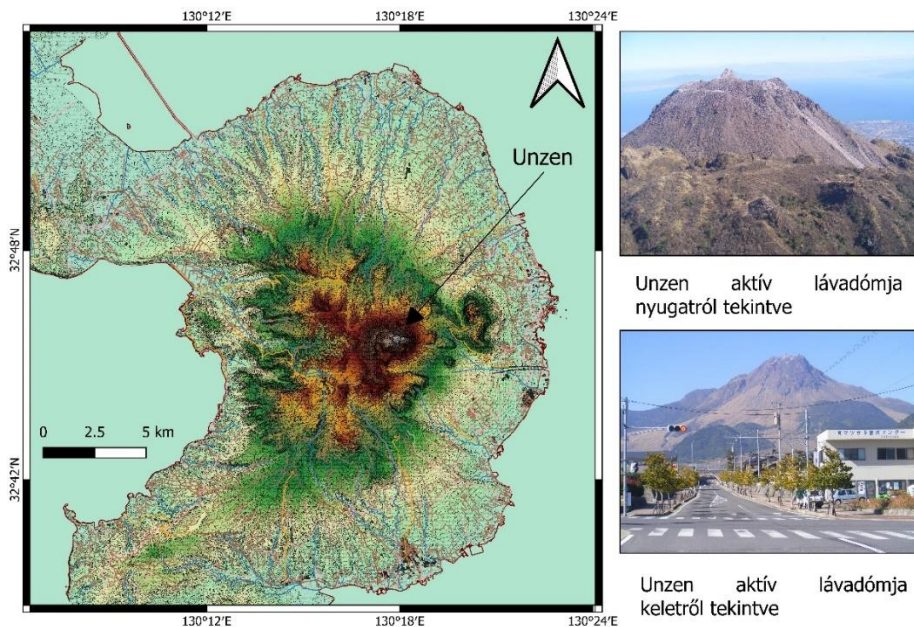
jelenség háttérben az a fizikai tény áll, hogy a földrengések vulkanizmusra történő hatása az általuk kiváltott feszültség levezetésben keresendő, amely során a földrengés-hullámok dinamikus és statikus feszültséglevezetésének módja a leginkább befolyásoló tényező egy-egy vulkánkitörés kiváltására.

A felszabadult energia a földrengés fészkeből kiindulva terjed mechanikai hullámok formájában a felszín alatti tér minden irányába. A mechanikai energia felszabadulása pedig a felszín alatti kőzettestek folytonosságának hirtelen megszűnésekor (törésekor), és/vagy a kőzettestek egymáshoz viszonyított elmozdulásakor következik be. Az a tér, amelyben a töréssel és/vagy elmozdulással együtt járó visszafordíthatatlan folyamat lejátszódik, a földrengés fészke, ezért ennek a helynek a vulkánhoz mért távolságát kell vizsgálnunk. Mitöbb, ez a hely nem feltétlenül egy pontszerű tér, hanem inkább egy, a földrengést keltett törés mentén található felület. A földrengés hatáskörében található kőzettestek, így egy vulkán is, mechanikai feszültségtérben vannak, amire az ebben a térben bekövetkező zavaró tényező (mint amilyen például egy földrengés) hatással lehet. Az adott kőzettestre ható statikus feszültség vagy terhelés, időtől nem, csak helytől függ. A dinamikus terhelés vagy feszültség már iránytól is függő, időben változó fizikai tényező. Annak jellege szerint egy földrengés karakterisztikus szeizmikus hullámokat indít el, melyek a vulkánon is áthaladnak, befolyásolva annak terhelési állapotát. A dinamikus feszültség egy átmeneti feszültségtér változást eredményez, míg a statikus feszültség a földrengés után is megmarad, mint maradandó hatás. Így a földrengés epicentrumához közeli területeken a statikus feszültség változása jelentős, míg attól távolodva minimális. A statikus feszültségtér változása általában a földrengést kiváltó törés hosszának néhányszorosa távolságban jelentős, attól távolodva annak hatása elhaló. A statikus feszültség lehet tágulós, mely dácitok benyomulásához, vagy a kürtő kinyílásához vezethet elősegítve a magma felszínre jutását. Amennyiben a magma már tartalmaz buborékokat, a nyomáscsökkenés azok gyorsabb felszabadulását, magma-fragmentációt és kitörést okozhat. Tágulós feszültségtér horizontális elmozdulásokat is okozhat, elősegítve a hidrotermális rendszer szabadabb működését, a fluidumok mozgási lehetőségének megnövelésével. Kompressziós feszültségtér kialakításával alapvetően a magma „kíréseletét” érhetjük el, vulkánkitöréseket is keltve. Ezek a folyamatok nyilván a földrengés epicentrumához közelebb lehetnek fontosok a vulkánkitörés beindítása szempontjából. A földrengések által kiváltott dinamikus feszültség már sokkal bonyolultabb helyzetet okozhat. A dinamikus feszültség, amit a földrengések okozhatnak, sokkal kisebb mértékben csökken a távolsággal, így azok hatása az epicentrumtól nagyobb távolságban is érvényesül. A dinamikus feszültségtér változás nagy hatással lehet a magmás fluidumok viselkedésére: 1) jelentősen befolyásolja a buborék képződését és növekedését, 2) túlnyomás alá helyezheti a rendszert, ami a buborék feláramlást befolyásolhatja, illetve 3) a magma tározókban és a vulkáni kürtőben képződő kristályok mechanikai töredezésével és azok visszahullásával a magma erőteljes felbuborékosodásához vezethet [10]. A fenti gondolatmenet elvezethet ahhoz a következtetéshez, hogy egy földrengés vulkánkitörést válthat ki.

Nemcsak a földrengésnek kell, magnitúdójához képest, kedvező távolságban lennie a vulkántól, de a vulkánnak is olyan állapotban kell lennie, hogy az kitörhessen. Így a vulkánok típusa is az egyik meghatározó paraméter. Alapvetően a vulkánok vagy nyílt vagy zárt magmás táprendszerrel rendelkeznek aszerint, hogy azok magmás rendszere nyílt kapcsolatban van-e a külvilággal (pl. lávatavak, vagy a kürtőben aktívan jelen levő magma formájában) vagy attól elzárt (pl. a magma csak mélyen a kürtőben, vagy a sekély magmatározókban van e jelen). Mivel a magma viszkozitásától nagyban függ az adott vulkán szerkezete és működésének lehetséges forgatókönyve, a földrengések egész más hatással lehetnek egy nyílt és kis viszkozitású magmával táplált (pl. bazalt) vulkánra, mint amilyen az Ambrym (Vanuatu) (4. ábra), mint egy olyan vulkán esetében, ahol nyílt kürtőjű, de viszkozusabb dácitos, riolitos magmával állunk szemben, mint például az Unzen (Japán) (5. ábra).



4. ábra Ambrym (Vanuatu) szigete Sentinel-2 Hamis színes űrfelvételen, ahol jól látható a bazaltvulkán hatalmas kalderája, melyet az elmúlt 2000 év aktivitása vulkáni hamuval és lávafolyásokkal töltött fel (zöld színek). A vulkán nyílt magmás táprendszerrel rendelkezik, ezért gyakran lávatavak alakulnak ki a fő kürtőkben (fotó 2005-ből).



5. ábra Unzen (Japán) vulkán STRM30 digitális felszínmodellén) egy részben nyílt magmás rendszerű (két jobboldali kép: 2007-ből), de igen viszkózus dácitos összetételű magmával rendelkező vulkán. Egy ilyen rendszer szeizmikus aktiválódásához jelentős intenzitású és közeli földrengésre van szükség. Az Unzen különösen veszélyes, mert a meredeken növekvő lávadómok már közepes intenzitású rengésektől is instabillá válhatnak kisebb kitöréseket generálva, majd azok összeomlása blokk-és-hamuárakat és vulkáni törmeléklavinákat indíthat el.

A 2023 február 6. törökországi földrengés utóélete az Arab-félszigeten

A 2023 február 6-i 7.8 magnitúdójú földrengést követően a Közel-Keleten is felmerült annak lehetősége, hogy a földmozgás esetleg vulkáni aktivitást is eredményez. Ezt az aggodalmat felerősítette, hogy az említett földrengést követően egy közepes és kis intenzitású földrengésekből álló raj alakult ki az Arab pajzs peremén Hail városa mellett a 2023 február 14 és 23 közötti idő intervallumban [11] (1. ábra). A helyi közösségek pánikba estek a hírekben látható riasztó képektől, így a szokásos terepi megfigyelések mellett a Szaúdi Geológiai Szolgálatnak kiemelt figyelemmel kezdte ezt a földrengésrajt és lehetséges következményeit vizsgálni, többek között a felszín alatti vizek hőmérsékletének a mérésével és tüzetes terepi megfigyelésekkel. Az eredmény, mint várható volt, nem mutatott ki semmiféle közvetlen kapcsolatot a törökországi földrengések és a vizsgált arábiai földrengésraj között. A kutatómunka viszont felvetette azt a kérdést, hogy az a több mint 3000, egy millió évesnél fiatalabb monogenetikus (rövid életű és kis térfogatú) vulkán, amely az Arab-félsziget nyugati peremén, a Holt-tenger törésrendszerén át egészen a Kelet-Anatóliai Törésrendszer melletti területig követhető, vajon nem születhetett az Arab mikrokontinens lemezhatárán bekövetkezett szeizmikus események hatására? A kérdésselvetés jogos, de megválaszolásához jelenleg messze nincs megfelelő mennyiségű adatunk. Az is igaz, hogy a Vörös-tenger mellett ritkák a nagyon erős földrengések (1. ábra), ráadásul azok epicentrumai jelentős távolságra van az arábiai vulkánoktól. Az viszont tény, hogy a vulkanizmus és tektonizmus kapcsolata igazolt, különösen a Holt-tenger törésrendszere mentén, ahol kis vulkánok sora települt magára a törészónára [12]. Ezek a vulkánok azonban idősebbek, így barminemű kapcsolat a keletkezésük és a szerkezeti mozgások vagy szeizmicitás között komoly és részletes geológiai térképezést és kutatómunkát igényel, melyek még kezdeti stádiumban vannak.

Hogyan tovább?

Mint ahogy bemutattuk, nemcsak a vulkáni tevékenység maga vált ki szeizmikus mozgásokat, hanem a tektonikus eredetű földrengések is okozhatnak vulkánkitöréseket, de hogy pontosan hogyan, azt még kutatni kell. Az biztos, hogy minél közelebb vagyunk egy földrengés epicentrumához és minél nagyobb annak a magnitúdója, annál nagyobb az esélye egy közeli vulkán aktivizálódásának, feltéve, ha van mit aktivizálni, azaz van kitörőképes magma a felszín közelében. Úgy tűnik, hogy az eddig kimutatható összefüggésekből megállapítható egy távolság-magnitúdó kritérium, amely szerint joggal feltételezhető, hogy hol és mikor lehetséges, hogy egy adott földrengés vulkánkitörést generáljon a hatáskörén belül [9]. Ez az empirikus statisztikai elem fontos része lehet a komplex természeti katasztrófák kezelésének, abban az értelemben, hogy bizonyos erősségű és típusú földrengések után hol kell azonnal felkészülni egy lehetséges vulkán kitörésre is [4] és így milyen lépcsőzetes katasztrófa-megelőzési és elhárítási helyzetre is felkészülni. Az, hogy pontosan milyen típusú vulkánkitörésre számíthatunk, alapvetően a vulkán pillanatnyi aktivitási állapotának és a vulkán típusának, illetve az azt tápláló magma kémiai összetételének a függvénye [10]. Mivel mindeddig igen kevés statisztikailag értelmezhető adatot szolgáltató kutatás történt, mindenképp fontos lenne ezen az úton tovább haladni és olyan területek átfogó vizsgálatába kezdeni, mint a Japán és a Fülöp-szigetek régiói vagy az Andok vonulata. Nagy lehetősége van a komplex statisztikai vagy gépi tanulási módszerek bevetésének ahhoz, hogy a rendkívül bonyolult földrengésség-vulkánosság kölcsönös visszacsatolási rendszert megértsük.

Köszönetnyilvánítás

Dr Szakács Sándor (Alexandru) alapos bírálata nagyban hozzájárult e kézirat pontosításában, köszönet érte. Dr Kovács István meghívásáért e Fizikai Szemle kötetbe külön köszönettel tartozom.

Irodalom

1. McNutt SR. Volcanic seismicity. In *Encyclopedia of Volcanoes*, Sigurdsson H, Houghton BF, McNutt SR, Rymer H, Stix J, [Eds]; pp. 1015-1033, Academic Press: San Diego, (2000).
2. Vyacheslav MZ. *Introduction to Volcanic Seismology*, Third Edition Elsevier: Oxford, (2017).
3. Gudmundsson A. *Volcanotectonics: Understanding the Structure, Deformation and Dynamics of Volcanoes*, Cambridge University Press: Cambridge, (2020).
4. Fepuleai A, Weber E, Németh K, Muliaina T, Iese V. Eruption styles of Samoan volcanoes represented in tattooing, language and cultural activities of the indigenous people. *Geoheritage* 9, 395-411, (2017) [doi:10.1007/s12371-016-0204-1].
5. Cashman KV, Cronin SJ. Welcoming a monster to the world: Myths, oral tradition, and modern societal response to volcanic disasters. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176, 407-418, (2008), [doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.01.040].
6. Troll VR, Deegan FM, Jolis EM, Budd DA, Dahren B, Schwarzkopf LM. Ancient oral tradition describes volcano-earthquake interaction at Merapi volcano, Indonesia. *Geografiska Annaler Series a-Physical Geography* 97, 137-166 (2015), [doi:10.1111/geoa.12099].
7. Hill DP, Pollitz F, Newhall C. Earthquake–volcano interactions. *Physics Today* 55, 41-47, (2002), [doi:10.1063/1.1535006].
8. González G, Fujita E, Shibasaki B, Hayashida T, Chiodini G, Lucchi F, Yokoyama I, Németh K, Mora-Amador R, Moya A, et al. Increment in the volcanic unrest and number of eruptions after the 2012 large earthquakes sequence in Central America. *Scientific Reports* 11, 22417, (2021), [doi:10.1038/s41598-021-01725-1].
9. Legrand D. Which earthquake can trigger a volcanic eruption? *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 432, 107698, (2022), [doi:10.1016/j.jvolgeores.2022.107698].
10. Seropian G, Kennedy BM, Walter TR, Ichihara M, Jolly AD. A review framework of how earthquakes trigger volcanic eruptions. *Nature Communications* 12, 1004, (2021), [doi:10.1038/s41467-021-21166-8].
11. Németh K, Hosny A, Ashor M, Abdulhafez K, Hablil T, Alsowaigh A, Moqem F. Report on the site visit to the epicenter region of the Ash Shinan swarm east in Hail City on February 14 - 23 2023. *Saudi Geological Survey Data-File Report*, SGS-DF-2023, 1-8 (2023).
12. Segev A, Schattner U. Why does volcanism associated with the Dead Sea fault occur only along its crossing with the Irbid rift and Harrat Ash-Shaam volcanic field? *Tectonophysics* 848, 229718, (2023), [doi:10.1016/j.tecto.2023.229718].