

Tanulmányok

SZANTORINI A KÉSŐ BRONZKORBAN – A „MINÓSZI” KITÖRÉS AZ ÚJABB VULKANOLÓGIAI ÉS ŐSFÖLDRAJZI KUTATÁS TÜKRÉBEN

SANTORINI IN THE LATE BRONZE AGE – THE MINOAN ERUPTION IN THE LIGHT OF RECENT VOLCANOLOGICAL AND PALAEOGEOGRAPHICAL RESEARCH

Karátson Dávid

az MTA doktora, Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Természetföldrajzi Tanszék
dkarat@ludens.elte.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Az égei-tengeri Szantorini (Théra) vulkán-szigete – belsejében látványos kalderaöböllel – évszázadok óta a nemzetközi kutatások homlokterében áll, hiszen a vulkanológia itt összeér a régészettel, a történelemmel. A késő bronzkorban a sziget belsejét a maihoz hasonló, de kisebb kalderaöböl foglalta el, amely egy 22 ezer évvel ezelőtti nagy kitörés (Cape Riva) nyomán képződött. Az öbölben egy, a mai kalderabelseji Kameni-szigetekhez hasonló belső sziget is helyet foglalt („Pre-Kameni”). Ez a sziget – és Szantorini jelentős része – a 3600 éve történt hatalmas, robbanásos, ún. minószi kitörés során megsemmisült. A belső sziget szó szerint felrobbant, de darabjai, törmelékanyaga a minószi tufarétegekben szétszórva megtalálhatók. Tanulmányomban – áttekintve a régészeti, történelmi vonatkozásokat is – a késő bronzkori belső sziget méretének és korának rekonstrukcióját mutatom be, amelyet nemzetközi kutatógárdával végeztünk. Munkánk során fotóstatistikai módszerrel, szemcseelemzéssel, geokémiai analízissel és nagy pontosságú Cassinol–Gillot–K–Ar-kormeghatározással kimutattuk, hogy a Pre-Kameni-sziget térfogata 2,2–2,5 km³ lehetett, a sziget jellegzetes anyagát adó fekete, üveges andezit kora pedig húszezer év, tehát Pre-Kameni közvetlenül a Cape Riva kitörés után indult növekedésnek. A kor egyúttal átlagos, hosszú távú „szigetépítő” kitörési ráta számítását is lehetővé teszi (0,13–0,14 km³/ezer év); a belső sziget vulkáni aktivitása azonban már lecsendesedhetett a késő bronzkori minószi kultúra felvirágzásának idejére.

ABSTRACT

The volcanic island of Santorini (Thera), which is located in the Aegean Sea and hosts a spectacular caldera bay, has been the focus of international research efforts for centuries, because the area represents one of Earth's unique places where volcanology meets archeology and history. In the Late

Bronze Age, the internal part of the island was already occupied by a caldera bay formed during the Cape Riva eruption 22,000 years ago; it was similar to but smaller than the present-day harbour. Within the caldera bay, there was a central island to be called 'Pre-Kameni' after the current Kameni Islands. 3600 years ago Pre-Kameni – along with other parts of Santorini – was destroyed during the gigantic, explosive 'Minoan' eruption. The central island exploded and was lost but its scattered fragments can be recovered from the Minoan tuffs. In the present study, which briefly considers the main archeological and historical implications as well, the dimensions and age of the Late Bronze Age central island are constrained as a result of an international joint research. Applying a photo-statistical, granulometrical and geochemical analysis and high-precision radiometric dating it was found that Pre-Kameni had a 2.2-2.5 km³ volume, and its characteristic, black glassy andesite, using Cassinot-Gillot K-Ar dating, yielded an age of 20,000 years. Such an age implies that the island had started to grow subsequent to the Cape Riva eruption, which makes it possible to calculate a long-term eruptive rate of 0.13-0.14 km³/kiloyears for Pre-Kameni. However, the island probably was already dormant when the Minoan civilisation spread over Santorini in the Late Bronze Age.

Kulcsszavak: Szantorini, vulkanológia, geomorfológia, ösföldrajz, fotóstatistika, digitális domborzatmodell (DEM), késő bronzkor, minószi kultúra, kaldera, cunami

Keywords: Santorini, volcanology, geomorphology, palaeogeography, photostatistics, digital elevation model (DEM), Late Bronze Age, Minoan civilization, caldera, tsunami

Az égei-tengeri Szantorini – a Kükládok legdélebbi tagja – a világ talán leghíresebb vulkán-szigete (*1.a, b ábra*). Már a neve is megkapó, hiszen Szent Irént jelent, amit velencei kalmárok adtak neki a XIII. században. Korábban Strongylének vagy Stroggilinek (Hérodotosz leírásában; jelentése „a kerek”), később a főszigetről – egy föníciai hős nyomán – Therának vagy Thírának hívták. Görögül ma Szantorini és Thíra egyaránt használatos.

A lenyűgöző tájképi szépségű sziget valójában szigetcsoport. A kerekded, belül „lyukas” – tengeröblöt körülölelő –, kifli alakú fősziget (Thíra), két másik kisebb sziget (Thiraszia és a piciny Aszproniszi), valamint ezek gyűrűjén belül a friss lávaáráktól feketéllő, utoljára 1950-ben működött piciny Kameni-szigetek alkotják. Az ívelt fősziget hossza mintegy 23 kilométer, az öböl átmérője tíz; központjában Palea és Nea Kameni pedig mindössze egy-két kilométerre van a parttól.

Szantorini körív mentén elhelyezkedő szigetei úgynevezett *kalderát* formálnak; ez a kifejezés vulkánkitörés során beszakadással keletkező, üst alakú mélyedést jelent. Mint a befelé néző, meredeken leszakadó sziklafalak rétegtani felépítéséből kiolvasható (lásd később), a tűzhányótevékenység ciklusos volt, és kaldera – hatalmas robbanásokkal kísérve – többször is képződött. Utóbbi felfogás az 1980-as években nyert bizonyosságot (Heiken–McCoy, 1984), megcáfolva azt a közkeletű, egyes régészek által ma is hangoztatott nézetet, miszerint a fősziget kifli alakja a bronzkorban, egyetlen nagy vulkán-sziget beszakadásával jött volna létre, ami pusztító cunamit, szökőárat kiváltva a krétai civilizáció pusztulását okozta.



1a ábra. Szantorini légifelvételen északkelet felől

Fotó: Tom Pfeiffer,
www.volcanodiscovery.com/santorini_i49059.



1b ábra. Szantorini űrfelvétele (észak jobb kéz felé)

Fotó: NASA Earth Observatory,
<https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=88926> (ISS048-E-72284 w)

ATLANTISZ – SZANTORINI?

E nézet elterjedéséhez részben Platón leírása szolgáltatta az alapot, aki *Timaiosz* című művében és más helyeken is említi a régi időkben elsüllyedt „Atlantiszt” (a név Atlasz istentől ered). Ez úgymond két királyságból, a nagyobbik Mizonból és a kis Elaszonból állt, melyeknek kegyetlen uralmát az istenek megelégték, és a szigetet óriási földrengésekkel egyetlen nap és éjszaka alatt a tengerbe süllyesztették.

A történészeknek, régészeknek a 20. század közepén ötlött fel a párhuzam a két legendás királyság, illetve Kréta és a tőle 70 kilométerre fekvő Szantorini között, akkor, amikor napvilágra kerültek Szantorini bronzkori nyomai. Ennek előzményeként, még a 19. század vége felé – amikor a szigeten a Szezi-csatorna Társaság (Port Szaíd építéséhez) megkezdte a horzsakő intenzív fejtését – Akrotiri falu közelében a munkások különös tárgyakra bukkantak. Hamar kiderült, hogy itt – a szigeten másutt előforduló ókori leletektől eltérően – késő bronzkori maradványokról van szó. Szpiridon Marinatosz görög régészprofesszor, aki széles látókörű tudósként sokat olvasott az indonéziai Krakatau 1883-as katasztrófájáról és az azt követő, tízezrek életét követelő cunamiról, már az 1930-as években megfogalmazta elméletét (Marinatos, 1939), miszerint a késő bronzkori minózi civilizáció pusztulását a szantorini vulkánkitörés és egy hozzá társuló szökőár okozta. 1967-ben a szigeten komolyabb ásatásokat kezdett, és fokról fokra feltárult a mintegy előre megsejtett, fantasztikus bronzkori település, mely maga is az Akrotiri nevet kapta. Hogy ez valóban egyértelműen a Kréta szigetén virágzott minózi kultúrkörbe tartozott, azt a (máig megfejtetlen) „lineáris A” írás jelenléte,

illetve az előkerült tárgyak és a gyönyörű, színes, életszerű freskók egyező stílusa igazolta. A vulkánkitörést ettől fogva a tudomány csak „minószí” kitörésként tartja számon (Bond–Sparks, 1976; Druitt et al., 1999).

A néhány évtized alatt méltán világhíressé lett bronzkori várost mint látogatóhelyet 2005-ben bezárták, s többéves felújítás, további feltáró munka, bővítés után 2012 óta tekinthető meg ismét (igaz, fele még mindig a föld alatt lehet). A bensőséges hangulatú város romjai viszonylag épek. Gyakran többemeletes, jól megépített házaí szervezett, tagolt, híresebb „testvérehez”, Pompeihez képest szűkebb települést tárnak fel. A pompeivel ugyanakkor vetekedő falfestményei tehetős, művelt lakosságról és színes mindennapokról árulkodnak, nem ritkán luxuscikkek ábrázolásával (fajansz, féldrágakövek, szárított osztriga). A világ számos múzeumában megjelenített, fantasztikus minószí kultúra akrotiri emlékei közül az imahelyiségekben talált, páratlan művészi értékű, egyben igen információgazdag freskókat, a nagy számban megőrződött színes kerámiát, tárolóedényt emelem ki, valamint a város hideg- és melegvíz-vezetékét, ezen belül a szennyvízelvezetést (a történelmi idők legrégebbi vízöblítései illemhelyeivel).

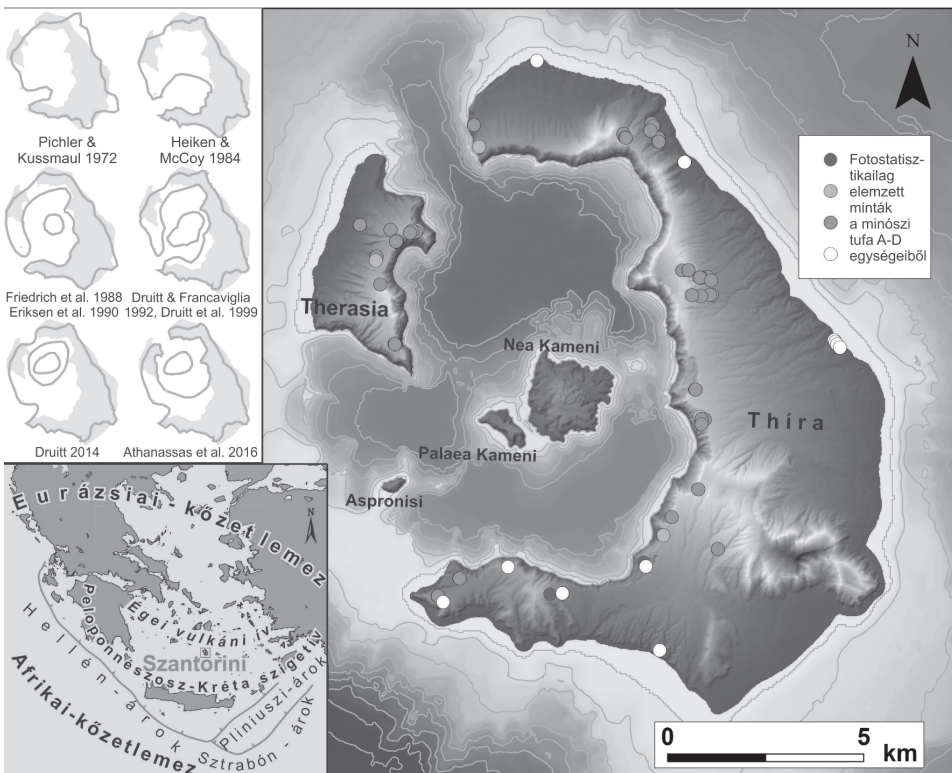
Nem kétséges, hogy Akrotiri valóban a kitörés során pusztult el, hiszen az épületeket több méter vastag „minószí” tufaanyag alól kellett napvilágra hozni. Igaz, hozzáteendő, hogy sem a város környékén, sem Szantorinin máshol egyetlen tetemet, holttestet sem találtak, ami vagy azzal magyarázható, hogy egytől-egyig minden lakos el tudott menekülni – fejlett hajósnépről lévén szó, és mert a kitörésnek voltak előjelei, ez elképzelhető –, vagy vannak tetemek, csak még nem kerültek elő. (Talán a szigetet akár 40–60 méter vastagon befedő tufatörmelék alatt nyugszanak?)

Másfelől az egyre gyűlő radiokarbon kormeghatározások alapján a települést maga alá temető kitörés Kr. e. 1630-1600 körül történt (a dátumot legegységesebben egy, a minószí tufában szerencsésen megtalált olajfatorzsön nyert koradatot bizonyította (Friedrich et al., 2006); azaz legalább másfél évszázaddal korábban, mint Kréta hanyatlása! Kréta nagy részén ráadásul nem sikerült kimutatni a cunami jellegzetes üledékrétegeit (vulkáni hamu, kagylódarabok, cseréptöredékek elegye), egyedül északkeleten, Palaikaszontrón találtak olyan maradványokat, amelyek alapján ott 9 méter magas áradat lehetett. Így a vulkanológia mai álláspontja az, hogy bár Marinatosznak a kitörés tényét, nagyságát, sőt a cunamit illetően is igaza volt, a minószí kitörés közvetlenül nem tehető felelőssé a magasan, biztonságos helyen települt krétai civilizáció elpusztulásáért. Noha a cunami, valamint Szantorini mint fontos hajózási, kereskedelmi központ megsemmisülése hozzájárulhatott a minószí civilizáció gazdasági meggyengítéséhez, hanyatlását elsősorban történelmi okok: belvillongások, a műkénéi görögök térhódítása (Rehak–Younger, 2001), sőt talán az éghajlat romlása is okozhatta (Tsonis et al., 2010). A minószíak Kr. e. 1200 körül végleg beolvadtak a Krétát elfoglaló görögökbe.

FÉLMILLIÓ ÉVES TŰZHÁNYÓ-TEVÉKENYSÉG

Ha az ember behajózik a vulkán-sziget „kiflijének” belsejébe, a nagy utasszállítókat is fogadó kikötőbe, Athinioszba, a part meredek szikláit zöldesen csillogó, a földtörténeti óidőben keletkezett palás kőzeteket tárnak fel, melyek a sziget alapzatát, magját alkotják. Ezek csak a minószi kalderabeszakadéskor kerültek napvilágra, amikor e helyen csonkig vagy inkább „lábig” beszakadtak a rájuk települt vulkáni rétegek. A sziget idős kőzetei (palák és mészkövek) alkotják a legnagyobb kiemelkedést, az 567 méter magas, ma katonai objektummal védett, Illés prófétáról elnevezett Profitisz Iliasz hegyet is.

E jóval a tűzhányótevékenység előtt keletkezett kőzetek az Égei-tenger kontinentális földkérgéhez tartoznak, ezek építik fel Szantorini idős részein kívül a Kükládok más mészkőszigetét is (2. ábra). Szantorini vonalától délre viszont már nehezebb óceáni kéreg (illetve kőzetlemez) foglal helyet, amely a kisebb sűrűségű



2. ábra. Szantorini lemeztektonikai helyzete (balra lent), mai domborzata a mintavételi helyekkel (lásd a szövegben, jobbra) és a késő bronzkori ösföldrajz korábbi rekonstrukciókon (halvány színnel a sziget mai kiterjedése, balra fent) (Karátson et al., 2018 alapján)

égei lemez alá, északi irányba tolódik. Ez a folyamat – a szubdukció – a mélyben magmaképződéshez és mészkáli jellegű vulkánossághoz vezet. A lemezütközés és a tűzhányótevékenység évtízmilliók óta tart, ma nagyjából nyugat–keleti irányban húzódik Milosztól Szantorinin át Kosz és Niszirosz szigetéig.

Szantorini vulkántörténete mintegy 600 ezer évre nyúlik vissza. Először a sziget déli, majd északi részén jöttek létre kisebb, főleg lávaöntő vulkáni kúpok. A déli részen ezután kisebb salakkúpok működtek, közülük a legszebb – éppen Akrotiri közelében – a turistalátványosságként is ismert Mavrorachidi, amelyet a tengerpart felőli erózió mára látványosan félbevágott.

360 ezer évvel ezelőtt nagyszabású robbanásos működés vette kezdetét. Napjainkig akár ezerszer is működhetett a szigetvulkán, de ebből csak mintegy száz réteg maradt meg. Mi több, a jelentékenyebb kitörések száma csak tucatnyi, ezeknek az egész szigeten akár több méter vastagságban megőrződött a tufarétege. Közülük is kiemelkedik két hatalmas robbanássorozat, amely a vulkanológiai kutatások szerint egy-egy vulkáni ciklus záróakkordjaként fogható fel (Druitt et al., 1999). Ezek irdatlan erejű, ún. pliniuszi robbanásos kitörések voltak, riolitos-riodácitos összetételű magmából, és mindkettő fehér, távolról is szembeötlő, vastag horzsaköves tufasorozattal képviselteti magát a fősziget említett, befelé néző sziklafalában (3. ábra). E rétegek nagyban segítették a vulkánosság menetének tagolását: a sziget első pontos rétegtanát felállító német Hans Reck az 1930-as években a két szintet „alsó” és „felső” horzsakőegységként („Untere” és „Obere Bimmstein”) különítette el. (Ezeket napjainkra az angol „Lower” és „Upper Pumice” váltotta.) Az újabb kormeghatározások alapján az idősebbik robbanássorozat 170-180 ezer éves, a fiatalabbik pedig a bevezetőben említett minószi kitörés volt Kr. e. 1600 körül.

Az alsó horzsakő kitörése is hatalmas volt, de a minószi kitörés méretei szinte elképzelhetetlenek. Az eredeti magma térfogatát akár hatvan köbkilométerre teszik – ez a Vezúv pompeii kitörésének tíz-tizenöt-szöröse –, s ennek duplája lehet a magma felhabzása után kirobbant, tufaként lerakódott, a szigeten és a környező tengerben megőrződött (nem pontosan ismert vastagságú) törmelék-tömeg (Johnston et al., 2014). Ilyen hatalmas mennyiségű magma távozásakor természetes, és mind az alsó, mind a felső horzsakő kitörése kapcsán – mint a bevezetőben említettem – bizonyosságot is nyert, hogy a robbanást kalderabeszakadás: az éppen meglévő sziget belső részének eltűnése követte. Ráadásul a két fő kitörés között eltelt időben is legalább még két kalderaképző kitörés rekonstruálható. Utóbbiak közül a második, a minószi megelőző ún. Cape Riva-kitörés 22 ezer éve történt.

Az újabb és újabb kalderaképződések ugyanakkor nem egyformán roncsolták a meglévő sziget morfológiáját. A Cape Riva-kitörés során kialakult, a bronzkorban változatlan formában meglévő kalderaöböl például a mai északi részén lehetett. Erre a szomszédos partokon, Thírán és Thiraszián a minószi tufában



3. ábra. Szantorini belső, meredek sziklafalai jól megőrizték az elmúlt bő 300 ezer év vulkánkitöréseit. A láva- vagy robbanásos kitörések anyaga néha helyileg, máshol az egész szigeten jól követhető rétegeket alkot. A két legnagyobb robbanás a 170-180 ezer éves alsó horzsakövet és a késő bronzkori, 3600 éves felső horzsakövet – ismertebb nevén minószi tufát – hozta létre. Kilátás Athiniosz kikötőjéből; balra fent Fira város házai fehérlelenek.

(A szerző felvétele)

előforduló sztromatolitok (cianobaktériumok által létrehozott, rétegzett üledékes szerkezetek) utalnak, bennük puhatestű, osztrakoda-, foraminifera- stb. vázmaradványokkal (Friedrich et al., 1988), melyek meleg, sekély egykori tengerből jelenlétét bizonyítják.

A két hatalmas pliniuszi aktivitás közötti időszakban bár kevésbé nagyszabású, de igen változatos, a vulkanológiai „iskolapéldákat” szinte hiánytalanul megjelenítő kitörések zajlottak (sztromboli, vulcanói, víz-magma kölcsönhatást mutató freatomagmás kitörések stb.). Mivel a nagyobb kitörések anyaga rendre befedte a korábbiakat, a legutolsó, minószi kitörés termékei a szigeten ma is mindenütt megtalálhatók, és remek kőzetfeltárásokat kínálnak tanulmányozásra. Az idősebb tufarétegek viszont inkább csak a kalderaperem rétegsorában figyelhetők meg. Ezek teszik oly látványossá, színes „csíkossá” a tengerbe szakadó sziklafalakat.

A MINÓSZI KITÖRÉS

Ha a minószi tufa rétegeit pontosabban megismerjük, egyszersmind a késő bronzkori ősföldrajzi viszonyok rekonstruálásához is eljuthatunk. 2010 óta görög, német, angol, francia és magyar kollégákkal – gyakorlatilag mind más-más szakterületről – ebben az irányban kezdtem tevékenykedni, és a nemzetközi kutatómunka mára új eredményeket hozott (Karátson et al., 2018). A következőkben ennek néhány részletére is kitérek.

A partközeli tufabányákban vizsgálódva szembeötlő, hogy a minószi kitörés szoros egymásutánban többféle anyagot rakott le (Bond–Sparks, 1976; Druitt et al., 1999). A vulkán feléledését először kisebb hamuszórás jelezte akár egy-két héten át, majd a fő kitörési szakaszt, amely néhány napon át tarthatott, kisebb robbanások indították. (Egyesek szerint ezek sarkallták a lakosságot az elmenekülésre.) Ezután hatalmas, a sztratoszférába emelkedő kitörési oszlop tört a magasba, melyből viszonylag monoton horzsakőszórás nyomán 3–5 méternyi, konstans vastagságú réteg (A egység) rakódott le. Ez látványos, jól követhető szintet képvisel a kalderaperem falában. A mainál kisebb és sekélyebb késő bronzkori öblöt a rengeteg hamu, horzsakő csakhamar fel is töltötte (Nomikou et al., 2016). Nem sokkal később hirtelen megváltozott a kitörés jellege, mert tengervíz keveredhetett a magmához, aminek következtében heves, örvényő gázáramlások, ún. piroklaszt-torlóárak zúdultak le, és ezekből rétegzett vagy keresztarétegzett, finomabb szemű tufa (B egység) rakódott le. (A finom szemcseméret a magma-víz kölcsönhatás eredménye, ami szétszakítja, „szétporlasztja” a magmát.) Ezt követően a még mindig fennálló kitörési oszlop részben vagy egészben már nem bírta fenntartani saját súlyát, és összeomlott. Ennek következtében horzsakőben, hamuban gazdag, tömeges (még mindig vízhatást tükröző, legfeljebb 300 °C hőmérsékletű) piroklaszt-árak zúdultak le, amelyek üledékét ignimbritnek nevezzük. Eme C egység vastagsága Szantorini egyes helyein akár az 50-60 m-t is eléri; a környező tengerbe is jutott belőle, de már vékonyabb rétegek formájában.

A C egység világos anyaga a fő tömeget adó, friss magmából származó hamu és horzsakő mellett sötét színű törmeléket: mm-estől deciméteresen át akár több méter átmérőjű fekete kőzetblokkokat is tartalmaz (4. ábra). A fekete szemcsék jelenléte a fehér tufabányák anyagának képi hasonlaltal élve „mákostészta” kinézetet kölcsönöz, annál is inkább, mert akár a mákszemek a tésztaiban, a szemcsék is egyenletesen oszlanak el a tufában. E törmelékanyagot a kürtő(k)ből feláramló magma ragadta magával akkor, amikor Szantorini belső része folyamatosan rombolódott, mígnem az utolsó szakaszban – hatalmas robbanások kíséretében – az egész szigetbelső beszakadt, és kialakult a mai kaldera (Druitt, 2014). Paraskevi Nomikou és szerzőtársai (2016) újabb vizsgálatai szerint a létrejövő mélyedés északnyugat felől vízözönszerű tengerbeáramlással töltődött fel, ami a fenéken kanyonszerű csatornát váj ki.



4. ábra. Szantorini belső részének, ezen belül az egykori kalderaöbölben található „Pre-Kameni” szigetnek az anyaga főként a minószi vulkánkitörés harmadik szakaszában került a tufába. A világos tufaanyagban található sötét szemcsék aránya alapos fotostatisztikai és közettani elemzés után következtetni enged az eredeti belső sziget méretére. A fotó bal alsó sarkában geológuskalapács jelzi a méretarányt (bekarikázva). (A szerző felvétele)

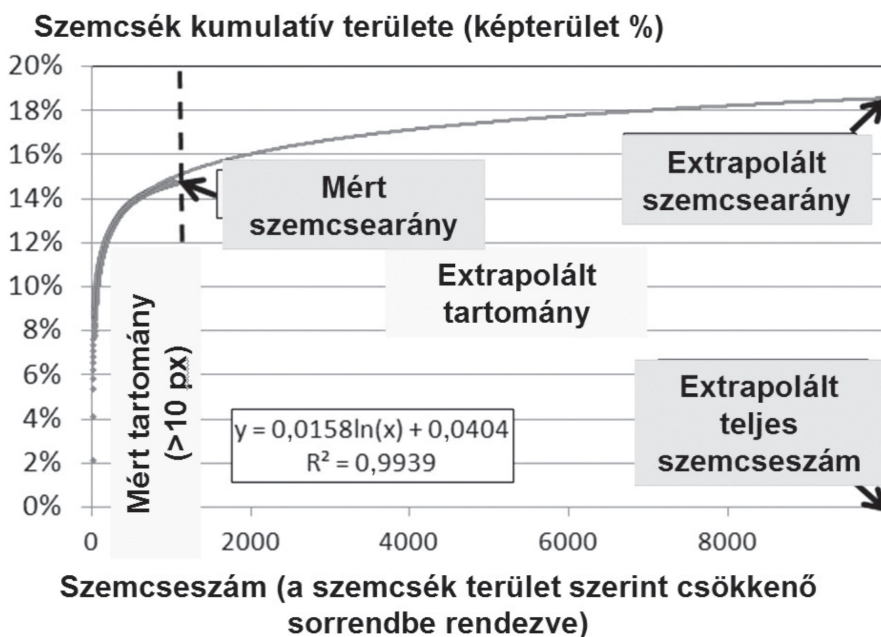
Az ignimbitben lévő felragadott törmelék mennyiségének közvetve öskörnyezeti jelentősége is van. Egyrészt az egykori nagy vulkán-sziget belső részét, másrészt a késő bronzkori kalderaöböl belsejében helyet foglaló – a mai Kameni-szigetekhez morfológiailag igen hasonló – kis szigetet képviseli, térfogatából tehát vissza lehet következtetni az egykori belső sziget méretére. Mielőtt erre az érdekes kérdésre rátérnék, megemlítem, hogy a minószi kitörés utolsó szakaszában vízhatást már nem mutató, forróbb piroklaszt-árak zúdultak le, melyekből a kürtőtől távolabb, főleg a környező tengerben további ignimbittömegek rakódtak le (D egység) (Sigurdsson et al., 2006).

A KÉSŐ BRONZKORI ÓSFÖLDRAJZI KÉP

Rekonstrukciónk azt célozta, hogy a rendelkezésre álló információk mellett – a maihoz hasonlóan alacsony, viszonylag lapos késő bronzkori sziget(csoport), szélesebb belső tengeröböl – megállapítsuk, mekkora volt a belső sziget, és vajon mióta

létezett (a 22 ezer évvel ezelőtti Cape Riva-kitöréshez képest). A méretet illetően a minószai C és részben D egységben meglévő felragadott törmelék fotostatisztikai, illetve granulometriai (szemcseméret) elemzéséből indultunk ki, amelyhez Thíra és Thiraszia szigetén csaknem nyolcvan kőzetfeltárást vizsgáltunk meg. Mivel a törmelékanyag nemcsak az egykori szigetet, de a felrobbant, illetve beszakadt partvidék anyagát is képviseli, az egyes komponensek elkülönítésére alapos kőzettani-geokémiai elemzésekre is szükség volt. Vizsgálataink szerint a szemcseméret eloszlása a nagyobbaktól a kisebbek felé – logaritmusos összefüggés szerint – az ún. Weibull-eloszlást követi, ami robbanásos vulkánkitörések kapcsán is jól ismert jelenség (Wohletz–Brown, 1995). Ez az összefüggés lehetővé teszi a kisebb, mm-es szemcsék irányába történő extrapolálást is (5. ábra), azonban a legkisebb szemcsék gyakoriságát – a szubmilliméteres tartományban – a törmelékanyag szitálásával, mikroszkópos elemzésével kellett meghatározni.

Mindezek alapján a késő bronzkori, „Pre-Kameninek” nevezett sziget mérete – a mintavételi, statisztikai hibák, a minószai tufa egységeinek tenger alatt kevésbé ismert megoszlása és más bizonytalansági tényezők ellenére – jól behatárolható:



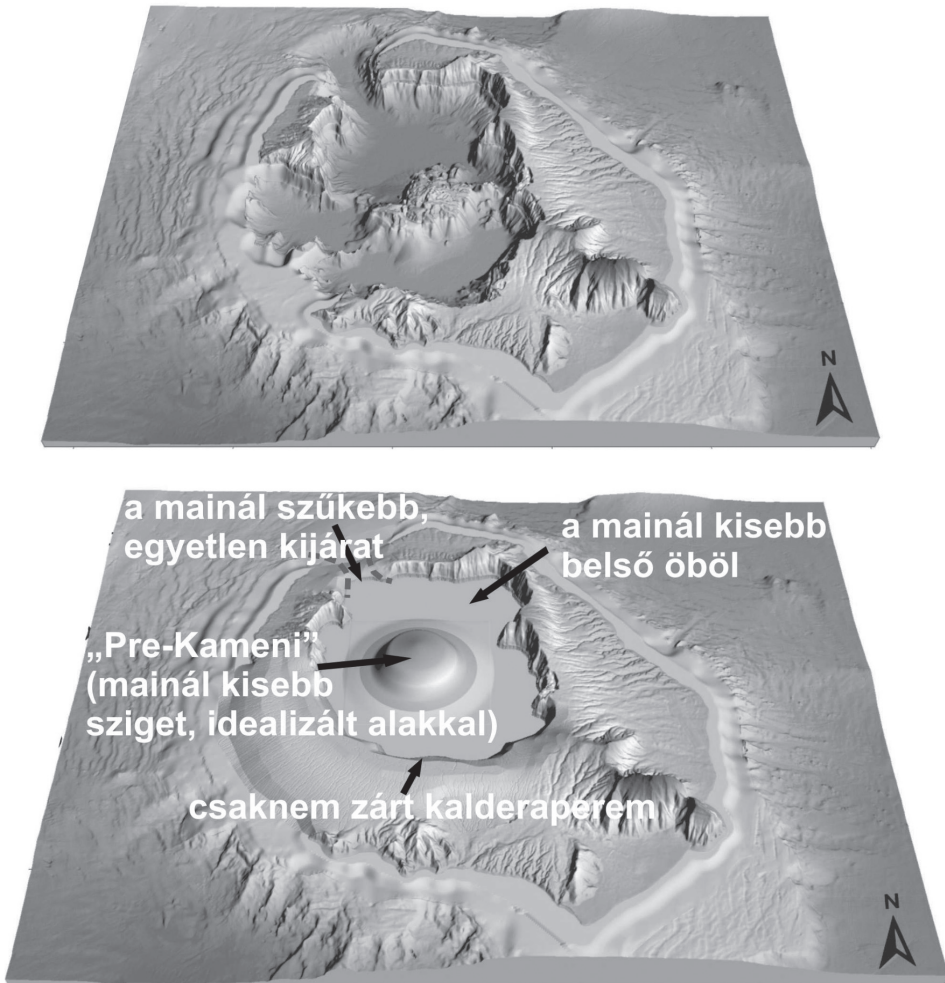
5. ábra. Fotostatisztikai elemzésünk során (melyre az elemzett mintegy nyolcvan kőzetfeltárást közül látható egy példa) a minószai tufában található régebbi törmelék mennyiségét számoltuk ki. Mint látható, a törmelék szemcsék kumulatív területe és a szemcseszám között logaritmusos korreláció figyelhető meg, lehetővé téve a 10 pixelnél kisebb szemcsékre való extrapolációt.

A legkisebb szemcsék arányát szitálással és mikroszkópos elemzéssel határoztuk meg.

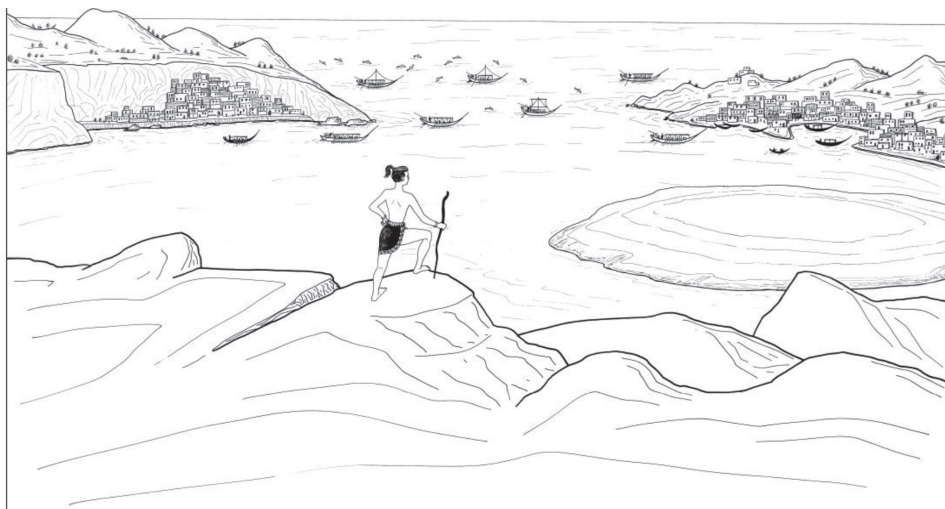
(Karátson et al., 2018 alapján)

2,2–2,5 km³-nek adódik (6. ábra), tehát kisebb volt, mint a mai Kameni-szigetek (3,2 km³). Ennek alapján elmondható, hogy Szantorini késő bronzkori domborzati viszonyait a mainál kisebb tengeröböl és benne kisebb belső sziget jellemezte. A menedéket adó, védett öböl ideális kikötőhely lehetett a minószi civilizáció számára (7. ábra).

Vajon mikortól fogva létezett ez az ősföldrajzi kép? Erre a kérdésre a „mák-szemek” között legnagyobb tömegben jelen lévő, a belső szigetet felépítő fekete,



6. ábra. Szantorini domborzata napjainkban és a késő bronzkorban, digitális domborzati modellen (DEM). A minószi kitöréskor felrobbant „Pre-Kameni” mérete számításunk alapján a mai belső Kameni-szigetek négyötöde volt. (Karátson et al., 2018 alapján)



7. ábra. Szantorini késő bronzkori képe a régész szemével (Strasser, 2010)

üveges andezitblokkok kormeghatározásával kerestünk választ. A néhány ezer vagy néhány tízezer éves – földtani értelemben igen fiatal – kőzetkorok pontos meghatározására kevés módszer ismert. Munkánkban a jól ismert K/Ar radiometrikus módszer nagyobb pontosságú változatát, a Cassagnol–Gillot-kormeghatározást alkalmaztuk az azt kifejlesztő laborban, a Dél-párizsi Egyetemen (Université Paris-Sud, Orsay, GEOPS). (Ez az eljárás az MTA Atommagkutató Intézetében korábban nem került bevezetésre; a közelmúltban viszont egy nagy pontosságú tömegspektrométer beszerzését követően megindultak az első mérések.)

A hagyományos K/Ar-módszerrel szemben a Cassagnol–Gillot-eljárás igen kis mennyiségű (0,1%) radiogén argon (^{40}Ar) detektálására is alkalmas, és megfelelő minta esetén akár néhány ezer, sőt néhány száz éves kőzetre is használható (Gillot et al., 2006). Fontos szempont, hogy a vulkáni kőzetnek a kitöréssel egyidejű alkotóelemén, frakcióján mérjük. A hagyományos K/Ar-módszer alkalmazása során gyakorta vagy a kőzetalkotó ásványokon, vagy a teljes kőzeten (whole rock) mérnek, ami csak közelítő eljárás, mivel az ásványok egy része a kitörést megelőzően is kikristályosodhat, a teljes kőzet kora pedig egyfajta átlagkor. Az ebből adódó hiba idősebb, több millió éves kőzetnél akár el is hanyagolható, fiatalabbnál azonban nyilvánvalóan nem. Épp ezért a GEOPS laborjában a vulkánkitöréskor legutoljára megdermedő alapanyag (groundmass) korának meghatározására törekednek (lásd Quidelleur et al., 2001). Esetünkben az üveges andezit alapanyagán történt, megismételt mérések $20,2 \pm 1,0$ ezer évet adtak, ami egyúttal azt jelenti, hogy Szantorini belső „Pre-Kameni” szigetének kialakulása szinte közvetlenül a korábban említett Cape Riva-kitörés után megkezdődött. Valószínű ugyanakkor,

hogy a sziget, akárcsak a későbbi Kameni-szigetek, amelyek 3600 év óta már jelentős méretűre nőttek, viszonylag korán elérte maximális méretét; más szóval a vulkánosság elcsendesedett, elszunnyadt a késő bronzkorra – hiszen aktív vulkán-szigeten aligha virágzott volna fel a minószi kultúra.

IRODALOM

- Athanasas, C. D. – Bourlés, D. L. – Braucher, R. et al. (2016): Evidence from Cosmic Ray Exposure (CRE) Dating for the Existence of a Pre-Minoan Caldera on Santorini, Greece. *Bulletin of Volcanology*, 78, 35. DOI: 10.1007/s00445-016-1026-3, http://www.academia.edu/27829095/Evidence_from_cosmic_ray_exposure_CRE_dating_for_the_existence_of_a_pre-Minoan_caldera_on_Santorini_Greece
- Bond, A. – Sparks, R. S. J. (1976): The Minoan Eruption of Santorini, Greece. *Journal of the Geological Society, London*, 132, 1–16. DOI: 10.1144/gsjgs.132.1.0001, https://www.researchgate.net/publication/249545625_The_Minoan_eruption_of_Santorini_Greece
- Druitt, T. H. (2014): New Insights into the Initiation and Venting of the Bronze-Age Eruption of Santorini (Greece), from Component Analysis. *Bulletin of Volcanology*, 76, 794. DOI: 10.1007/s00445-014-0794-x
- Druitt, T. H. – Edwards, L. – Mellors, R. et al. (1999): *Santorini Volcano. (Memoir 19)* London: Geological Society
- Friedrich, W. L. – Eriksen, U. – Tauber, H. et al. (1988): Existence of a Water-filled Caldera Prior to the Minoan Eruption of Santorini, Greece. *Naturwissenschaften*, 75, 567–569. DOI: 10.1007/BF00377720, https://www.researchgate.net/publication/226164534_Existence_of_a_water-filled_caldera_prior_to_the_Minoan_eruption_of_Santorini_Greece
- Friedrich, W. L. – Kromer, B. – Friedrich, M. et al. (2006): Santorini Eruption Radiocarbon Dated to 1627–1600 B.C. *Science*, 312, 548. DOI: 10.1126/science.1125087, http://www.academia.edu/4245687/Santorini_Eruption_Radiocarbon_Dated_to_1627-1600_B.C
- Gillot, P.-Y. – Hildenbrand, A. – Lefèvre, J.-C. et al. (2006): The K/Ar Dating Method: Principle, Analytical Techniques, and Application to Holocene Volcanic Eruptions in Southern Italy. *Acta Vulcanologica*, 18, 55–66. DOI: 10.1400/93820, http://www.academia.edu/2036679/THE_K_AR_DATING_METHOD_PRINCIPLE_ANALYTICAL_TECHNIQUES_AND_APPLICATION_TO_HOLOCENE_VOLCANIC_ERUPTIONS_IN_SOUTHERN_ITALY
- Heiken, G. – McCoy, F. (1984): Caldera Development during the Minoan Eruption, Thira, Cyclades, Greece. *Journal of Geophysical Research*, 89, 8441–8462. DOI: 10.1029/JB089iB10p0844, https://www.researchgate.net/publication/258940120_Caldera_Development_During_the_Minoan_Eruption_Thira_Cyclades_Greece
- Johnston, E. N. – Sparks, R. S. J. – Phillips, J. C. et al. (2014): Revised Estimates for the Volume of the Late Bronze Age Minoan Eruption, Santorini, Greece. *Journal of Geological Society London*, 171, 583–590. DOI: 10.1144/jgs2013-113, https://www.researchgate.net/publication/269709403_Revised_Estimates_for_the_Volume_of_the_Late_Bronze_Age_Minoan_Eruption_Santorini_Greece
- Karátson, D. – Gertisser, R. – Telbisz, T. et al. (2018): Toward the Reconstruction of the Disappeared Late Bronze Age Intra-caldera Island of Santorini, Greece. *Scientific Reports*, 8, 7026. DOI: 10.1038/s41598-018-25301-2 1, <https://www.nature.com/articles/s41598-018-25301-2>
- Marinatos, S. (1939): The Volcanic Destruction of Minoan Crete. *Antiquity*, 13, 339–425. DOI: 10.1017/S0003598X00028088

- Nomikou, P. – Druitt, T. H. – Hübscher, C. et al. (2016): Post-eruptive Flooding of Santorini Caldera and Implications for Tsunami Generation. *Nature Communications*, 7, 13332. DOI: 10.1038/ncomms13332, <https://www.nature.com/articles/ncomms13332>
- Quidelleur, X. – Gillot, P.-Y. – Soler, V. et al. (2001): K/Ar Dating Extended into the Last Millennium: Application to the Youngest Effusive Episode of the Teide Volcano (Spain). *Geophysical Research Letters*, 28, 16, 3067–3070. DOI: 10.1029/2000GL012821, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2000GL012821>
- Rehak, P. – Younger, J. (2001): Review of Aegean prehistory VII: Neopalatial, Final Palatial and Post-palatial Crete. In: Cullen, T. (ed.): *Aegean Prehistory: A Review*, 383–473. Archaeological Institute of America, Boston, https://www.jstor.org/stable/pdf/506138.pdf?seq=1#page_scan_tab_contents
- Sigurdsson, H. – Carey, S. – Alexandri, G. et al. (2006): Marine Investigations of Greece’s Santorini Volcanic Field. *EOS Transactions, American Geophysical Union*, 87, 34, 337–348. DOI: 10.1029/2006EO340001, <http://digitalcommons.uri.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1011&context=gsofacpubs>
- Strasser, T. F. (2010): Location and Perspective in the Theran Flotilla Fresco. *Journal of Mediterranean Archaeology*, 23,1, 3–26. DOI: 10.1558/jmea.v23i1.3, <https://art.providence.edu/files/2018/03/strasser-flotilla-fresco.pdf>
- Tsonis, A. A. – Swanson K. L. – Sugihara, G. et al. (2010): Climate Change and the Demise of Minoan Civilization. *Climate of the Past*, 6, 525–530. DOI: 10.5194/cp-6-525-2010, https://www.researchgate.net/publication/46056268_Climate_change_and_the_demise_of_Minoan_civilization
- Wohletz, H. K. – Brown, W. K. (1995): Particulate Size Distributions and Sequential Fragmentation/Transport Theory. *Los Alamos National Laboratory Report*, LA-UR 95-0371.