

## A szantorini szeizmikus krízis margójára – Prof. Németh Károly írása

A különféle média forrásokból a hazai közvélemény már széleskörű tájékoztatást kapott, szinte napi szinten újabb és újabb hírekkel bombázva, a 2025. január végén kezdődött a görögországi Szantorini sziget környékén kialakult földrengés krízisről, ami több tudományos és még több (fél)tudományos hírrel telítette a hírcsatornákat. Ez természetes, hiszen Szantorini is (és a közelében található más görög szigetek is) a magyar turisták közkedvelt célpontja, és a nyári szabadságok tervezése már elkezdődött. Egy ilyen helyzetben nem kellemes olyan riportot látni napi szinten, amiben tömeges kitelepítésekről és földrengés egyéb hatásáról láthatunk felvételeket. Ezek éppenséggel a közelmúlt (2023. február 6) egyik legnagyobb – a Kelet-Mediterrán térséget is megrázó - földrengés képeit eleveníti fel, ami majdnem napra pontosan két évvel a szantorini események előtt történt ([https://en.wikipedia.org/wiki/2023\\_Turkey-Syria\\_earthquakes](https://en.wikipedia.org/wiki/2023_Turkey-Syria_earthquakes)). Mivel a közvélemény érdeklődése természetes, elvárható korrekt tájékoztatás, ami nem egyszerű feladat olyan területről, mint pl. az Égei-tenger vidéke, aminek ismerete az általános és talán elvárt szinttől - különösen az elvárt és gondolt információ felbontástól - messze elmarad. Ebben az írásban megpróbáljuk összefoglalni röviden és közérthetően a területen kialakult krízishelyzet geológiai hátterét, hogy mindenki számára világosabbá váljon, miért nem lehetett azonnal számos kérdésben egyértelmű választ adni. Egyebek mellett a kérdések közül kiemelkedik, hogy a krízis eredete vajon magmás vagy tektonikai (szerkezeti) folyamatokra vezethető-e vissza. Ugyan több hazai kiváló szakember már a kérdéskörben (így Prof. Harangi Szabolcs, Prof. Karátson Dávid, Prof. Timár Gábor, Dr. Kovács István, Dr. Kósik Szabolcs) különböző online felületeken, országos médiában, vagy éppen közismert közösségi csoportokban (például a Tűzhányóblog) és kerültek célkeresztbe újabb és újabb médiahullámokat keltve, amelyek hatása mind a mai napig érezhető. Több esetben helyes információk is áttételesen, sokszor kiragadva az adott környezetéből új életre kelve vetettek fel újabb kérdéseket. A HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet által kiadott rövid elemzések is így kerülhettek teljesen más megvilágításba (pl. "*Magyar kutatók: pusztító természeti csapás fenyegeti a népszerű üdülőparadicsomot*" az Origo.hu oldalán, amit „*Bizonytalan a helyzet a görög üdülőparadicsomban a földrengéssorozat után*” címre kellett változtatni a portálnak), jelezvén, hogy mennyire fontos a felelős hírközlés főleg egy olyan helyzetben, ahol a probléma mély tudományos jellegénél fogva nem biztos, hogy ezen a szinten szerencsés az azonnali megnyilvánulás azaz „*hangoskodás vagy hangos gondolkodás*”.

A fentieket figyelembe véve a legfontosabb megjegyzés, hogy a görögországi krízishelyzet kezelésében az egyedüli kompetens csoport a görög katasztrófavédelem, és az azokat kiszolgáló tudományos intézmények. Ezek az szervezetek rendelkeznek olyan jogosítvánnyal, hogy az adott intézkedéseket megtegyék, ideértve a lokális, vagy tömeges evakuálást, lezárásokat, és a hivatalos hírek kiadását. Továbbá tudományos adatokon alapuló információval látják el az ott élő vagy odalátogató érintetteket. A görög kutatóhálózat, különösen a szeizmikus megfigyelőrendszerek, a hozzátartozó kutatók, és rajtuk keresztül a nemzetközi kapcsolatrendszerük a világ élvonalába tartozónak tekinthetők. Lehet, hogy a szeizmikus hálózat a meglévő rendszerek sűrűségét és érzékenységét nézve elmarad egyes országok szeizmikus hálózatától, (de nem azok minőségében vagy a szükséges emberi szakértelmet illetően), ami a görög geotektonikai helyzet ismeretében már nem olyan megnyugtató. A Görög Szeizmikus Rendszer (Hellenic Seismic Network – HSN - <https://bbnet.gein.noa.gr/HL/>) több évtizede folyamatos (és többnyire nyilvánosan elérhető) szeizmikus adatokat gyűjt a Föld egyik - tektonikailag - legkomplexebb területéről, ahol ráadásul a populációsűrűség is jelentős. Mi több a látogatók száma az év kétharmadában jelentősen megemelkedik. A HSN szoros kapcsolatban van a török, olasz, egyiptomi, szaúdi

szeizmikus megfigyelőhálózattal és - a sziget geológiai és geofizikai kutatásainak köszönhetően - szinte napi kapcsolatban van vezető brit, francia, német és amerikai kutatócsoportokkal. Ezt a komplex beágyazódást azért fontos kiemelni, mert a görög hatóságok döntéshozói mechanizmusában ez a kapcsolatrendszer szervesen beépült. Azaz, a döntések nem véletlenszerű „tűzoltások”, hanem a világ vezető geológiai és geofizikai szakemberei által is visszaigazolt döntések sorozata. Ez azt is jelenti, hogy minden külső megjegyzés, javaslat vagy közlemény kutató, kutatóintézet, vagy nem szakértő közösség felől (ideértve jelen írást is) nem tekinthető másnak, mint csak megfontolandó információnak, vagy maximum elgondolkodtató javaslatcsomagnak. Így például nincs értelme, és nem is szabad a döntéshozók által kiadott cselekvési programokat minősíteni és szakszerűtlen információkkal elbizonytalanítani.

Valójában ez az egész folyamat egy külön tudományág, a természeti krízis helyzetek kezelése (angolul „*natural hazard emergency management*”) keretében történik. Amennyiben a krízis olyan kritikus szintre jut, hogy a nemzeti rendszer komoly problémákkal szembesül, a nemzeti rendszereknek megvan az a protokolláris mechanizmusa, amely segítséget kérhet kívülről. Ilyen folyamat többször is előfordult a Csendes-óceán délnyugati térségében, ahol a vulkán-szeizmikus krízishelyzetekben Vanuatun (vulkáni-szeizmikus krízis), Salamon-szigeteken (vulkáni krízis) vagy Szamoa (szeizmikus-cunami krízis) esetében a nemzeti hálózatok éppen az új-zélandi vagy ausztrál hatóságok segítségét kérték diplomáciai útvonalakon keresztül. Itt fontos megjegyezni, hogy a hivatalos kríziskezelés, és a tudományos megfigyelések és kutatások folyamata nem feltétlen párhuzamosan futó dolog. Ez természetesen ideális esetben párhuzamosan halad, főleg valós időben, azonban ennek megvalósulására nagyon ritkán van példa. Pont ezért írtam fentebb, hogy ez is egy teljesen önálló, egzakt és a társadalomtudományok határán mozgó kutatásokat igénylő tudományterület. Akkor itt nézzük – a fentiek figyelembevételével, hogy mi a helyzet Szantorini esetében és mi a fő kérdés?

2025 január 25-től (inkább 26-tól) egy jól kivehető szeizmikus aktivitás kezdődött ÉK-re Szantorinitől. Első közelítésben és intuitív módon a földrengések szinte azonnal emlékeztették a lakosokat, hogy talán a Szantorini kaldera ébredszik. A földrengések intenzitása éppen az érezhető határ (a 2.5 magnitúdójú (továbbiakban: M)) körüli volt, majd egyre több 3.5 M fölötti rengés jelentkezett, időben egyre inkább egy elnyúlt, Szantorinitől pár tíz kilométerre ÉK-re futó tektonikai vonal mentén. Ez szinte azonnal felvetette azt a lehetőséget, hogy az egész esemény a régió nagytektonikájával lehet inkább kapcsolatban. Ez a gondolat azonban pár nappal az első rengések után egyre gyengült. Ennek miéértje magyarázatot igényel.

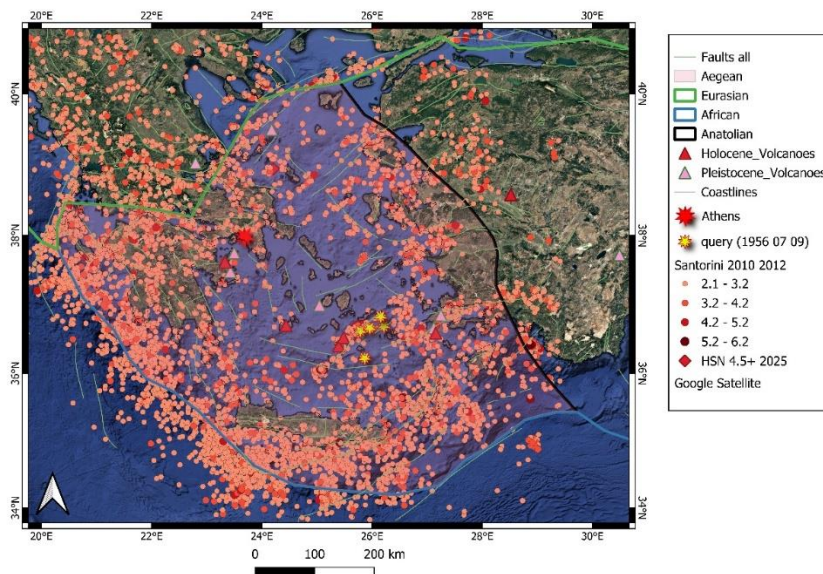
A földrengések helyzetének, intenzitásának, és a felszabaduló szeizmikus energiák azonosításának módszere egy szeizmikus megfigyelő rendszer adataira épül. Úgynevezett „békeidőben” ez a rendszer a korábbi földtani információk alapján megtervezett hálózati megfigyelőrendszer adatait gyűjti. Az adatok nyilván az adott helyen kipattanó rengésektől változó távolságban elhelyezkedő szeizmométerek információit tartalmazza. Az első beérkező szeizmikus hullámok adataiból, azok spektrumából, irányából, intenzitásából egy meglehetősen bonyolult, de ma már részben automatizált módszerrel lehet azonosítani a rengés kipattanásának fészket - a hipocentrumot -, aminek felszíni vetülete lesz az epicentrum. Fontos megjegyezni, hogy a rengés fészkének pontos azonosítása gyakorlatilag az adott földtani és regionális rendszerben alkalmazott modellekre, azok minőségére, és a korábbi szeizmikus információk által összegyűjtött - és valós időben alkalmazható - összképére alapozva számolható, sokszor jelentős bizonytalansággal. Éppen ezért gyakori, - és a szantorini krízishelyzetben is látható - hogy egy korábban közölt adatot később megváltoztatnak, az újabb és pontosabb modellszámítási eredmények miatt. Azonban annak a kérdésnek eldöntésében, hogy az adott szeizmikus krízist éppen magma benyomulás vagy regionális és lokális tektonikai folyamatok okozták-e, már messze abban a felbontási

tartományban vannak, hogy a válasz jelentősen változzon. Pontosan ezt látjuk, amikor a GFZ Helmholtz Centre for Geosciences (<https://www.gfz.de/en/press/news/details/fragen-und-antworten-zu-den-erdbeben-bei-santorini>) folyamatosan frissülő adatait olvassuk.

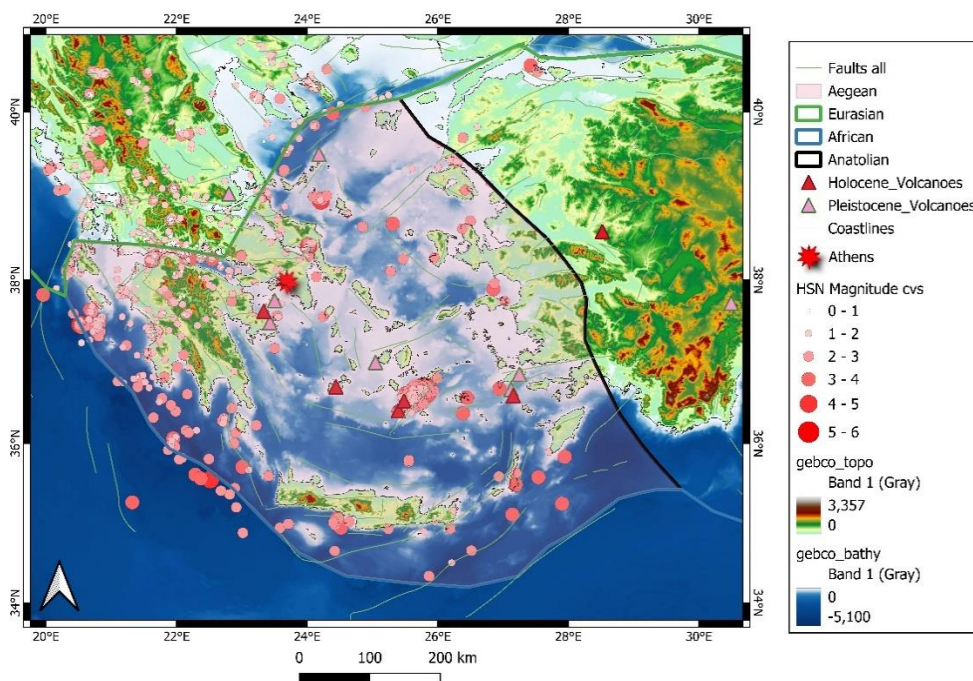
Akkor mi is a probléma? Miért ilyen nehéz e kérdés eldöntése? Ehhez először is a terület régió szintű geodinamikájára kell egy pillantást vetni. A terület egy komplex lemeztektonikai helyzetben van, ahol az Égei-mikrolemez van beékelődve az Afrikai-lemez (pontosabban annak Núbiai része) és az Európai lemez közé, amit keletről az Anatóliai-mikrolemez nyugati irányú „kipréselődése” az Arab-mikrolemez Euráziával való ütközése csak komplikál (1. ábra). Ezt a geodinamikát egy jellegzetes lemezalábukás, annak minden csatlakozó folyamatával (a szubdukciós front mögötti tágulós feszültségtér kialakulása, és annak következtében egy normálvetőkkel és azokhoz csatlakozó oldaleltolódásokkal jellemezhető kompressziós eltolódásos és húzásos eltolódásos rendszer kialakulásával) komplikál igen kis távolságokon belül. Ez azt jelenti, hogy a területen az összetett szeizmicitást kiváltó folyamatok régóta ismertek. A rengések fészekmélysége és intenzitása markánsan kirajzolja a lemezhatárokat (1. ábra). Legutóbb 2010 és 2012 között volt Szantorini közelében komoly szeizmikus krízis, ami a térség vulkáni-szeizmikus kutatásának jelentős lökést adott. Ha a 2010 – 2012 közötti időszak szeizmikus krízis rengéseinek helyét ábrázoljuk úgy, hogy minden más földrengés helyét is jelöljük a nagyobb geodinamikai környezetben, akkor jól látható, hogy a Szantorini események a szubdukciós fronttól távolabb, a mikrolemezen belül voltak (1. ábra).

A 2010-2012-es krízist megelőzően Szantorini közelében a legpusztítóbb esemény 1956. július 9-én történt, amikor jelentős földrengések pattantak ki - szökőárat is okozva - gyakorlatilag a mostani és a 2010-2012-es rengésekkel azonos területen. Az azonos terület azonban csak nagy vonalakban jelent egyező helyet, semmi esetre sem használható akár magma benyomulás helyének meghatározására is alkalmas felbontásnak. Tovább bonyolítja a helyzetet, hogy az 1956-os események helyének meghatározása még most is tudományos vita tárgya.

Ha ugyanígy megnézzük, hogy a nagyobb régióban mi is történt a mostani január vége óta tartó szeizmikus események alatt, egészen hasonló regionális kép rajzolódik ki mind a földrengések intenzitását (2. ábra), mind azok mélységét tekintve (3. és 4. ábrák).

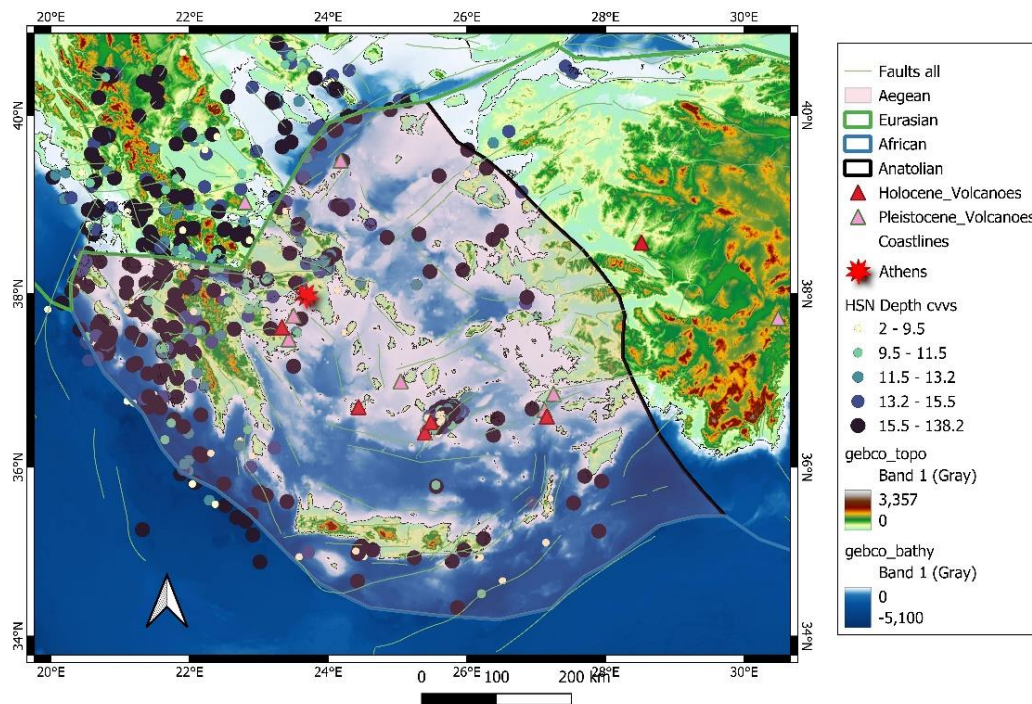


1. ábra Az Égei-tenger geotektonikai környezete. Az Égei-mikrolemez enyhe rózsaszín háttérrel lett jelölve. A térkép jelöli a fiatal (holocén és pleisztocén) vulkánokat. A térkép a 2010-2012-es szeizmikus krízis idején azonosított rengéseket mutatja az egész Égei-medencére nézve a Görög Szeizmikus Hálózat (HSN) által katalogizált adatokból. A 2025-ös 4.5M-nél intenzívebb rengések szinte beleolvadnak ezen a felbontáson a 2010-2012-es eloszlásba. Az 1956. július 9-i rengések is szinte azonos területre koncentrálnak (sárga csillagok). A jelentősebb törésvonalak „1:5 Million International Geological Map of Europe and Adjacent Areas IGME 5000” alapján.

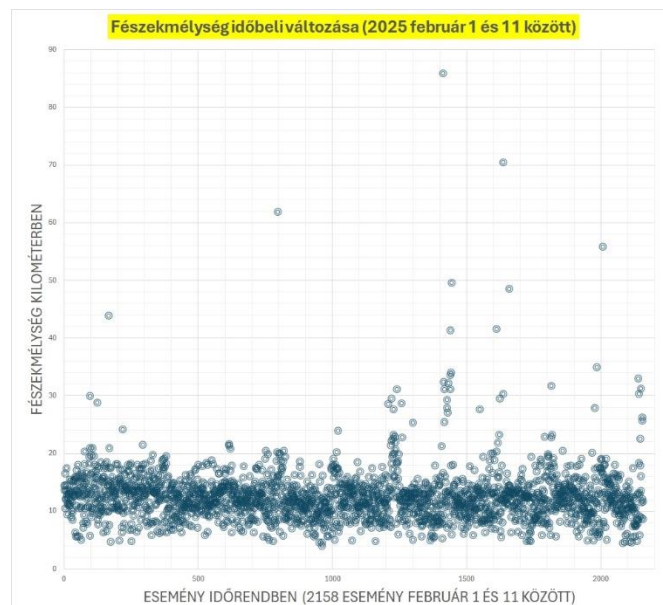


2. ábra A 2025 január-februári Szantorini szeizmikus krízis földrengés-eloszlás térképe az egész Égei-medence területén a rengések magnitúdóhoz viszonyítva. A térkép a Görög Szeizmikus Hálózat (HSN) adataira épül. A digitális magasság modell (DEM) a „GEBCO Gridded Bathymetry” adatbázisát használta. A holocén és pleisztocén vulkánok a Smithsonian Global Volcanism adatbázisából származnak. Az Égei-mikrolemez enyhén rózsaszín átfedéssel van jelölve. Az Égei-medence sekélytengeri fedettsége szembeötlő a térképen. A szubdukció iránya az Afrikai-lemez északi irányú alábukásával jellemezhető, ami jellegzetes észak felé konkáv ívet alkot. A szubdukciós front délies hátrálása ív mögötti extenziós tektonikát eredményez, amely enyhén ÉKK-DNyNy irányítottágú rift zónák kialakulásához vezet. Az egyik ilyen zónában helyezkedik el a Christina-Szantorini-Kolumbo vulkáni mező, ahol a jelen szeizmikus krízis kialakult. Feltűnő, hogy a Szantorini krízissel egyidőben a szubdukciós front mentén is jelentős intenzitású rengések történtek jelezvén a regionális szerkezeti folyamatok kapcsolódó működését.





3. ábra A 2025 január-februári Szantorini szeizmikus krízis földregés eloszlás térképe az egész Égei-medence területére, ami a rengések fészkmélyiségéhez van viszonyítva. A térkép a Görög Szeizmikus Hálózat (HSN) adataira épül. A digitális magasság modellhez (DEM) a „GEBCO Gridded Bathymetry” adatbázis volt használta. A holocén és pleisztocén vulkánok a Smithsonian Global Volcanism adatbázisból származnak. Az Égei-mikrolemez enyhén rózsaszín átfedéssel van jelölve. Figyelemre méltó, hogy a szubdukciós front mentén pattantak ki a legmélyebb rengések, míg az Égei-medence közepén, ahol a Christina-Szantorini-Kolumbo vulkáni mező is található, a szeizmikus krízis sekély mélységű földregésekkel jellemezhető.



4. ábra A 2025 február 1 és 11 között kipattant földregések fészkmélyése a HNS által rögzített adatok alapján (de azok térbeli helyzetét nincs figyelembe véve) enyhe csoportosulást mutat, idővel enyhén sekélyesedő dominanciával. Érdekes, hogy az krízis kezdete óta egyre több rengéscsoport látható, amelyek - azonos időben - mélyben kipattant és sekély rengések együtteséből álló csoportokat alkotnak. Ezen adatok vizsgálata jelenleg kiemelt jelentőségű, ugyanis azok térbeli ábrázolása jellegzetes rengés klasztereket tudnak azonosítani, amelyek esetleges fluidum-migrációval hozhatók kapcsolatba.

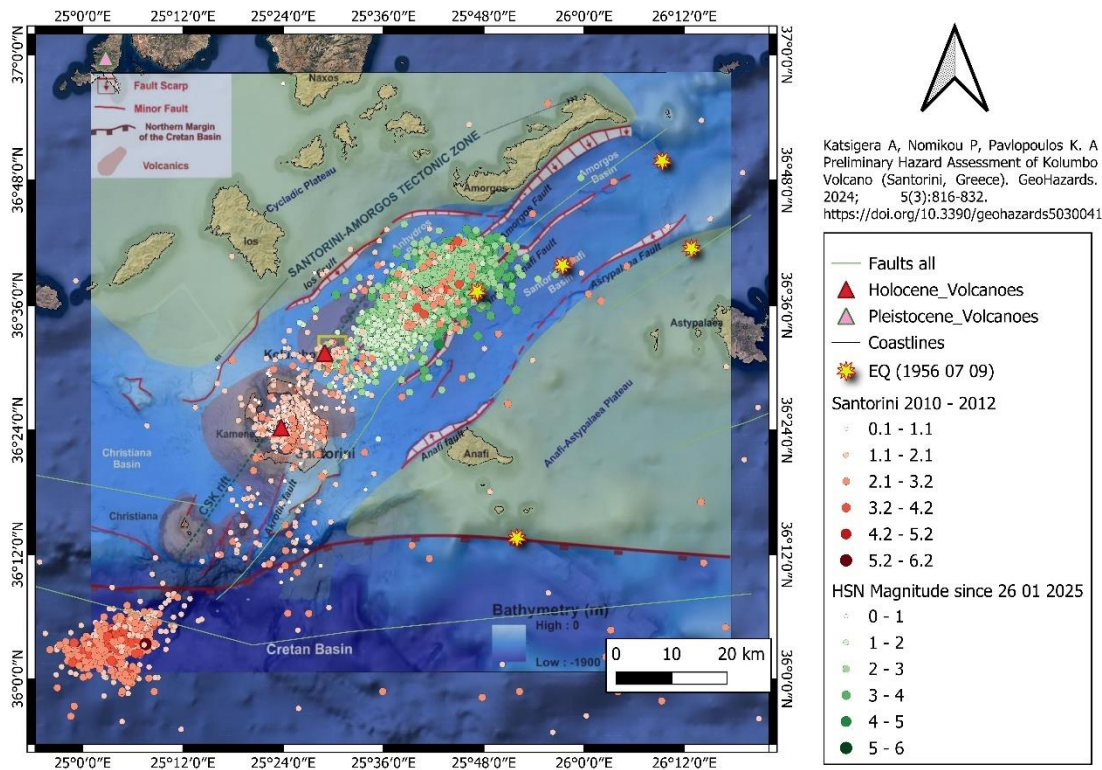
A két regionális geodinamikai térképen (1. – 3. ábra) jól látható, hogy Szantorini körül az Égei-mikrolemezen belül egy különleges területet rajzolódik ki, ahol a rengések egy jól látható rendszerbe szerveződve pattantak ki. Fontos észrevenni, hogy az Égei-mikrolemez és a tengeraljzat térkép (1.-4. ábra) mutatja, a görög szárazföldi területek folytatását, gyakran kisebb, mint 100 méteres tengerfedettséggel, amelyekből az égei szigetvilág szigetei a platók kiemelt területei, vagy regionális szerkezeti elemek peremén találhatóak. Ezekben, mint tektonikus árkokban, a terület legnagyobb ismert holocén vulkánjai találhatóak, így a Szantorini is. Tehát egyáltalán nem meglepő intuitív magyarázat az, hogy a földrengések köze lehet egy magmás-tektonikus rendszerhez, azaz a kőzetlemezen áthatoló fluidumokkal (alapvetően olvadt kőzetanyaggal, azaz magmával). Ez logikusan azt is jelenti, hogy pusztán a földrengések mintázatából és a regisztrált földrengéshullámok vizsgálatából nehezen lehet egyértelmű következtetéseket levonni. A tektonikus eredetű földrengések sajátossága, hogy van egy viszonylag rövid előrengési sorozat, amit egy nagyobb intenzitású fő rengés követ, majd akár hónapokig, évekig tartó lecsengési periódus következik exponenciális intenzitás csökkenéssel. A periódus hosszát a főrengés intenzitása határozza meg. Ez egyszerűnek tűnhet, a valóság azonban komplikáltabb, mert sokszor akár több ezer rengés hullámformáját kell ellenőrizni. Továbbá olyan helyzet is lehet, hogy két tektonikus rengés pattan ki közel időben egymáshoz, ahogy az éppen ezen a területen is történt 1956-ban. A probléma a jelen krízisben még mindig az, hogy nem volt karakterisztikus főrengés, azaz az első szeizmikus események nem különíthetők el fő- és utófázisra. Ezt tovább nehezíti az a tény, ha több tektonikus rengés pattan ki szűk területen, és azok időbeli lefutása egyszerűen „összegabalyodik” a folyamatos adathalmazban. Ha ez több napig eltart, akkor egy olyan komplex matematikai problémával állunk szemben, amit nagyon nehéz egyértelműen szétválasztani. Ugyan idővel egyre biztosabban szétválaszthatók lesznek az események, de ha a szeizmicitás hosszú ideig megmarad, ugyanígy növekszik a rendszer összetettsége. Tehát szinte kódolható, hogy valójában modell-alapú valószínűségeket tudunk majd megadni, amelyek nem túl praktikusak a valós idejű krízis kezelésre.

Vulkáni folyamatokhoz köthető szeizmicitás alapvetően négyféle spektrumot ad a szeizmikus megfigyeléseken (Zobin 2025), úgy mint 1) vulkántektonikus típus, 2) hosszú periodicitású események, 3) földremegés és 4) vulkanikus eredetű robbanások. Nyilván az utolsó jelleg akkor valós, ha már vulkanizmus megindult. Ezt sem lehet teljesen kizárni, hisz nem tudhatjuk mi történik a víz alatt, bár a víz alatti robbanásos eseményekre köthető szeizmikus profilok sajátos jelleggel bírnak, és olyanokat eddig nem láttunk.

Típusos vulkáni-tektonikus rengések nagyon hasonló profilt mutatnak, mint a normál tektonikus rengések, azonban hosszabb időszámban rendezett, akár földrengésraj jellege egészen más képet mutat, mint a típusos tektonikus rengések. Ez a kép ugyan az első pár nap során nem volt evidens, de két hét múltán egyre egyértelműbbé vált. A vulkáni-tektonikus rengések rideg litoszféra törések által kiváltott rengéshullámok terjedésével kapcsolatos, amelyet valószínűleg a mély fluidumok mozgása által generált repedések okoznak. Ahogy vándorol a fluidum, úgy töri el a litoszférát folyamatosan hasonló jellegű és intenzitású rengésekkel, amelyek térbeli eloszlása a fluidum mozgását követi. A fluidum vándorlását két, másik típusú földrengés is jelezheti, amelyek közül a hosszú periódusú szűk frekvencia tartományba tartozó rengések tartozik. Mindkettőt a fluidumok áramlása okozta, amelyek merev kőzetlemezek mentén kialakuló rengésekhez köthetők. Az első rengéstípus elkülönítése komoly helyi tapasztalatot igényel, azonban a földremegés már egyértelműbb, ahogyan azt a legfrissebb szeizmogramok mutatják. A földremegés akár órákig, napokig is tarthat jelezvén, hogy valahol a fluidum áramlás útjában egy viszonylag stabil p-T körülmény alakul ki, hasonlóan egy fedővel zárt edényben forró-lobogó vízzel), ha ezt nem keverjük,

rezonanciába hozhatja az edényt. A szeizmikus felvételek egyre egyértelműbben mutatják, hogy a rengések fluidummigrációval hozhatók kapcsolatba. A kérdés az, hogy a fluidum migrálás-e a földrengés kiváltó oka vagy annak csak következménye. A kérdést megválaszoló a szeizmikus megfigyelésekkel szinte lehetetlen, így további geofizikai módszerekkel érdemes próbálkozni. A vulkáni-tektonikus modell mellett egy teljes geológiai érvrendszer szól. A modellben nagyon fontos tényező az elmúlt évtized tengeraljzat kutatása a régióban, amely a nagyfelbontású tengeraljzat-térképek mellett egyértelmű felvételekkel is igazolta, hogy aktív fluidumfeláramlás látható a Kolumbo tengeralatti vulkán területén, ahol még ún. fekete füstölőket is észleltek (Crutchley et al. 2023; Hector et al. 2024; Katsigera et al. 2024; Kutterolf et al. 2024; Mandalakis et al. 2019; Nomikou et al. 2022; Polymenakou et al. 2023). A szeizmikus szelvények pedig egyértelműen mutatják, hogy ezen a területen egy komplex vulkáni mező található, amelyet a Christiana–Szantorini–Kolumbo vulkáni mező néven emlegetnek (5. ábra) és a Föld egyik legkomplexebb vulkáni-tektonikai régiójának tartanak. Itt kb. 650 ezer év alatt több, mint 100 robbanásos kitörést azonosítottak (Crutchley et al. 2023; Fuller et al. 2018; Heath et al. 2019; Hübscher et al. 2015; Konstantinou 2020; Kutterolf et al. 2021; Nomikou et al. 2013; Nomikou et al. 2012; Nomikou et al. 2019; Nomikou et al. 2018; Nomikou et al. 2016; Nomikou et al. 2013; Preine et al. 2022; Rizzo et al. 2016; Tsampouraki-Kraounaki et al. 2021; Vougioukalakis et al. 2019). Ebben a 60 km hosszú vulkán-tektonikus árokban található a Christina vulkán, a Szantorini kaldera és a víz alatti Kolumbo vulkáni komplexum. A Kolumbo vulkáni felépítménye mellett eddig 24 víz alatti kisebb vulkánt azonosítottak attól ÉK-re (Katsigera et al. 2024). A tengeraljzat térkép egy típusos vulkáni-tektonikus árkot rajzol ki, amelyet normál vetők lezökkenései, és a rift-szegmenseket csatoló komplex tektonikai rendszerek (virágszerkezetek, elhajló törések) jellemeznek (Crutchley et al. 2023; Katsigera et al. 2024). A szeizmikus szelvényeken még közzételések rendszerét is sikerült kimutatni. Ismert, hogy a Szantorini egy hatalmas kaldera. A vulkángeológiai vizsgálatok szerint legalább négy kaldera-cikluson ment át, amelyek közül a legismertebb a 3600 éve történt ún. Minósi kitörés, ami a régió legnagyobb holocén kitörése volt (Druitt and Francaviglia 1992; Druitt et al. 2016; Karátson et al. 2018; Kutterolf et al. 2021). A terület egészét nézve, a vulkanizmus a Christina sziget vidékén már legalább 600 ezer éve elkezdődött (Katsigera et al. 2024). A Kolumbo vulkánról keveset tudunk, bár biztos, hogy több - jelentős robbanásos ciklus - történt az elmúlt egymillió évben. Kolumbo legfiatalabb ismert kitörése 1650 körül lehetett, amikor a hatalmas robbanásos kitörés 260 méter vastagságot is elérő horzsaköves piroklaszt sorozatok eredményezett (Crutchley et al. 2023; Nomikou et al. 2019; Rizzo et al. 2016). A kitörés a tengerfelszín is áttörhette, így a fölé emelkedő felépítményt is létrehozhatott, amit robbanásos események rombolhattak le egy, ma a tenger alatt 500 méter mély krátert (kalderát) hagyva hátra. A Kolumbo vulkán teljes területén, és attól ÉK-re jól kivehető zónákban követhető aktív fluidum feláramlás. Így logikus annak feltételezése, hogy a jelenlegi szeizmikus krízisnek komoly kapcsolata lehet a területre jellemző vulkanizmusnak, azaz fluidum migrálásnak egy különleges szerkezeti zóna mentén. A Kolumbo vulkáni rendszer a legújabb tengeraljzat kutatások során került reflektorfénybe egy

potenciális jövőbeli vulkanizmus helyszínéeként (Katsigera et al. 2024; Preine et al. 2022; Schmid et al. 2022).



5. ábra A Christina-Szantorini-Kolumbo vulkáni mező és az azt körülvevő tengeralfjzat térképe Katrigera és mtsi (2024) alapján. A közölt tengeralfjzat térképre a 2010-12-es és a 2025 január-februári földrengés adatok lettek rávetítve. A térkép ugyancsak mutatja az 1956-os rengések epicentrumát, amelyek a legjelentősebb helyi tektonikus elemeken (rift peremi normál vetők) vagy a hasadérendszer vulkánokkal kitöltött belső részén (hasadék vonal) ülnek. Mind a 2010-2012 és mind a 2025-ös földrengések jellegzetes sekélymélységű földrengésrajokba rendezett eloszlást mutatnak. A típusos jellegzetessége a vulkáni-tektonikus földrengéseknek, amelyek eloszlásában a fluidumok migrálásának - ideértve magma benyomulást és laterális „csapdázódását” - a meglévő szerkezeti elemek mentén) jelentős szerepe lehet.

Hogyan tovább? Mit lehet tenni a krízis kezelésében? Az egyik legfontosabb szempont, hogy ezen a területen szinte bármilyen szeizmikus krízis kialakulása esetén a vulkáni-tektonikus eseményeket kiemelt helyen kell kezelni. Ennek megfelelően a lehetséges vulkáni eseményeket is (mint nagy valószínűséggel bekövetkező folyamatnak) kellene tartani. Szinte minden ilyen krízishelyzetben azonnal „élesíteni” kellene olyan geofizikai módszereket, amelyek az fluidum migrációt képesek detektálni. Ilyenek lehetnek a fluidum mozgás, továbbá süllyedés és emelkedés folyamatának rögzítésére nagy pontossággal. Ezt biztosíthatja mobil geofizikai állomások telepítése, irányított távérzékelési módszerek területre fókuszált alkalmazása (pl., műhold alapú magasságmérések, és az adatok valós idejű analízise). Terepen a vizuális megfigyelés is fontos, amely során talajgáz-mérés, felszínalatti víz hőmérsékletének mérése és kémiai vizsgálata szükséges. A görög kollégák ezen vizsgálatokat jelenleg is végzik, nemzetközi kutatócsoportok folyamatos kapcsolatban vannak velük. Azonban az meglepő, hogy jelenleg még nincs általánosan elfogadott protokoll egy teljes vulkánitektonikus krízis kezelésére. A geológiai adatok azonban azt sejtetik, hogy még tragikus vulkánkitörés esetén is kellett olyan egyértelmű jeleknek lenni, ami például Szantorini lakosságát arra készítette, hogy a szigetet elhagyja a katasztrofális Mínozi kitörés előtt,



ugyanis emberi maradványok a vulkáni üledékekkel befedett Akrotiri vagy más területek alatt eddig nem kerültek elő (Druitt et al. 2019; Evans and McCoy 2020; Martin 2018). Hasonlóan kritikus a helyzet többek között Új-Zélandon is, ahol a Taupo Vulkáni Zónában az elmúlt 350 ezer évben (legalább) 9 jelentős kaldera keletkezett komplex kitörési sorozatok következtében, amelyek közül szinte bármelyik (ha ma történe) Új-Zéland egész Északi Szigetére hatással lenne, ahol a népesség java és ma az ipari tevékenység döntő hányada található (Barker et al. 2021; Cole 1979). Jelenleg az ilyen kitörések felismerésére, effektív észlelési rendszer kidolgozására és az azokhoz igazított krízis kezelésre komoly energiákat fordítanak (Bebbington 2020; Illsley-Kemp et al. 2021; Potter et al. 2015). Ilyen program Görögországban is szükséges. Az azonban tény, hogy egy jelentős kaldera-formáló kitörésnek komoly és elég egyértelmű jelei lehetnek. A Christiana–Szantorini–Kolumbo vulkáni mezőn azonban van egy különleges és nem értett probléma: itt a vulkáni terület jelentős része vízzel fedett, a szárazföld csupán kis szigetek formájában korlátozottan „biztonságos” hely. Tehát bármilyen eszkalálódó krízis kezelése kényes problémákat vet fel a teljes evakuáláson át a lakosság áttelepítésével járó társadalmi feszültségekig. Mivel a régió gazdaságának motorja a turizmus, minden olyan lépés, ami a látogatók számát csökkenti, akár rövid idő alatt is a szigetek komoly gazdasági problémájához vezethet. Vulkanológiai szempontból a katasztrófa kezelésben a víz egyrészt jelentősen növeli a rendszer robbanásos kitörés típusosságát, valamint a vulkáni-szeizmikus események következtében annak valószínűségét, hogy egy esetleges teljes kalderaösszeomlás jelentős a cunami hatást kelthet, ahogy az a földtani szelvényekben világosan látszik (Karstens et al. 2023).

Összefoglalva megállapítható, hogy a Szantorini közelében zajló szeizmikus események igen valószínű, hogy vulkán-tektonikus folyamatokkal hozhatók kapcsolatba, amit a terület geológiai története és tektonikai helyzete is sejtet. Az, hogy kőzet olvadék (magma) mozgását láthatjuk vagy inkább valami fluidum migráció áll a háttérben, jelenleg nem eldönthető kérdés, ahogy az sem, hogy várható-e esetleges vulkanizmus (felszíni, vagy tenger alatti) a közeljövőben. A megfigyelések eredményeit folyamatosan kell kiértékelni, valamint újabb mobil megfigyelőállomásokot kell telepíteni, az adatokat valós időben kiértékelve követni. Az ilyen vulkán-tektonikus területeken vulkánkitöréseket több jelenség együttes megjelenése jelezheti előre, ami jelenleg nem azonosítható a jelen tudásunk alapján. Az viszont nem mellőzhető, hogy egy ilyen eseménytörténet bekövetkezése is elképzelhető. A legfontosabb, amit a görög hatóságok eddig kitűnően kezelnek, hogy egy ilyen helyzetre is fel kell készíteni a lakosságot, még akkor is, ha az akár teljes evakuálással jár, és a végén mégsem következik be olyan intenzitású esemény, amit esetleg a közvélemény arányosnak tartana. Vulkáni szigetekeken hasonló krízis kezelésre van példa, mint a 2000-es években kezdődött kalderaformáló kitörés a Tokiói-öböl bejáratánál található Miyakejima szigeten (Japán), ahol a szigetlakókat (kb. 3000 ember) több, mint 5 évre kitelepítették (Kochi et al. 2017). De hasonló eseményre sor került a Vanuatuhoz tartozó Ambae szigetén is (Clissold et al. 2021; Pfalzgraf 2021), ahol több mint 10000 embert érintett egy hasonló krízis (<https://www.npr.org/sections/thetwo-way/2017/09/28/554175936/volcano-threat-at-pacific-island-triggers-mass-evacuation>). Fontos kiemelni azonban, hogy ezek az említett helyek más vulkánitektonikai, mi több magmás-vulkáni rendszerekkel kapcsolatosak, mint amilyeneket a Christiana–Szantorini–Kolumbo vulkán mezőn láthatunk, de ettől függetlenül a kríziskezelés társadalmi problémája hasonló kérdéseket vet fel (Avery 2003; Niroa and Nakamura 2022; Rodríguez-Pérez et al. 2024). Fontos megemlíteni továbbá, hogy turizmusra nem ez a legideálisabb időszak Szantorini szigetén. A helyzetet követve érdemes kívánni, és figyelembe venni, hogy egy Szantorinire történő látogatás egyúttal egy aktív vulkáni rendszerbe tett látogatást is jelent, annak minden lehetséges következményével együtt.

## References

- Avery JG (2003) The aftermath of a disaster: Recovery following the volcanic eruptions in Montserrat, West Indies. *West Indian Medical Journal* 52(2):131-135
- Barker SJ, Wilson CJN, Illsley-Kemp F, Leonard GS, Mestel ERH, Mauriohooho K, Charlier BLA (2021) Taupō: an overview of New Zealand's youngest supervolcano. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 64(2-3):320-346
- Bebbington MS (2020) Temporal-volume probabilistic hazard model for a supervolcano: Taupo, New Zealand. *Earth and Planetary Science Letters* 536
- Clissold R, McNamara KE, Westoby R, Daniel L, Raynes E, Licht Obed V (2021) "I thought I lost my home": resource loss, distress and recovery after the Manaro Voui volcanic disaster on Ambae Island. *Disaster Prevention and Management: An International Journal* 30(4-5):432-446
- Cole JW (1979) Structure, petrology, and genesis of cenozoic volcanism, taupo volcanic zone, new zealand—a review. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 22(6):631-657
- Crutchley GJ, Karstens J, Preine J, Hübscher C, Fossen H, Kühn M (2023) Extensional Faulting Around Kolumbo Volcano, Aegean Sea—Relationships Between Local Stress Fields, Fault Relay Ramps, and Volcanism. *Tectonics* 42(10)
- Druitt TH, Francaviglia V (1992) Caldera formation on Santorini and the physiography of the islands in the late Bronze Age. *Bulletin of Volcanology* 54(6):484-493
- Druitt TH, McCoy FW, Vougioukalakis GE (2019) The late bronze age eruption of Santorini volcano and its impact on the ancient Mediterranean world. *Elements* 15(3):185-190
- Druitt TH, Mercier M, Florentin L, Deloule E, Cluzel N, Flaherty T, Médard E, Cadoux A (2016) Magma storage and extraction associated with plinian and interplinian activity at Santorini Caldera (Greece). *Journal of Petrology* 57(3):461-494
- Evans KJ, McCoy FW (2020) Precursory eruptive activity and implied cultural responses to the Late Bronze Age (LBA) eruption of Thera (Santorini, Greece). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 397
- Fuller S, Carey S, Nomikou P (2018) Distribution of fine-grained tephra from the 1650 CE submarine eruption of Kolumbo volcano, Greece. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 352:10-25
- Heath BA, Hooft EEE, Toomey DR, Papazachos CB, Nomikou P, Paulatto M, Morgan JV, Warner MR (2019) Tectonism and Its Relation to Magmatism Around Santorini Volcano From Upper Crustal P Wave Velocity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 124(10):10610-10629
- Hector S, Patten CGC, Beranoaguirre A, Lanari P, Kiliyas S, Nomikou P, Peillod A, Eiche E, Kolb J (2024) Magmatic evolution of the Kolumbo submarine volcano and its implication to seafloor massive sulfide formation. *Mineralium Deposita* 59(6):1229-1248
- Hübscher C, Ruhnau M, Nomikou P (2015) Volcano-tectonic evolution of the polygenetic Kolumbo submarine volcano/Santorini (Aegean Sea). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 291:101-111
- Illsley-Kemp F, Barker SJ, Wilson CJN, Chamberlain CJ, Hreinsdóttir S, Ellis S, Hamling IJ, Savage MK, Mestel ERH, Wadsworth FB (2021) Volcanic Unrest at Taupō Volcano in 2019: Causes, Mechanisms and Implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 22(6)
- Karátson D, Gertisser R, Telbisz T, Vereb V, Quidelleur X, Druitt T, Nomikou P, Kósik S (2018) Towards reconstruction of the lost Late Bronze Age intra-caldera island of Santorini, Greece. *Scientific Reports* 8(1)
- Karstens J, Crutchley GJ, Hansteen TH, Preine J, Carey S, Elger J, Kühn M, Nomikou P, Schmid F, Dalla Valle G, Kelfoun K, Berndt C (2023) Cascading events during the 1650 tsunamigenic eruption of Kolumbo volcano. *Nature Communications* 14(1)
- Katsigera A, Nomikou P, Pavlopoulos K (2024) A Preliminary Hazard Assessment of Kolumbo Volcano (Santorini, Greece). *GeoHazards* 5(3):816-832

- Kochi T, Iwasawa S, Nakano M, Tsuboi T, Tanaka S, Kitamura H, Wilson DJ, Takebayashi T, Omae K (2017) Influence of sulfur dioxide on the respiratory system of Miyakejima adult residents 6 years after returning to the island. *Journal of Occupational Health* 59(4):313-326
- Konstantinou KI (2020) Magma chamber evolution during the 1650 AD Kolumbo eruption provides clues about past and future volcanic activity. *Scientific Reports* 10(1)
- Kutterolf S, Druitt TH, Ronge TA, Beethe S, Bernard A, Berthod C, Chen H, Chiyonobu S, Clark A, DeBari S, Fernandez Perez TI, Gertisser R, Hübscher C, Johnston RM, Jones C, Joshi KB, Kletetschka G, Koukousioura O, Li X, Manga M, McCanta M, McIntosh I, Morris A, Nomikou P, Pank K, Peccia A, Polymenakou PN, Preine J, Tominaga M, Woodhouse A, Yamamoto Y (2024) Expedition 398 methods. *International Ocean Discovery Program: Preliminary Reports* 398
- Kutterolf S, Freundt A, Hansteen TH, Dettbarn R, Hampel F, Sievers C, Wittig C, Allen SR, Druitt TH, McPhie J, Nomikou P, Pank K, Schindlbeck-Belo JC, Wang KL, Lee HY, Friedrichs B (2021) The Medial Offshore Record of Explosive Volcanism Along the Central to Eastern Aegean Volcanic Arc: 1. Tephrostratigraphic Correlations. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 22(12)
- Mandalakis M, Gavriilidou A, Polymenakou PN, Christakis CA, Nomikou P, Medvecký M, Kiliass SP, Kentouri M, Kotoulas G, Magoulas A (2019) Microbial strains isolated from CO<sub>2</sub>-venting Kolumbo submarine volcano show enhanced co-tolerance to acidity and antibiotics. *Marine Environmental Research* 144:102-110
- Martin S (2018) Abandoning Akrotiri (Thera): A comparative model approach to relocation strategies after volcanic eruptions. In: *Cycladic Archaeology and Research: New Approaches and Discoveries*. pp 27-41
- Niroa JJ, Nakamura N (2022) Volcanic disaster risk reduction in indigenous communities on Tanna Island, Vanuatu. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 74
- Nomikou P, Carey S, Bell KLC, Papanikolaou D, Bejelou K, Alexandri M, Cantner K, Martin JF (2013) Morphological analysis and related volcanic features of the Kolumbo submarine volcanic chain (NE of Santorini Island, Aegean Volcanic Arc). *Zeitschrift für Geomorphologie* 57:29-47
- Nomikou P, Carey S, Papanikolaou D, Croff Bell K, Sakellariou D, Alexandri M, Bejelou K (2012) Submarine volcanoes of the Kolumbo volcanic zone NE of Santorini Caldera, Greece. *Global and Planetary Change* 90-91:135-151
- Nomikou P, Hübscher C, Carey S (2019) The Christiana–Santorini–Kolumbo volcanic field. *Elements* 15(3):171-176
- Nomikou P, Hübscher C, Papanikolaou D, Farangitakis GP, Ruhnau M, Lampridou D (2018) Expanding extension, subsidence and lateral segmentation within the Santorini - Amorgos basins during Quaternary: Implications for the 1956 Amorgos events, central - south Aegean Sea, Greece. *Tectonophysics* 722:138-153
- Nomikou P, Hübscher C, Ruhnau M, Bejelou K (2016) Tectono-stratigraphic evolution through successive extensional events of the Anydros Basin, hosting Kolumbo volcanic field at the Aegean Sea, Greece. *Tectonophysics* 671:202-217
- Nomikou P, Papanikolaou D, Alexandri M, Sakellariou D, Rousakis G (2013) Submarine volcanoes along the aegean volcanic arc. *Tectonophysics* 597-598:123-146
- Nomikou P, Polymenakou PN, Rizzo AL, Petersen S, Hannington M, Kiliass SP, Papanikolaou D, Escartin J, Karantzaos K, Mertzimekis TJ, Antoniou V, Krokos M, Grammatikopoulos L, Italiano F, Caruso CG, Lazzaro G, Longo M, Sciré Scappuzzo S, D'Alessandro W, Grassa F, Bejelou K, Lampridou D, Katsigera A, Dura A (2022) SANTORY: SANTORini's Seafloor Volcanic ObservatorY. *Frontiers in Marine Science* 9
- Pfalzgraf FC (2021) Maintaining land and life in Vanuatu: Indigenous alter-natives of recovery following the Manaro eruption on Ambae, Vanuatu. *Journal of Environmental Media* 2:5.1-5.13
- Polymenakou PN, Nomikou P, Hannington M, Petersen S, Kiliass SP, Anastasiou TI, Papadimitriou V, Zaka E, Kristoffersen JB, Lampridou D, Wind S, Heinath V, Lange S,

- Magoulas A (2023) Taxonomic diversity of microbial communities in sub-seafloor hydrothermal sediments of the active Santorini-Kolumbo volcanic field. *Frontiers in Microbiology* 14
- Potter SH, Scott BJ, Jolly GE, Johnston DM, Neall VE (2015) A catalogue of caldera unrest at Taupo Volcanic Centre, New Zealand, using the Volcanic Unrest Index (VUI). *Bulletin of Volcanology* 77(9)
- Preine J, Karstens J, Hübscher C, Nomikou P, Schmid F, Crutchley GJ, Druitt TH, Papanikolaou D (2022) Spatio-temporal evolution of the Christiana-Santorini-Kolumbo volcanic field, Aegean Sea. *Geology* 50(1):96-100
- Rizzo AL, Caracausi A, Chavagnac V, Nomikou P, Polymenakou PN, Mandalakis M, Kotoulas G, Magoulas A, Castillo A, Lampridou D (2016) Kolumbo submarine volcano (Greece): An active window into the Aegean subduction system. *Scientific Reports* 6
- Rodríguez-Pérez MC, Ferrer MEF, Boada LD, Pérez ADA, Aguilar MCD, Jerónimo JFF, Talavera IG, Gangotena LV, de la Torre AH, Simbaña-Rivera K, de León AC (2024) Health impact of the Tajogaite volcano eruption in La Palma population (ISVOLCAN study): rationale, design, and preliminary results from the first 1002 participants. *Environmental Health: A Global Access Science Source* 23(1)
- Schmid F, Petersen G, Hooft E, Paulatto M, Chrapkiewicz K, Hensch M, Dahm T (2022) Heralds of Future Volcanism: Swarms of Microseismicity Beneath the Submarine Kolumbo Volcano Indicate Opening of Near-Vertical Fractures Exploited by Ascending Melts. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 23(7)
- Tsampouraki-Kraounaki K, Sakellariou D, Rousakis G, Morfis I, Panagiotopoulos I, Livanos I, Manta K, Paraschos F, Papatheodorou G (2021) The santorini-amorgos shear zone: Evidence for dextral transtension in the south aegean back-arc region, greece. *Geosciences (Switzerland)* 11(5)
- Vougioukalakis GE, Satow CG, Druitt TH (2019) Volcanism of the South Aegean volcanic arc. *Elements* 15(3):159-164
- Zobin VM (2025) Chapter 2 - Seismicity at Volcanoes. In: Zobin VM (ed) *Volcanic Seismology* (Fourth Edition). Elsevier, pp 11-34