



ГЕОХАЗАРД У СРБИЈИ У 21. ВЕКУ – ЗНАЊЕ ЈЕ НАЈБОЉИ БЕДЕМ ПРОТИВ СТИХИЈЕ

ГЕОХАЗАРД У СРБИЈИ У 21. ВЕКУ
– ЗНАЊЕ ЈЕ НАЈБОЉИ БЕДЕМ ПРОТИВ СТИХИЈЕ

SERBIAN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS

LECTURE SERIES

Book 5

GEOHAZARD IN SERBIA
IN THE 21st CENTURY

– KNOWLEDGE IS THE BEST BASTION
AGAINST THE NATURAL DISASTERS

Accepted at the 4th meeting of the Department of Mathematics,
Physics and Geosciences on 24 May 2019

Editor
VLADICA CVETKOVIĆ
Corresponding Member of SASA

BELGRADE 2019

СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ

ЦИКЛУС ПРЕДАВАЊА

Књига 5

ГЕОХАЗАРД У СРБИЈИ
У 21. ВЕКУ

– ЗНАЊЕ ЈЕ НАЈБОЉИ БЕДЕМ
ПРОТИВ СТИХИЈЕ

Примљено на IV скупу Одељења за математику, физику и гео-науке
од 24. маја 2019. године

Уредник
ВЛАДИЦА ЦВЕТКОВИЋ
дописни члан САНУ

БЕОГРАД 2019

Издаје
Српска академија наука и уметности
Београд, Кнеза Михаила 35

Лектура и коректура
Невена Ђурђевић
Снежана Крсчић-Букарица

Превод резимеа
Аутори

Технички уредник
Никола Стевановић

Тираж 350 примерака

Штампа
ЈП *Службени гласник*

ISBN 978-86-7025-844-0

© Српска академија наука и уметности 2019

САДРЖАЈ

Владица Цветковић, <i>Уводна реч</i>	7
Ана Младеновић, Славица Радовановић, <i>Сеизмички hazard у Србији</i>	11
Ana Mladenović, Slavica Radovanović, <i>Seismic hazard in Serbia</i>	22
Зоран Стевановић, <i>Процена ризика од несигурности воде за пиће у Србији</i>	25
Zoran Stevanović, <i>Risk assessment of drinking water shortage in Serbia</i>	44
Славиша Трајковић, <i>Просторно-временске карактеристике суша у Србији</i>	45
Slaviša Trajković, <i>Spatiotemporal characteristics of droughts in Serbia</i>	64
Биљана Аболмасов, <i>Hazard од клизавица у Србији у 21. веку</i>	65
Biljana Abolmasov, <i>Landslide hazard in Serbia in the 21st century</i>	87
Видојко Јовић, <i>Загађење земљишта – узроци и последице</i>	89
Vidojko Jović, <i>Soil pollution – causes and consequences</i>	97

Дејан Прелевић, <i>Да ли је вулкански хазард њрејња за њодручје Балканској њолуосѡрва?</i>	99
Dejan Preleviћ, <i>Is volcanic hazard a threat for the area of Balkan Peninsula?</i>	119
Слободан Марковић, <i>Климајске ѡромене – ѡеѡерсѡекѡива</i>	121
Slobodan Markoviћ, <i>Climate changes – geoperspective</i>	129

УВОДНА РЕЧ

Зборник радова под насловом: „Геохазард у Србији у 21. веку – знање је најбољи бедем против стихије“ представља резултат истоименог циклуса предавања, који је у периоду од априла до јуна 2018. године одржан у Српској академији наука и уметности. Посебним циклусима предавања САНУ показује жељу да појача своју друштвену улогу тиме што би, поред великог броја активности у којима се промовишу искључиво врхунски научни резултати, организовала скупове посвећене неким од најважнијих проблема савременог српског друштва. Садржај предавања ових посебних циклуса подједнако је усмерен како експертима тако и широком аудиторијуму, другим речима, најсавременија научна знања пласирају се на начин да њихов значај за заједницу буде највидљивији.

У оквиру циклуса „Геохазард у Србији у 21. веку – знање је најбољи бедем против стихије“ одржано је укупно седам предавања. Њима су тематски обухваћени ако не сви, онда сигурно најважнији геолошки хазарди с којима се наш простор може суочити у овом веку. Неки од ових геохазарда су нам нажалост и „блиски“ и познати, попут земљотреса и клизишта, неки нам тек „куцају на врата“, као што су проблеми недостатка квалитетне воде или озбиљног загађења земљишта, док неке од приказаних гео-опасности доживљавамо мање узнемирујућима зато што су (само привидно) далеко од нас, било у простору, на пример вулкани, или у времену, као што су глобалне промене климе.

У првом раду Зборника, А. Младеновић и С. Радовановић приказују најважније аспекте сеизмичког хазарда у Србији. На разумљив, али научно савремен начин, у раду се објашњава зашто се код нас догађају релативно јаки земљотреси, премда подручје Србије није близу места генерисања највеће количине тектонске енергије у региону. Посебна пажња поклања се чињеници да је штета коју ови земљотреси праве несразмерно велика. Рад пружа и осврт на проблеме у дефинисању сеизмичког хазарда на територији наше земље, наглашавајући притом који се стандарди морају поштовати при прикупљању података и примењивању методологије за ваљану процену хазарда.

У раду „Процена ризика од несташице воде за пиће у Србији“ аутор З. Стевановић описује тренутно стање водних ресурса у Србији, при чему многе податке приказује и у историјском контексту. На тај начин из рада је могуће сазнати не само какав је *status preasens* већ и о каквим трендовима је реч, као што је, на пример, дуготрајно повећање капацитета централизованог водоснабдевања у последњих шездесет година или осетно смањење учешћа подземних вода у снабдевању водом у Србији. Аутор закључује да Србија „припада групи земаља Европе са довољним ресурсима подземних и површинских вода за дугорочно задовољавање потреба становништва у пијаћој води, као и потреба у области индустрије, енергетике, наводњавања пољопривредних површина.“

Вода је и у фокусу трећег прилога у овом Зборнику. У оригиналном раду „Просторно-временске карактеристике суша у Србији“ аутор С. Трајковић истиче да су штете од суше по правилу веће од оних које настају другим природним хазардима у Србији. На пример, штета од суше из 2012. године процењена је на милијарду и осамсто милиона евра, што за сто милиона евра надмашује ону изазвану колосалним поплавама из 2014. године. Аутор приказује резултате вишегодишњих истраживања на развоју хидроинформационог система за праћење и правовремену најаву суше. На основу приказаних података, у Србији су издвојена три региона: северни, западни и јужни, који се међусобно разликују према угрожености од суше, као и по мерама за ублажавање последица суше.

Четврти прилог се бави клизиштима. У свом прегледном раду под насловом „Хазард од клизишта у Србији у XXI веку“ ауторка Б. Аболмасов даје процену „да је 16–20% територије Србије под активним или умиреним процесом клижења“, при чему детаљно образлаже најважније узроке ових природних појава. У раду се даје критички осврт на тренутну праксу која се тиче уношења података у национални катастар клизишта, и изводи закључак да због незадовољавајућег стања у вези с катастром, тренутно није ни могуће дати најтачнију процену хазарда од клизишта у Србији.

Рад „Загађење земљишта – узроци и последице“ академика Видојка Јовића тиче се све присутнијег проблема загађења земљишта у нашем подручју. У раду су приказане информације о основним узроцима и типовима загађења (рударство, индустрија и друго) и дати примери угроженог земљишта у различитим подручјима Србије.

У прилогу под насловом „Да ли је вулкански хазард претња за подручје Балканског полуострва?“ Д. Прелевић најпре пружа основне информације о унутрашњој динамици наше планете, а затим, без непотребних детаља, али уз излагање најважнијих научних чињеница, објашњава како вулкани настају и зашто се појављују само у (геолошки) одређено време и на одређеном месту. Из ових информација следи приказ тренутне ситуације хазарда од вулканских ерупција за подручје Србије, да би у закључном делу била описана три могућа сценарија по којима би подручје Балканског полуострва могло да буде угрожено вулканским ерупцијама.

Последњи рад у Зборнику носи наслов: „Климатске промене – геоперспектива“, а његов аутор је С. Б. Марковић, дописни члан САНУ. У свом прегледном раду аутор анализира климатске варијабилности на нашој планети у односу на концентрацију гасова који изазивају такозвани ефекат стаклене баште, и то за читав период кенозоика (последњих 65,5 милиона година). Аутор закључује да се „тренутно налазимо у последњој топлој фази (интергласијалу) квартарног леденог доба, која је још увек далеко хладнија од палеоценско-еоценског климатског максимума“. У својим закључним поглављима аутор даје и низ личних осврта на тренутне проблеме у сагледавању будућих климатских промена.

Према свему што је садржано у наведеним прилозима овај Зборник у потпуности испуњава мисију посебних циклуса предавања у САНУ. У њему су разматрана научна питања од чијих одговора не зависи само напредак једне струке нити читаве науке, већ опстанак свих нас, и зато то знање никако не сме да остане само експертима. На тај начин, САНУ доприноси путу Србије ка модерној заједници, у којој научници слушају једни друге и раде заједно на најважнијим питањима, а знање до којих они долазе бива употребљено на прави начин.

Два аспекта овог Зборника желим посебно да истакнем. Први се тиче његове актуелности. Довољан је и летимичан поглед на неко од средстава информисања да би се видело да је оно што наши најпозванији научници тематизују у овом Зборнику најтешње повезано с нашим свакодневним животом. О томе сведоче наслови, попут: „Zrenjanin: Zašto je voda žuta?“ (<https://www.danas.rs/drustvo/zrenjanin-zasto-je-voda-zuta/>), „Klimatske promene: Nivo mora porašće za dva metra“ (<https://www.bbc.com/serbian/lat/svet-48349291>) или „Italijanski vulkan Etna se ponovo aktivirao“ (<https://www.slobodnaevropa.org/a/29976226.html>). Чак и када узмемо у обзир да вести у данашњој, интернетом контролисаној медијској комуникацији, имају увек нешто драматичнији тон, остаје утисак изражене актуелности. Најзад, истовремено с приређивањем за штампу овог зборника у којем се као пример подручја угроженог клизиштима приказује карта Крупња (стр. 74, слика 2), исто подручје бива поново директно погођено бујичним поплавама, а на територији Крупња је на снази ванредна ситуација и влада непрестана опасност од активирања клизишта.

Други аспект је везан за чињеницу да се Зборник одликује високим нивоом критичког мишљења. Осим тога што се у многим радовима указује на лоше стање у Србији када је реч о предусловима за процену хазарда, Зборник доноси и контрастне погледе на једну од данас најосетљивих друштвено-научних тема као што је човеков утицај на климатске промене.

Иако ни као научници нисмо у стању да спречимо, па ни да у детаљима предвидимо велике поплаве и земљотресе, постоји велики број чињеница које су нам веома добро познате, на пример, да се не сме градити свуда и на било који начин. Знамо да ће и вода и обрадиво земљиште бити стратешки ресурси у блиској будућности и да се то мора узети у обзир у одлукама које

доносимо данас, а чије ћемо последице осетити већ сутра. Познато нам је да у Србији нема вулкана који могу бити активни у наредним миленијумима, али истовремено знамо шта се може очекивати од веома јаких ерупција у свету, које ће неминовно уследити. Од седам великих ерупција од последњег леденог доба до данас само се једна догодила када је на земљи живело више од једне милијарде људи, а постоје предвиђања да ће само до краја овог века на земљи живети 12 милијарди људи. Ако би се поновила само једна колосална ерупција, попут оне на месту данашњег језера Тоба на Суматри од пре око 74 хиљаде година, то би људску расу могло да врати на предцивизацијски ниво.

Све што знамо као научници и истраживачи мора бити што пре усвојено од стране целокупне заједнице. Овај Зборник представља само једну од многих активности Српске академије наука и уметности које имају за циљ да научна знања што пре допру до свих, а нарочито до оних који доносе најважније одлуке за читаво друштво.

Владица Цветковић,
дописни члан САНУ

ДА ЛИ ЈЕ ВУЛКАНСКИ ХАЗАРД ПРЕТЊА ЗА ПОДРУЧЈЕ БАЛКАНСКОГ ПОЛУОСТРВА?

ДЕЈАН ПРЕЛЕВИЋ*

А п с т р а к т. – Кретање тектонских плоча, које настаје као последица постојања енергетског градијента између унутрашњих и спољашњих делова планете Земље, обликује њену површину кроз бескрајно дуге процесе који укључују набирања читавих планинских венаца и потањања тла која резултирају стварањем нових мора и океана. С друге стране, ови процеси праћени су генерисањем магме и вулканским ерупцијама који у делићу секунде могу да измене огромна подручја и покрију их метарским наслагама вулканског пепела. Катастрофалне последице вулканских ерупција имале су кроз историју удела и у нестајању древних империја, као и у стварању услова за преломне историјске догађаје као што су Француска револуција, или пораст фашизма у Европи у деветнаестом веку.

У овом раду дат је кратак осврт на главне чињенице које су нам познате о томе како вулкани функционишу и који су главни механизми који генеришу различите продукте вулканизма, а све то кроз причу о угаслим вулканима Балканског полуострва, као и о нама најближим активним вулканима у Италији, Немачкој и Грчкој. Укратко су приказане и основне методе које користи модерна вулканологија, која се базира на премиси да се само из разумевања догађаја који су се одвијали у прошлости могу извући неопходне лекције за будуће катастрофалне вулканске ерупције. Оне ће се неминовно десити негде на Земљи, интензитетом и на начин којим ће значајно угрозити човека и његово окружење.

Кључне речи: вулканизам, литосфера, магматизам, плутонизам, тектоника плоча

1. УВОД

Као последица постојања енергетског градијента између унутрашњих и спољашњих делова планете Земље, кретање тектонских плоча обликује њену површину, представљајући ултимативни механизам производње и рециклирања њене спољашње љуске – литосфере, и позиционирања континената. Као у неком изузетно успореном филму, тектонске плоче се кроз геолошко време покрећу, сударају и подвлаче једна под другу. Ови бескрајно дуги процеси праћени су генерисањем магме и вулканским ерупцијама које,

* Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, имејл: dejan.prelevic@rgf.bg.ac.rs

опет, својом брзином и разарајућом енергијом, уз земљотресе, представљају најдраматичније манифестације кретања плоча. Процеси генерисања магме на високим температурама и притисцима одговорни су за изградњу Земљине коре и формирање вулкана изнад дубоких магматских система. Магма и гасови које она раствара, као што су H_2O , CO_2 , S и халогени елементи, крећу се на горе и не само што стварају стенске масе већ играју кључну улогу и у формирању бројних рудних лежишта и у хемијској модификацији атмосфере. Благотворан „дијалог“ између магматских система и спољних Земљиних сфера у великој мери је дефинисао физичко-хемијске услове који нас данас окружују, и посредно, највероватније довео и до настанка живота на Земљи.

Насупрот бројним позитивним утицајима које процеси магмагенезе и вулканизма доносе, вулканске ерупције могу имати и катастрофалне последице. Један од најсвежијих примера јесте ерупција вулкана Ејафјалајокул на Исланду у априлу 2010. године, када је облак пепела на скоро недељу дана затворио европски ваздушни простор. Иако релативно мала, ова ерупција је изазвала највећи послератни поремећај у ваздушном саобраћају, с процењених две милијарде америчких долара губитака које су претрпеле авио-компаније. Сматра се да су неке значајно веће ерупције имале удела у нестајању древних империја или у стварању услова за преломне историјске догађаје, као што су Француска револуција или пораст фашизма у Европи (Orpenheimer, 2011).

У првом делу овог рада биће дат осврт на главне чињенице које су нам познате о томе како вулкани функционишу и који су то главни механизми који генеришу различите продукте вулканизма. Биће приказан и кратак пресек метода које у данашње време користе научници који се на мулти-дисциплинарном нивоу баве проблематиком вулканизма, његове генезе и хазарда. Данашња истраживања вулкана не заснивају се само на теренским истраживањима вулканских предела и анализама узорака вулканског материјала. Модерна вулканологија се свеобухватно бави и проучавањем језгара бушотина у леду, анализом година на дрвету, затим историјским и археолошким подацима, као што су повезаност климатских промена с вулканском активношћу, индуковањем великих померања народа и другим питањима, те тако повезују геолошке, историјске, археолошке и палеоклиматске доказе, како би се до краја испричале приче које стоје иза неких од катаклизмичних вулканских догађаја. Овакав „форензички“ приступ вулканологији базиран је на премиси да се само из разумевања догађаја који су се одвијали у прошлости могу извући неопходне лекције за будуће катастрофалне вулканске ерупције које ће се неминовно десити негде на Земљи, интензитетом и на начин који ће значајно угрозити човека и његово окружење. Због тога је наш задатак да имамо свест о томе колику штету, односно хазард, могу да изазову, колики је ризик, односно вероватноћа, да ће се вулканске ерупције одређеног интензитета заиста и десити и на којем је нивоу способност нашег друштва да ублажи последице њихове активности.

У другом делу рада биће приказане главне вулканске области на Балканском полуострву, као и шире у циркум-медитеранском појасу, с посебним нагласком на активном и рецентном вулканизму у Италији, Грчкој и Немачкој. Имајући у виду близину ових активних вулкана, дискутоваћемо и о хазарду који активност ових вулкана може да донесе и подручју Балкана, као што је буђење супервулкана Кампи Флегреи код Напуља, што се може очекивати у скорој будућности.

2. ВУЛКАНИ И ЧОВЕК

Човек је одвајкада са страхопоштовањем гледао на вулканску активност. На то указују и најстарији пронађени цртежи вулканске активности у историји који описују ерупцију вулкана Хасанда (Hasan Dagi) у Анадолији, а потичу из неолита, 6200. године пре н. е. (Mellaart, 1964). Ове слике је тадашњи човек нацртао на зиду светилишта и њима се клањао као боговима. Грчка митологија такође придаје посебну моћ вулканима и вулканским ерупцијама, за које је сматрала да представљају божје дело, док је у римској религији Вулкан био бог ватре.

Међутим, неразумевање вулкана и потцењивање њихове разорне моћи често је у историји скупо коштало људе који су живели у њиховој сенци. Вероватно најпознатији пример за то је ерупција Везува 79. године, која је уништила Помпеју и Херкуланум. Штавише, историја памти и примере када се човек, несвестан сопственог незнања, изразито неодговорно понашао у односу на природне катастрофе. Парадигматична у том смислу је ерупција вулкана Санта Марија у Гватемали, која се догодила у октобру 1902. године. Вулкан је удаљен неких десетак километара од Кесаљтенанга, другог по величини града у држави. Пре 1902. године вулкан је био неактиван најмање 500 година, од када датирају први писани подаци о граду, а вероватније и неколико хиљада година раније, тако да је свест о ризику његовог поновног буђења ишчилила из колективне свести људи који су живели у његовој близини. На буђење вулкана 1902. године јасно је указивала интензивна сеизмичка активност у региону, која је кулминирала великим земљотресом у априлу те године. Ерупција је почела 24. октобра једног магловитог јутра, а најинтензивнија активност је уследила у наредна два дана, када је вулкан избацио око 5,5 km³ тефре (Rose, 1972). Ерупција је трајала неколико недеља и била је једна од највећих у 20. веку. Међутим, регионална влада није организовала евакуацију становника. Штавише, након те прве ерупције, регионалне власти су минимизирале опасност, лаконски тврдећи да вулкански материјал вероватно потиче из неког вулкана у Мексику, игноришући могућност да се у ствари вулкан налази на десетак километара од града. Нажалост, када је ерупција кулминирала, за организацију било какве озбиљније евакуације

становништва било је касно. У првих неколико недеља ерупције страдало је око 6000 људи, док се тачан број касније настрадалих од болести, глади и контаминације земљишта никада није сазнао. У суштини, ови људи су страдали због недостатка свести о потенцијалним хазардима и степену ризика које са собом доноси живот у близини активног вулкана, а понајвише због неодговорне организације руководећих људи који су доносили неадекватне одлуке пре и током саме ерупције.

3. ВУЛКАНИЗАМ, МАГМА, ТЕФРА

Вулканизам представља емисију чврстог и течног високотемпературног стенског материјала, као и емисију гасова на површину Земље, која настаје као последица геолошких активности. Вулкани обично настају на местима где је Земљина литосфера „поцепана“ и где је отворен пут магми из дубине, на пример на дну Атлантског океана или у Великом источноафричком рову (рифту). Вулкани се стварају и на местима где се танка океанска литосферска плоча подвлачи под континенталну или океанску литосферску плочу процесом који се назива субдукција (Wilson, 1989). Такви су вулкани који се појављују у такозваном ватреном прстену на рубу Пацифичког океана, а тако настају и вулкани на Санторинију и у околини Напуља. Такође, вулканизам се ствара и у релативно узаним подручјима испод којих је омотач (мантл) и до 200 Целзијусових степени топлији од околног „нормалног“ омотача, када се ова појава назива топла тачка. Овакав јединствени тип вулканизма активан је данас на Хавајима, а у геолошкој историји у значајној мери је био одговоран за гигантске ерупције које су се, на пример, дешавале у време креде у провинцији Декан у Индији, или на крају перма у Сибиру.

Магма је главни производ вулканизма. Углавном је силикатног састава и представља високотемпературну вишефазну мешавину чврстих, течних и гасовитих компоненти. Очвршћавањем магме настају магматске стене које се по (микро)структури и саставу могу поделити на дубинске (или плутонске), као што су гранити, диорити и габрови, и вулканске (или изливне), као што су риолити, андезити и базалти. Главна хемијска компонента која их унутар наведених група даље раздваја јесте количина SiO_2 , па тако гранити и риолити имају много више силицијум-диоксида него габрови и базалти.

Хемизам магме, нарочито количина SiO_2 , утиче на неке њене физичке особине, као што су вискозитет и густина, које зависе још и од садржаја флуида, температуре, садржаја кристала у магми и других одлика. Вискозитет магме представља меру њеног унутрашњег трења које је последица конзистентности магматског растопа. Вискозитет је резултат односа напона смицања и брзине деформације, што је последица степена полимеризације SiO_4^{4-} тетраедара. Вискозитет диктира каква ће бити покретљивост магме,

па су магме риолитског састава које су богате SiO_2 веома слабо покретљиве (склоне експлозивном вулканизму), а магме базалтног састава са ниским садржајем SiO_2 управо супротно, ниског вискозитета и веома покретљиве (склоне лавичним сливовима, на пример Хаваји).

Присуство гасовитих компоненти у магми, као што су H_2O , CO_2 , SO_3 и друге, представља један од главних покретача вулканизма. Разлог лежи у томе што се њихова растворљивост драматично мења с променом притиска и температуре целог магматског система. Тако се, на пример, растворљивост воде у силикатним растопима повећава с повећањем притиска: на температури од 1000°C и притиску од 5 kbar (дубина око 16 km) риолит може да садржи и до 10% растворене H_2O , док на притиску од 1 kbar (око 3 km) и сличним температурама, у њему може максимално бити растворено 5% H_2O . Слично је и са осталим гасовима. То значи да магма која носи растворене гасовите компоненте кретањем ка површини може у једном тренутку да досегне стадијум када се гасови издвајају и растоп практично прокључа. На крају, мехурићи гаса почињу да колабирају, долази до фрагментације магме и њеног претварања у гас са честицама вулканског стакла и кристала. Уколико се то дешава у магматском огњишту где је смештена велика количина магме, може доћи до његовог наглог пражњења, слично флаши газираног пића уколико бисмо је најпре добро промућкали, а онда јој нагло уклонили затварач.

Приликом вулканске ерупције, као последица експлозивне фрагментације магме и/или околних стена, настаје тефра. Тефра у најширем смислу представља пирокластични невезани материјал различите величине и састава зрна, који настаје експлозивним вулканским процесима. Састав тевре може укључивати фрагменте лаве и комадиће вулканског стакла, кристале, вулканске и околне стене и друго. Као специјалан механизам депозиције пирокластичног материјала издвајају се игнимбрити који представљају депозите настале пирокластичним токовима.

4. ВРСТЕ ВУЛКАНИЗМА И ЊИХОВ ХАЗАРД

Генерално, вулканизам може бити ефузивни – када из једног или више вулканских центара излазе кохерентни токови лаве, или експлозивни – када вулканска ерупција избацује пирокластични материјал.

Најчешћи вид ефузивног вулканизма јесу лавични сливови, као они који се појављују на Хавајима, понекад са веома флуидним, брзим токовима лаве ниског вискозитета која хлађењем добија различите форме, на пример, пахоахое лава (лава налик на канап), јастучасте лаве и друго. Ипак, ретке су лаве које су тако ниског вискозитета и толико покретљиве да могу директно угрозити животе људи и животиња, на пример, као након изливања лаве 2002. године из лавичног језера кратера вулкана Њирагонго у Конгу, када је

погинуло 200 људи и уништен главни град Гома (Favalli et al., 2006). С друге стране, лава је понекад толико густа и вискозна због своје релативно ниске температуре или великог удела кристала у себи, да представља густу масу слабе покретљивости, када формира такозване вулканске доме, купасте облике који могу да се уздижу изнад земље и до неколико стотина метара. Такви облици вулканске активности били су веома чести у централним и западним деловима Србије пре двадесетак милиона година, а њихови остаци се још увек могу наћи на Борчу (Борачки Крш) (Cvetković et al., 2001), Руднику (Prelević et al., 2001), код Љубовије итд.

Сасвим посебан вид ефузивног вулканизма представљају велике магматске провинције (Campbell, 2001, Campbell, 2005). То су места на нашој планети које карактерише изливање огромне количине лаве у геолошки кратком временском периоду. Мада тренутно не постоји место на планети са активним вулканизмом који одговара овом типу, познате су појаве базалтних сливова километарске дебљине кредне старости у Индији у области Декан, пермске старости у Сибиру и друге. Повезују се са иницијалним фазама вулканизма топлих тачака (Campbell, 2001). Старости појединих великих магматских провинција корелишу са главним епизодама изумирања у геолошкој историји, указујући на могући каузалитет између тог гигантског вулканизма који носи огромне количине сумпора и хлора доприносећи драматичним променама у еко-систему, и периодичног нестајања дела живог света (Self et al., 2008).

Постоји велики број различитих типова експлозивних ерупција, и овде ће бити представљени само најзначајнији. Генерално, експлозивне ерупције разликујемо по запремини тевре и интензитету фрагментације (види касније: магнитуда и интензитет), а назване су најчешће по типичним вулканима где се појављују. Тако постоје стромболске ерупције које избацују максимално 10^4 до 10^6 m³ вулканског материјала, најчешће базалтног састава, и код којих висина стуба избаченог материјала не прелази 10 km. Назив су добиле по вулкану Стромболи у Тиренском мору, који на дневном нивоу избацује „фонтане“ ужареног материјала на висину до око 100 m. С друге стране, субплинијске, плинијске и ултраплинијске ерупције избацују од 1 до 1000 km³ вулканског материјала, на висину која иде од 30 km па све до 55 km. Типично за овај тип ерупције јесте формирање вертикалног стуба изграђеног од високотемпературне мешавине гаса, фрагмената стена и пловућца (везикуларног стакла насталог нагло кристализацијом магме). Ове ерупције су добиле име по разорној ерупцији Везува када је уништена Помпеја, 79. године нове ере, и коју је описао Плиније Млађи, што представља први детаљни опис једне такве вулканске ерупције (Pliny the Younger, 2001). За разлику од стромболске, плинијска ерупција је типична за риолитски и андезитски вулканизам зато што су те магме богатије гасовима, а уз то много вискозније и способне да значајније затворе магматске канале, што доводи до нагомилања магме и гасова у магматском огњишту које тада постаје темпирана бомба. Уз овај тип ерупције чести су веома покретљиви (понекад суперсонични) пирокластични токови, који представљају високотемпературну

мешавину гасова и вулканског материјала различите гранулације, која се, као тежа и гушћа, обично издваја из главног еруптивног стуба.

Експлозивни вулканизам настаје и колапсом калдере која представља геоморфолошки одраз присуства огњишта у дубини. Калдере настају када огромне количине лаве смештене у магматском огњишту, у плитким деловима Земљине коре, услед издвајања гасова бивају емитоване у виду тифре, што чини да се ови магматски резервоари делимично испразне, чиме се проузрокује слегање тла и образовање циркуларних депресија.

Као специфичан тип експлозивног вулканизма издвајају се фреатомагматске ерупције. Оне настају када магма испод површине дође у контакт с метеорском водом, што обично представља моментални окидач вулканске ерупције. Овакав магматизам је нарочито био активан у вулканској области Ајфел у Немачкој, где се, осим калдера (Лахерсе), појављује и специфична вулканска форма, такозвани м \acute{a} р.

4.1. *Климатски утицај експлозивног вулканизма*

Познато је да вулканске ерупције, осим чврстог материјала, избацују у атмосферу и гасовите компоненте, првенствено водену пару, угљен-диоксид, хлор и сумпор. Сумпорни гасови се у стратосфери кондензују у аеросол што доводи до повећања албеда атмосфере и може да изазове глобално захлађење. Када се једном нађе у стратосфери, овај аеросол има тенденцију да остане тамо неколико година. Дакле, плиниске, и нарочито ултраплиниске ерупције, које успеју да избаце вулкански материјал до стратосфере, потенцијално могу да утичу на глобалне климатске промене јер изазивају снижавање температуре ваздуха при површини. Тако је познат ефекат ерупције вулкана Пинатубо на Филипинима 1991. године, која је довела до глобалног захлађења од 0,5 Целзијусових степени на годишњем нивоу, које је трајало неколико наредних година. Такође, комбиноване ерупције вулкана Ла Суфријер (1812), Мајон (1814) и Тамбора (1815) довеле су до такозване „године без лета“ 1816. године.

5. ФУНДАМЕНТАЛНИ ПАРАМЕТРИ И МЕТОДЕ ПРОУЧАВАЊА ВУЛКАНИЗМА

Постоје два фундаментална параметра који представљају физички мерљиве карактеристике вулканских ерупција. То су магнитуда и интензитет, који у најширем смислу представљају пандане параметрима који се користе у сеизмологији.

Слично Рихтеровој скали магнитуде у сеизмологији, која дефинише количину енергије ослобођене током земљотреса, тако и магнитуда вулканске

ерупције упућује на количину енергије која је ослобођена, и то кроз прерачун количине материјала (маса или запремина) избаченог током ерупције. Ова скала је експоненцијална и креће се од 2 до 9. Тако магнитуда 6,1 представља ерупцију која је избацила око 10 km^3 материјала, слично вулкану Пинатубо на Филипинима, који је 1991. године у ерупцији која је трајала једанаест недеља избацио материјал који је покрио већи део југоисточне Азије и буквално уништио подручје у пречнику од око 15 km. Статистички гледано, такве ерупције се догађају у интервалу од око 160 година. Са повећањем магнитуде, наравно, повећава се и количина избаченог материјала, а такође и просечни интервал у коме се ерупције дешавају. Тако ерупције магнитуде 9 ослобађају $>1000 \text{ km}^3$ материјала и оне представљају тзв. суперерупције (Mason et al., 2004). Претпоставља се да суперерупција вулкана представља најекстремнији геолошки догађај, односно крајњи геолошки хазард с катастрофалним последицама за живи свет (Miller & Wark, 2008). Последња позната суперерупција десила се пре око 26.000 година када је вулкан Таупо на Новом Зеланду избацио око 1200 km^3 вулканског материјала, а пре тога експлозија вулкана Тоба на Суматри, пре око 76.000 година, која је избацила око 2800 km^3 вулканског материјала. Не постоји начин да се предвиди када и где (тачно) ће се догодити следећа суперерупција, и можемо само емпиријски претпоставити с којом учесталošћу могу да се очекују овакви догађаји. Сама чињеница да су ерупције вулкана Тоба и Таупо на временском растојању од око 50.000 година упућује на закључак да је управо то учесталост којом се могу очекивати ове ерупције у будућности. Такође, може се само претпоставити да су највероватнија места следеће суперерупције Тоба, Јелоустон, Кампи Флегреи или Таупо, односно вулкани који су већ једном у прошлости произвели ерупцију магнитуде која одговара суперерупцији. Висок ризик који ови вулкани доносе потврђују и најновија истраживања која се интензивно воде на овим, тренутно уснулим, вулканима. Тако, на пример, недавна геофизичка истраживања у Јелоустону указују да се на неких 5 km дубине налази магматско огњиште испуњено са више од 4300 km^3 делимично искристалисане магме (Chu et al., 2010). Рецентне појачане активности се прате и на подручју Кампи Флегреи код Напуља. Међутим, не искључује се ни могућност појаве неког мање познатог или потпуно непознатог вулкана који може да произведе суперерупцију.

Други параметар који се користи јесте интензитет, који представља меру брзине којом је тифра избачена током вулканске ерупције. Интензитет вулканске ерупције је од виталне важности за експлозивне ерупције код којих дефинише до које висине је могуће да се вулкански материјал издигне у атмосферу. Типичан пример је ерупција вулкана Ејафјалајокул на Исланду, која је била релативно мале магнитуде, али великог интензитета, па је избачени вулкански облак досегао висину од око 20 km и приземљио авионски саобраћај на неколико недеља у готово целој Европи.

Данашња истраживања вулкана су мултидисциплинарна и повезују геолошке, историјске, археолошке и палеоклиматске доказе. Овакав „форензички“

приступ има два основна извора информација: то су одлике наслага тефре које су депоноване на удаљености и до неколико хиљада километара од центра ерупције, као делови дуже седиментне секвенце, и карактеристике материјала из језгара бушотина у леду. Кључне величине преко којих се прерачунава количина избачене тефре, и посредно магнитуда и интензитет ерупције једног вулкана, представљају површина и дебљина депозита, величина фрагмената, њихове физичке карактеристике (густина, порозност и облик) као и њихов хемизам. Класичан приступ прерачуна количине избачене тефре подразумева детаљно картирање депозита и цртање линија на површини са истом дебљином слојева тефре, такозване линије изопахе. На тај начин могуће је код старијих вулканских ерупција, осим магнитуде, тачније одредити и центар ерупције. С друге стране, интензитет вулканске ерупције може се прерачунати преко мапирања највеће величине класта. Осим директног мерења магнитуде и интензитета, за вулканске ерупције које су се догодиле у прошлости морају се одредити старост ерупције, њена дужина трајања, као и њен потенцијални утицај на климу тога доба. Сваки од ових параметара одређује се различитим геохемијским инструменталним методама, као што су масена спектрометрија, рендгенска флуоресцентна анализа и друге.

6. ВУЛКАНИЗАМ ЦИРКУМ-МЕДИТЕРАНСКЕ ОБЛАСТИ

Циркум-медитеранска кенозојска вулканска провинција (Lustrino & Wilson, 2007) обухвата област вулканске активности у ширем подручју Медитерана с вулканима који су били активни у последњих неколико десетина милиона година. Ова провинција укључује велики број вулкана у Шпанији, Француској, Немачкој, Италији, на Балканском полуострву, у Мађарској, Румунији, Бугарској, Турској, на северу Африке итд. Геодинамички, вулканизам ове области просторно и временски је повезан с кенозојском конвергенцијом Афро-арапске и Евроазијске плоче и мањих блокова између њих, што је имало за последицу прогресивно затварање неколико океанских басена који су ту постојали још од мезозоика. Као резултат ове конвергенције створен је Алпски ороген на деловима јужне пасивне континенталне маргине Европе којој припада и Балканско полуострво.

6.1. Вулканизам на Балканском полуострву

У Србији нема активних вулкана и нема изгледа да ће их бити у будућности коју меримо хиљадама година. Међутим, у геолошкој прошлости наше подручје је било вулкански веома активно, тако да остатке тих древних вулкана налазимо и данас. О њима су писали још пионири геолошке науке

у нас, па не чуди да је тешко наћи и најмању појаву магматских стена о којој не постоји петрографски приказ или барем кратка забелешка у капиталном делу *Геологија Србије* Јована М. Жујовића из 1900. године, или препознати неки вулканогени облик у рељефу, који није поменут у *Геоморфологији* Јована Цвијића из 1924. године.

Од најстаријег геолошког времена до данас, на нашем подручју је било различитих видова вулканске активности. Детаљнија реконструкција, међутим, могућа је само за вулканске догађаје који су се одвијали у последњих неколико десетина милиона година. Остаци старијих вулкана такође постоје, али су те стене најчешће потпуно метаморфисане.

Најстарије вулканске стене код нас, чије су петролошке и геохемијске карактеристике сачуване, потичу из времена тријаса од пре око 200–250 милиона година. Ови вулкани везани су за специфичне процесе разламања континенталне литосфере и прве фазе отварања неотетиског океанског простора, када се као субмаринске ерупције изливају лаве андезита и базалта. Најзначајније појаве тријаских вулканских стена срећемо, на пример, на Бобији код Љубовије (Maurer et al., 2019), у близини Сирогојна, на Чадињу код Пријепоља (Кнежевић & Svetković, 2000), у околини Косовске Митровице (Дудин Крш) и у подручју Истока (Метовић, 2003).

Вулканогене стенске масе јурске старости настале су у време ширења неотетиског океана, који је пре око 160 милиона година широко раздвајао терене данашње источне и западне Србије. Данас се већи реликти овог древног океанског дна налазе у подручју Дивчибара (усек пута Ваљево–Косјерић), на више места између Крагујевца и Рековца (Ресимић, 2000), у ибарској долини (код Лепосавића и Косовске Митровице), у златиборско-златарском подручју и на потезу лугом око 30 km од Разбојне до Куршумлијске Бање (Robertson et al., 2009, Robertson & Karamata, 1994). Ове стене су настале сличним процесима који се данас одвијају у подручју средишњих делова Атлантског океана. Бројни субмарински вулкани линеарног типа произвели су огромне количине кохерентног и издробљеног лавичног материјала базалтног састава у виду карактеристичних јастучастих облика стенских маса, тзв. „пилоу-лаве“ (енг. *pillow* – јастук), чије присуство директно сведочи о изливању ужарених маса на морско дно.

Следећи велики вулкански догађај у Србији представљен је горњокредним вулканизмом који се догодио пре око 80 милиона година, као резултат геодинамике која се може упоредити с тектонским режимом данашње западне обале Јужне Америке или југоисточне обале Азије. Дно океана формираног за време јуре престало је да се шири, а даљим кретањем на исток оно је подвучено под дебљу континенталну плочу на западној маргини тадашње Европе. Паралелно овој зони подвлачења (субдукције) формиране су вулканске области које данас налазимо у тимочкој области – од Мајданпека на северу до Књажевца на југу. Овај појас се наставља, с једне стране, на вулканске терене у југозападној Румунији, а с друге стране, у северозападну Бугарску. У тимочком подручју

у време горње креде образован је велики број истакнутих вулканских купа сложене грађе – стратовулкана. Горњокредни вулканизам у источној Србији претежно је производио лаве андезитског карактера, слично вулканима Мон Пеле (острво Мартиник, Антили), Мерапи (Индонезија), Мајон (Филипини) или Котопакси (Еквадор). Данас се бројни остаци горњокредних стратовулкана налазе на простору између Бора и Мајданпека: Црни врх, Тилва Њагра, у околини села Јасиково и Влаола, Брестовачке Бање, Чока Марин и друга места (Banješević, 2010; Gallhofer et al., 2015; Kolb et al., 2012; Milovanović et al., 2005).

Најбоље сачуване вулканске структуре на Балкану су свакако оне које су терцијерне старости. Србија је пре око двадесетак милиона година представљала подручје са бројним активним вулканима, и то у Рудничко-борачко-котленичкој области, око Копаоника, Голије, Рогозне, Радан планине (Леце) и Сурдулице (Cvetković, 1997; Cvetković et al., 2000a; Cvetković et al., 2000b). Мање појаве срећу се и на Фрушкој гори и у Шумадији (Авала, Космај). Велике масе стена вулканског порекла налазе се и на северу Војводине, али су оне прекривене млађим седиментима који су таложени у Панонском мору (Cvetković et al., 1998). Истовремено, у Македонији, сличан вулканизам је био активан у Кратовско-злетовском вулканском пољу. Најчешћи вид вулканске ерупције био је плиниски уз формирање бројних вулканских дома. Најмлађи вулканизам на Балкану, настао пре мање од 1–2 милиона година, јесте онај који се активира даље на југу у Македонији. Он је мање интензиван, доминантно изливног и подређено експлозивног (строболског) типа са стенама које имају повећан садржај калијума, као у локалитетима Младо Нагоричане, Штип (Јежево Брдо), Свети Николе итд. (Prelević et al., 2008), док је код нас представљен малим појавама код Прешева и Бујановца.

Данас на Балканском полуострву нема активног вулканизма, а да Балкан ипак осети барем „мирис“ правог вулканизма „потрудила“ се фумарола Дувало која се налази у селу Косел, у близини Охрида у Македонији. Фумароле представљају пукотине из којих излазе загрејани гасови, обично богати сумпором, угљен-диоксидам и воденом паром. Главна пукотина Дувало изгледа као неки минијатурни кратер пречника 0,5 m и дубине 30 cm. Мало је података о овој занимљивој геолошкој појави, јединственој такве врсте на Балканском полуострву. Википедија описује Дувало као хидротермално поље у високопромењеним филитима девонске старости, одакле је вађен сумпор и коришћен у терапеутске сврхе. Генерално, оне настају као последица вулканске активности, обично када се магма из плитког магматског огњишта пење кроз Земљину кору и отпушта гасовите компоненте или долази у додир и загрева метеорску воду. Фумароле које су богате сумпорним гасовима називају се солфатаре, по узору на оне које се јављају у близини Напуља. Фумароле се углавном односе на некадашњу вулканску активност. Међутим, шире подручје фумароле Дувало је интензивно испитивано, али за сада нема доказа о присуству рецентних вулканских стена или пирокластита (Lindhorst et al., 2015). Најновијим истраживањима која су укључивала и бушотине у седиментима

Охридског језера (Leicher et al., 2016) утврђено је присуство 34 слоја тефре, али се сваки од њих везује за вулканизам у Италији. Због тога се сматра да је ова геотермална аномалија највероватније повезана са активном тектонском активношћу у овом подручју. Значајна активност фумароле Дувало забележена је 28. маја 2014. године, и она је највероватније повезана са повећаном сеизмичком активношћу у овом делу Балкана у то време. Колико нам је познато, никаква мерења гасовитих еманација до сада нису вршена на Дувалу, што би свакако требало урадити у скороје време.

6.2. Активни и рецентни вулканизам у Италији, Грчкој и Немачкој

Италија

Централни део Медитерана, у којем се налази Италија, место је где се интензивно прелама геолошка историја циркум-Медитерана. Конвергенција Афричке и Евроазијске плоче резултирала је укупним кретањем плоча од 400 до 500 km у последњих осамдесетак милиона година (Dewey et al., 1989). Ова кретања су и даље активна, и генерално, то кретање се у последњих неколико десетина година дешава брзином од око 1–2 cm/год. Током тог времена, јонско-јадранска литосфера, као део Афричке плоче, континуирано се подвлачила према западу и северозападу под Евроазијску плочу образујући Алпско-Апенински планински венац (Dewey et al., 1989; Horvath & Berckhemer, 2013), стварајући услове за вулканску активност у том подручју. У Италији има 28 вулкана који су или активни или млађи од 1.000.000 година (<1 Ma). Као последица још увек активне конвергенције и субдукције, у централним Апенинима се јављају земљотреси на дубини од око 90 km (Carminati et al., 2005; Selvaggi & Amato, 1992), док се иза калабријског лука у Јонском мору, на северозападу налази читав низ вулкана, од којих је неколико њих активно, у првом реду Везув и Кампи Флегреи.

Калдера вулкана Кампи Флегреи, заједно с вулканом Везув, налази се у непосредној близини милионског Напуља, у кампанској вулканској провинцији, чинећи да је овај цео регион с највећим ризиком од вулканске активности, уједно и потенцијално најугроженији у погледу вулканског хазарда у целој Европи. Калдера Кампи Флегреи је импозантних димензија од око 40 x 20 km. Настала је колапсом вулкана који се ту налазио пре око 39.300 година, када је дошло до избацивања 100–200 km³ вулканског материјала трахитског састава, у плиниској ерупцији која је избацила вулкански пепео на висину од 40–44 km, што је око 80 пута више тефре него, рецимо, приликом ерупције Везува 79. године, када је уништена Помпеја. Магнитуда ерупција била је 7,4–7,7. Слој кампанске тефре покрио је око 4.000.000 km². Том приликом ослобођено је 1,2 гигатона сумпор-диоксида, што је сто пута више од количине избачене приликом ерупције вулкана Пинатубо 1991.

године. Ова количина сумпор-диоксида у атмосфери изазвала је вулканску зиму и снижавање глобалне температуре за 4°C, што је драстично променило климу током дугог низа година (Orpenheimer, 2011), и имала је разарајући ефекат на екологију источне и југоисточне Европе. Имајући у виду застрашујућу количину вулканског материјала и растојања до којих је тефра расута, може се рећи да је овај догађај у рангу супервулкана и да представља највећу вулканску ерупцију у последњих 100.000 година у Европи. Постоје мишљења да је овај догађај довео до финалног нестајања неандерталаца с тла Европе (Fedele et al., 2008; Golovanova et al., 2010), што је оставило простор за долазак *Homo sapiens*-а са југоистока.

Кампи Флегреи данас карактеришу бројне фумароле и геотермални извори, који указују на постојање магматског апарата који је још увек активан. На подручју Солфатаре јављају се гасне манифестације, док су Ањано (Agniano), Поцуоли (Pozzuoli) и Лукрино (Lucrino) познати по термалним водама. Осим тога, позната су значајна вертикална кретања која имају за последицу периодично подизање и спуштање тла изнад и испод нивоа мора. Ова кретања су се нарочито интензивирала од 1950. године, и то после 412 година релативно мирног периода (Kilburn et al., 2017). Све ово указује на реактивацију магматског система и могућу ерупцију у геолошки скором времену. Ово потврђују и најновији подаци који указују на то да област Кампи Флегреи улази у фазу скоре ерупције (Kilburn et al., 2017). С друге стране, геохемијске анализе гасова из фумарола (Chiodini et al., 2012) показују да будућа ерупција не би требало да буде магнитуде која би одговарала суперерупцији, већ вероватније ерупцији значајно мањег интензитета. На основу свега овога, италијанско Министарство за ванредне опасности одлучило је да одржи „жути ниво“ опасности за цео регион.

Везув је други тренутно успавани вулкан који окружује Напуљ. Његова висина износи 1.821 m и налази се унутар калдере вулкана Сома, који је уништен ерупцијом пре око 25.000 година. Као што је већ речено, ерупција Везува била је одговорна за уништење Помпеје 79. године. Магнитуда те ерупције са $>1 \text{ km}^3$ избаченог материјала била је 5. Помпеја је страдала најпре од велике количине тефре која је пала на град, да би је затим докрајчило шест пирокластичних токова, насталих као последица колапса стуба тефре. Последњи пут Везув је био активан 13. марта 1944. када је ерупција трајала до 18. марта 1944. године. Тада су лавични токови уништили села Сан Себастиано и Маса.

Грчка

Као и Апенини у Италији, и Егејски регион геодинамички припада подручју активне конвергенције и субдукције Афричке литосфере под Евроазијску плочу. Пар стотина километара северно од Крита где се ова субдукција дешава, простире се Хеленски вулкански лук. Овај лук чине

четири активна вулкана, и то: Санторини (последња ерупција 1950. године), Милос (последња ерупција око 200. године), Метана (270. године пре н. е. и 1700. год.) и Нисирос (последње ерупције 1871–1873. и 1887. године).

Санторини представља највеће и најпознатије вулканско острво у Егеју. Минојска ерупција Тере, како се звао вулкан који се налазио на месту где је данас Санторини, 1640. године пре н. е., са 60 km^3 избачене тевре, имала је магнитуду од око 7. Ерупција је изазвала колапс калдере и, додатно, цунами талас који је уништио једну од првих великих европских цивилизација која се налазила на острву Крит – минојску, и по многим потопао легендарну Атлантиду. Пре минојске ерупције, сама морфологија Санторинија већ је највећим делом била креирана у претходној ерупцији која се догодила негде пре око 21.000 година (Karátson et al., 2018), тако да је острво још тада имало циркуларну форму разореног вулкана насталу колапсом калдере (Friedrich et al., 2017). Неколико година пре распада бронзаног доба, лука Акротири на тадашњем Санторинију, која је представљала важан трговачки и културни центар минојске цивилизације, погођена је разорним земљотресом за који се сматра да је не само најавио катастрофалну ерупцију, већ био и главни разлог да се већина становништва исели са острва и то највероватније на Крит (Orpenheimer, 2011). Ерупција је почела фреатомагматском експлозијом када је магма ка свом путу ка површини дошла у контакт са морском водом. Главна плиниска ерупција која је потом уследила, избацила је вулкански пепео на висину од 36 километара, који је потом ношен струјама ваздуха према истоку и југоистоку. Цело острво било је покривено слојевима тевре дебљине и до шест метара, коју највећим делом чини риолитски пловућац. Комадиће овог пловућца могуће је данас наћи на плажама широм Егеја.

Немачка

Кенозојска централноевропска вулканска област простире се углавном у централним деловима Немачке и јужне Француске. Укључује велики број вулканских поља, с најмлађим вулканима који су били активни од пре неколико стотина хиљада до пре неколико хиљада година. Не постоји сагласност у научним круговима о узроку овог вулканизма, али су све чешћа мишљења да је макар делом проузрокован активацијом топле тачке или више њих. Нарочито је ово мишљење постало релевантно након најновијих података геофизичких истраживања помоћу сеизмичке томографије, која су идентификовала геофизичке аномалије испод два најмлађа вулканска поља: Ајфел у Немачкој и Централни масив у Француској (Granet et al., 1995; Hensch et al., 2019; Ritter et al., 2001).

Вулкан Лахерсе се налази у вулканском пољу Ајфел (Mertz et al., 2015) у западном делу Немачке, на око 40 километара јужно од Бона. Остаци вулкана данас представљају невелико језеро ($3,3 \text{ km}^2$) настало након ерупције и

колапса калдере пре 11.000 година. Овај догађај представља највећу вулканску ерупцију у западној и централној Европи у недавној геолошкој прошлости. Колапс Лахерсе вулкана изазвао је плиниску ерупцију, када је дошло до кретања фонолитске магме са дубине од неколико километара ка површини и њене интеракције са подземним водама.

Захваљујући изузетно доброј очуваности фосила и археолошких артефаката, као и интензивном истраживању овог догађаја, доступни су детаљни подаци о климатским условима, као и флори и фауни непосредно пре ерупције (Schmincke, 2014). Преовлађујућа клима у то доба била је слична данашњој, можда незнатно хладнија и влажнија. Људска популација, позната као култура Федермесер, била је малобројна и живела је од лова и скупљања биљака. Негде крајем пролећа или почетком лета, судећи по анализама лишћа које је нађено у наслагама тефре, дошло је до ерупције вулкана Лахерсе. Облак вулканске прашине достигао је висину од 35 km и доспео у стратосферу. Одатле се тај финозрни материјал расуо у различитим правцима све до североистока (до јужне Шведске и Пољске), као и ка југу (према северној Италији), где се могу наћи слојеви ове тефре у језерима и мочварама. Емитовано је и 1,9 мегатона сумпора заједно са 6,6 мегатона хлора. У језгру леда на Гренланду постоје два врло маркантна хоризонта сумпорне киселине чији је временски период компатибилан са ерупцијом Лахерсеа. Претпоставља се да је вулканска ерупција трајала неколико седмица. Укупна магнитуда догађаја од 6,2 слична је ерупцији Пинатуба из 1991. године. Највећи део материјала, и до 95%, депонован је у виду тефре. Тако се у пречнику од два километра око калдере налази слој тефре дебљине преко 50 m. На удаљености од пет километара, тефра и даље има значајну дебљину од око десет метара. На растојању од око 60 километара ка североистоку и 40 километара на југоистоку, све биљке и животиње тог времена морале су бити уништене. Такође, у сливу Рајне акумулирана је велика количина тефре, тако да је то направило брану, формирајући језеро површине 80 km². У једном тренутку брана је колабирала формирајући ток муља који је текао на десетине километара низводно, уништавајући све пред собом.

Утицај ерупције Лахерсеа на климу делимично је моделован, а делимично заснован и на непосредним доказима (Orrenheimer, 2011). Релативно висока географска ширина подручја на којој се ерупција десила, ограничила је дисперзију вулканског аеросола у стратосфери на северну хемисферу, како је предложено атмосферским моделом. Аномалије у расту дрвећа које су уочене у Швајцарској указују на неколико година са хладним летима и/или присуство окишељавања земљишта, које је опет везано за ерупцију. Сматра се да је утицај ове ерупције на климу, као и на животну средину, потрајао најмање две деценије, првенствено кроз измењен алbedo који утиче на локалну климу, окишељавање и ерозију земљишта, шумске пожаре и друге појаве.

7. УМЕСТО ЗАКЉУЧКА: ПРОЦЕНА РИЗИКА ОД ВУЛКАНСКИХ КАТАСТРОФА ЗА ПОДРУЧЈЕ БАЛКАНА

У овом последњем одељку укратко су описана три могућа сценарија вулканске ерупције која реално може да се догоди, уз посебан осврт на процену хазарда за подручје Балканског полуострва.

Сценарио 1. Плинијска ерупција неког од вулкана из циркум-медитеранске области

Плинијска ерупција Везува или вулкана Лахерсе магнитуде 6–7 проузроковала би масовни губитак живота у радијусу од неколико десетина километара око самог центра ерупције. Имајући у виду густину насељености око ова два вулкана (нарочито око Везува), процењује се да би скоро два милиона људи могло бити погођено непосредним утицајима такве ерупције (Orpenheimer, 2011). Подручје око Везува било би директно угрожено пирокластичним токовима, сличним онима који су уништили Помпеју. Претпоставља се да би ови токови ужарене мешавине фрагмената лаве и гасова, угрозиле површину од две стотине квадратних километара, и биле би вођене улицама Напуља пржећи све на шта би наишле. Пожари који би захватили град пренели би се и на шире подручје региона. Ерупција би морала бити повезана са јаким земљотресима који би додатно угрозили инфраструктуру. Ерупција би довела до прекида сваког саобраћаја, а у ширем региону ушло би се у ризик паничног реаговања становништва.

Због релативно мале густине насељености непосредно око вулкана, ерупција Лахерсеа имала би незнатно мањи директан негативни ефекат на становништво него у случају ерупције Везува. Међутим, неколико великих градова и најјачих индустријских центара у Немачкој (Келн, Бон, Дизелдорф, Касел, Мајнц, Франкфурт) налазе се у радијусу од сто километара, због чега би будућа ерупција имала изузетно негативан ефекат. Појаве пирокластичних токова и лахара, који би заплављивали велике речне системе (нпр. Мозел, Рајна, Мајна око Лахерсе вулкана), изазвали би поплаве енормних размера.

Плинијска ерупција и колапс калдере на Санторинију, изазвали би цунами, што би довело до угрожености великог дела централног и источног Медитерана. Максимална заштита укључивала би упозорења и евакуацију становништва. Све ово би изазвало огромну економску штету за угрожене земље.

У случају овог сценарија, Балканско полуострво не би претрпело значајан директан хазард. Међутим, свака економска и политичка нестабилност у ширем и ужем региону Балкана, која би проистекла из ерупције ових вулкана, могла би посредно веома негативно да утиче на ово ионако економски и политички нестабилно тло.

Сценарио 2. Вулканогена контаминација атмосфере и земљишта

Постоји читав низ дуготрајних ефеката које би имала ерупција неких од горе поменутих вулкана, као што су контаминација ваздуха сумпорним гасовима, контаминација земљишта флуором, повећање киселости земљишта и вода, прекид авио-саобраћаја, глобални климатски поремећаји и друго. У историји су познати примери глобалног и регионалног утицаја вулканских ерупција на климатске услове и, посредно, на пољопривреду. Снижење глобалне температуре изазвано већ поменутих ерупцијама Тамборе (20. априла 1815), Ла Суфриере (1812) и Маион (1814), које су се десиле у релативно кратком временском периоду, довеле су до „године без лета“ 1816. године. Последице тога су заиста биле далекосежне и глобалне, укључујући велику глад у западном свету, ширење куге и тифуса, масовну емиграцију из западноевропских делова нашег континента у Америку, па све до зачетка антисемитских прогона у Немачкој (Oppenheimer, 2011).

Дакле, постоји читав низ дуготрајних ефеката које би имала ерупција неких од горе поменутих вулкана, што би на дуже стазе довело до ризика од огромних материјалних губитака. Максимална заштита би укључивала упозорења и мониторинг опасности. Специфичне последице загађења и глобални поремећаји климе не би заобишли ни Балканско полуострво. У том случају Балканско полуострво трпи значајан индиректни хазард.

Сценарио 3. Ерупција супервулкана (било где на свету)

Можемо само да претпоставимо да би последице једне суперерупције, у не тако далекој будућности, биле сличне драматичним сценама приказаним у успешном Би-Би-Сијевом филму *Supervolcano* (<https://www.youtube.com/watch?v=4AjQvOWUJ2o>). У првом реду, пирокластични токови које би имали енормне дужине, и до неколико стотина километара, оставили би ужарени пловућац и тефру дебљине и до 200 m на површини, у радијусу од неколико стотина километара око вулканског центра. Тако, на пример, у хипотетичној плинијској ерупцији магнитуде 8–9, уз колапс калдере вулкана Кампи Флегреи, становништво великог дела Италије било би изложено директној претњи. Инфраструктура у јужној Италији била би потпуно уништена бројним пожарима и колапсима грађевина под теретом тефре. У значајно ширем радијусу, а у зависности од временских услова и кретања ваздуха, дошло би до расипања тефре, која би досегла и до Балкана.

Осим масовног губитка живота у централном Медитерану, био би отежан саобраћај на планетарном нивоу. Настале би и огромна економска штета и геополитичка нестабилност. Максимална заштита укључивала

би упозорења и евакуацију становништва у радијусу од неколико стотина километара, а за успех при евакуацији и указивању друге помоћи била би неопходна пуна кооперација на међународном нивоу. У оваквом сценарију Балканско полуострво би претрпело значајан директан hazard.

ЗАХВАЛНОСТ

Најсрдачније се захваљујем својим колегама Кристини Шарић и Владици Цветковићу на рецензијама, као и Невени Ђурђевић на финалној граматичкој и стилској коректури текста.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Banješević, M. (2010). Upper Cretaceous magmatic suites of the Timok Magmatic Complex *Ann. Géol. Péninsule Balk.* 71, 13–22.
- [2] Campbell, I. H. (2001). Identification of ancient mantle plumes. In: Ernst, R. & Buchan, K. L. (eds.) *Mantle plumes; their identification through time*. Boulder, CO, United States: Geological Society of America (GSA), 5–21.
- [3] Campbell, I. H. (2005). Large igneous provinces and the mantle plume hypothesis. *Elements* 1, 265–269.
- [4] Carminati, E., Negro, A. M., Valera, J. L. & Doglioni, C. (2005). Subduction-related intermediate-depth and deep seismicity in Italy: insights from thermal and rheological modelling. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 149, 65–79.
- [5] Chiodini, G., Caliro, S., De Martino, P., Avino, R. & Gherardi, F. (2012). Early signals of new volcanic unrest at Campi Flegrei caldera? Insights from geochemical data and physical simulations. *Geology* 40, 943–946.
- [6] Chu, R., Helmberger, D. V., Sun, D., Jackson, J. M. & Zhu, L. (2010). Mushy magma beneath Yellowstone. *Geophysical Research Letters* 37.
- [7] Cvetković, V. (1997). Petrostructural and volcanological characteristics of the Miocene eruptive complex of the Borac area (central Serbia, Yugoslavia) (in Serbian with English abstract). *Faculty of Mining and Geology*. Belgrade: University of Belgrade, 241.
- [8] Cvetković, V., Knežević, V. & Pécskay, Z. (2000a). Tertiary igneous formations of the Dinarides, Vardar zone and adjacent regions: from recognition to petrogenetic implications. In: Karamata, S. & Janković, S. (eds.) *Geology and Metallogeny of the Dinarides and the Vardar zone*. Banja Luka – Srpsko Sarajevo: The academy of sciences and arts of the Republic of Srpska, 245–253.
- [9] Cvetković, V., Poli, G. & Prelević, D. (2001). Eruptive history and low pressure evolution of the Early Miocene Borac eruptive complex (central Serbia). *Acta Vulcanologica* 13, 127–143.

- [10] Cvetković, V., Prelević, D. & Pécskay, Z. (2000b). Lamprophyric rocks of the Miocene Borac Eruptive Complex (Central Serbia, Yugoslavia). *Acta Geologica Hungarica* 43, 25–41.
- [11] Cvetković, V., Žumberković, V., Resimić K. & Popov, O. (1998). Miocene pyroclastic of northern Backa (In Serbian with English summary). *13th Congress of Yugoslav Geologists*. Herceg Novi, 187–194.
- [12] Dewey, J. F., Helman, M. L., Knott, S. D., Turco, E. & Hutton, D. H. W. (1989). Kinematics of the western Mediterranean. *Geological Society, London, Special Publications* 45, 265–283.
- [13] Favalli, M., Chirico, G. D., Papale, P., Pareschi, M. T., Coltelli, M., Lucaya, N. & Boschi, E. (2006). Computer simulations of lava flow paths in the town of Goma, Nyiragongo volcano, Democratic Republic of Congo. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 111.
- [14] Fedele, F. G., Giaccio, B. & Hajdas, I. (2008). Timescales and cultural process at 40,000 BP in the light of the Campanian Ignimbrite eruption, Western Eurasia. *Journal of Human Evolution* 55, 834–857.
- [15] Friedrich, L. W., Højen Sørensen, A., Richard Wilson, J., Fytikas, M., Pavlides, S. & Katsipis, S. (2017). *A Major Change in the Stratigraphy of the Santorini Volcano in Greece*.
- [16] Gallhofer, D., Quadt, A. v., Peytcheva, I., Schmid, S. M. & Heinrich, C. A. (2015). Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Late Cretaceous arc in the Carpathian-Balkan orogen. *Tectonics* 34, 1813–1836.
- [17] Golovanova, L. V., Doronichev, V. B., Cleghorn, N. E., Koulkova, M. A., Sapelko, T. V. & Shackley, M. S. (2010). Significance of Ecological Factors in the Middle to Upper Paleolithic Transition. *Current Anthropology* 51, 655–691.
- [18] Granet, M., Wilson, M. & Achauer, U. (1995). Imaging a mantle plume beneath the French Massif Central. *Earth and Planetary Science Letters* 136, 281–296.
- [19] Hensch, M., Dahm, T., Ritter, J., Heimann, S., Schmidt, B., Stange, S. & Lehmann, K. (2019). Deep low-frequency earthquakes reveal ongoing magmatic recharge beneath Laacher See Volcano (Eifel, Germany). *Geophysical Journal International* 216, 2025–2036.
- [20] Horvath, F. & Berckhemer, H. (2013). Mediterranean Backarc Basins. In: Hsü, H. B. a. K. (ed.) *Alpine-Mediterranean Geodynamics* 141–143.
- [21] 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, 7026.
- [22] Kilburn, C. R. J., De Natale, G. & Carlino, S. (2017). Progressive approach to eruption at Campi Flegrei caldera in southern Italy. *Nature Communications* 8.
- [23] Knežević, V. & Cvetković, V. (2000). Triassic rifting magmatism of the Dinarides. *Geology and Metallogeny of the Dinarides and the Vardar zone*. Banja Luka – Serbian Sarajevo: Academy of Science and Arts of the Republic of Srpska, Collections and monographs, 149–160.
- [24] Kolb, M., Von Quadt, A., Peytcheva, I., Heinrich, C. A., Fowler, S. J. & Cvetković, V. (2012). Adakite-like and Normal Arc Magmas: Distinct Fractionation Paths in the East Serbian Segment of the Balkan–Carpathian Arc. *Journal of Petrology*.

- [25] Mauer, B. M., Prelević, D., Mertz-Kraus, R., Pačevski, A., Kostić, B., Malbašić, J. (2019). Genesis and metallogenetic setting of the polymetallic barite-sulphide deposit, Bobija, Western Serbia, *International Journal of Earth Sciences*, in print.
- [26] Leicher, N., Zanchetta, G., Sulpizio, R., Giaccio, B., Wagner, B., Nomade, S., Francke, A. & Del Carlo, P. (2016). First tephrostratigraphic results of the DEEP site record from Lake Ohrid (Macedonia and Albania). *Biogeosciences* 13, 2151–2178.
- [27] Lindhorst, K., Krastel, S., Reicherter, K., Stipp, M., Wagner, B. & Schwenk, T. (2015). Sedimentary and tectonic evolution of Lake Ohrid (Macedonia/Albania). *Basin Research* 27, 84–101.
- [28] Mason, B. G., Pyle, D. M. & Oppenheimer, C. (2004). The size and frequency of the largest explosive eruptions on Earth. *Bulletin of Volcanology* 66, 735–748.
- [29] Maurer, M. B., Prelević, D., Mertz-Kraus, R., Pačevski, A., Kostić, B. & Malbašić, J. (2018). Genesis and metallogenetic setting of the polymetallic barite-sulphide deposit, Bobija, Western Serbia *In print*.
- [30] Mellaart, J. (1964). A Neolithic City in Turkey. *Scientific American* 210, 94–&.
- [31] Memović, E., Cvetković, V. D., Knežević, V. & Zakariadze, G. (2003). The Triassic metabasalts of Dudin Krš, near Kosovska Mitrovica, Serbia. *Geoloski anali Balkanskoga poluostrva*, 85–91.
- [32] Mertz, D. F., Löhnertz, W., Nomade, S., Pereira, A., Prelević, D. & Renne, P. R. (2015). Temporal-spatial evolution of low-SiO₂ volcanism in the Pleistocene West Eifel volcanic field (West Germany) and relationship to upwelling asthenosphere. *Journal of Geodynamics* 88, 59–79.
- [33] Miller, C. F. & Wark, D. A. (2008). Supervolcanoes and their explosive supereruptions. *Elements* 4, 11–15.
- [34] Milovanović, D., Karamata, S. & Banješević, M. (2005). Petrology of alkali basalts of Zlot, Timok Magmatic Complex (Eastern Serbia). *Tectonophysics* 410, 501–509.
- [35] Oppenheimer, C. (2011). *Eruptions that Shook the World*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [36] Pliny the Younger (2001). *Letters*. New York: The Harvard Classics.
- [37] Prelević, D., Cvetković, V. & Foley, S. F. (2001). Composite igneous intrusions from Serbia: two case studies of interaction between lamprophyric and granitoid magmas. *Acta Vulcanologica* 13, 145–157.
- [38] Prelević, D., Foley, S. F., Romer, R. & Conticelli, S. (2008). Mediterranean tertiary lamproites derived from multiple source components in postcollisional geodynamics. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 72, 2125–2156.
- [39] Ritter, J. R. R., Jordan, M., Christensen, U. R. & Achauer, U. (2001). A mantle plume below the Eifel volcanic fields, Germany. *Earth and Planetary Science Letters* 186, 7–14.
- [40] Robertson, A., Karamata, S. & Šarić, K. (2009). Overview of ophiolites and related units in the Late Palaeozoic–Early Cenozoic magmatic and tectonic development of Tethys in the northern part of the Balkan region. *Lithos* 108, 1–36.
- [41] Robertson, A. H. F. & Karamata, S. (1994). The role of subduction-accretion processes in the tectonic evolution of the Mesozoic Tethys in Serbia. *Tectonophysics* 234, 73.
- [42] Rose, W. I. (1972). Notes on the 1902 eruption of Santa María volcano, Guatemala. *Bulletin Volcanologique* 36, 29–45.

- [43] Schmincke, H.-U. (2014). *Vulkane der Eifel*.
- [44] Self, S., Blake, S., Sharma, K., Widdowson, M. & Sephton, S. (2008). Sulfur and chlorine in Late Cretaceous Deccan magmas and eruptive gas release. *Science* 319, 1654–1657.
- [45] Selvaggi, G. & Amato, A. (1992). Subcrustal earthquakes in the northern Apennines (Italy): Evidence for a still active subduction? *Geophysical Research Letters* 19, 2127–2130.
- [46] Wilson, M. (1989). *Igneous Petrogenesis A Global Tectonic Approach*: Springer Netherlands.

Dejan Prelević

IS VOLCANIC HAZARD A THREAT FOR THE AREA OF BALKAN PENINSULA?

S u m m a r y

Due to the existence of an energy gradient between the inner and outer parts of the Earth, the moving tectonic plates shape its surface representing the ultimate mechanism of the generation and destruction of the lithosphere. As in a slow motion, tectonic plates are moving, colliding, and subducting under each other through geological time. These extremely slow and persistent processes are interrupted by volcanic eruptions and earthquakes, which represent the most dramatic manifestations of the geodynamics. The processes of generating magma at high temperatures and pressures are responsible for the crust generation and the formation of volcanoes above deep magma systems. The magma and dissolved gases including H₂O, CO₂, S and halogen elements, move up and play a key role in the formation of numerous ore deposits and in the chemical modification of the atmosphere. The salutary interaction between the magmatic systems and the outer earth spheres has largely constrained the physical and chemical conditions at the surface and ultimately led to the emergence of life on Earth.

On the other hand, explosive volcanic eruptions can have catastrophic consequences. The most recent event provides only a slight idea about the damage a volcano can cause. In April 2010 the Eyjafjallajökull volcano in Iceland erupted a cloud of ash that completely closed the European airspace for almost a week. Although relatively small, this eruption caused the largest air-traffic shut-down since World War II with an estimated two billion dollars of losses suffered by airline companies. Several orders of magnitude larger eruptions than this one had a role in the rise and fall of ancient empires, as well as in the creation of conditions for historical events such as the French Revolution and the rise of fascism in Europe in the nineteenth century.

In the first part of the paper, I give an overview of the main facts that we know about how volcanoes work and what the main mechanisms that generate different products of volcanism are. A short overview of the methods used by scientists at the multidisciplinary level on the problems of volcanism, its genesis, and the possible hazard, is also presented. Today's exploration of volcanoes in a multidisciplinary way links geological, historical, archaeological, and palaeoclimatic evidence in order to tell the stories behind some of the cataclysmic volcanic events. This forensic approach to volcanology is based on the premise that only by fully understanding the past events can valuable lessons be drawn, so that the acquired knowledge may be applied in the event of some future catastrophic volcanic eruptions that will inevitably happen so as to manage their hazards and risks.

In the second part of the paper, the main volcanic districts in the Circum-Mediterranean area are described, with a special emphasis on active and recent volcanism in Italy, Greece and Germany. Bearing in mind the proximity of some active volcanoes, potential hazards that the activity of these volcanoes can cause are also discussed, such as the awakening of the super-volcano Phlegraean Fields (Campi Flegrei) near Naples in the near future.