

Primena vremenski promenljivih graničnih uslova za brzinu konvergencije ploča pri numeričkom modelovanju obdukcije ofiolita

NIKOLA B. STANKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0003-4151-4414

VESNA V. CVETKOV, Univerzitet u Beogradu,
Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
ORCID: 0000-0002-3596-0306

DMITRY D. SIDOROV-BIRYUKOV, Univerzitet u Beogradu,
Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
ORCID: 0009-0005-4860-3585

Originalni naučni rad

UDC: 551.24(497.11)

551.34(497.11)

DOI: 10.5937/tehnika2405549S

2D numeričko geodinamičko modelovanje primenjeno u ovom radu pruža bolji uvid u proces obdukcije dva različita ofiolitska pojasa tokom zatvaranja jednog okeana. Zatvaranje okeana je postignuto nametnutom konvergencijom tektonskih ploča. U postavljenim numeričkim termomehaničkim modelima analiziran je uticaj promenljive brzine kretanja tektonskih ploča. Promenljivost brzine konvergencije je modelovana s ciljem da se kompleksnom evolucijom brzina ploča proizvede obdukcija i trajno smeštanje ofiolita. U osnovi modela je zatvaranje okeana putem plitke intraokeanske subdukcije, pri čemu ploče menjaju intenzitet i smer kretanja. Divergentna faza razvoja dovodi do kratkotrajnog širenja novog okeanskog domena iz kojeg, nakon konačnog zatvaranja, proističu ofioliti jednog od dva ofiolitska pojasa.

Ključne reči: geodinamika, numeričko modelovanje, obdukcija, granični uslovi

1. UVOD

Obdukcija predstavlja geodinamičku pojavu koja predstavlja navlačenje gušćih stena okeanskog porekla preko stena kontinentalne kore. Stene okeanskog porekla, koje se sastoje iz bazalta i gabra okeanske kore (gustine oko 3000 kg/m^3), kao i peridotita omotača (gustine oko 3300 kg/m^3), a koje se nalaze preko granitne kore (gustine oko 2700 kg/m^3) se nazivaju ofiolitima [1, 2]. U kontekstu teorije tektonike ploča, obdukcija ofiolita se dovodi u vezu sa procesima zatvaranja okeana usled subdukcije okeanske litosfere. Subdukcija okeanske litosfere može biti intraokeanska ili subdukcija okean-kontinent.

Iako su različiti fizički mehanizmi za obdukciju ofiolita predloženi u prošlosti [3], ovaj fenomen je dugo bilo teško modelovati numerički. Numeričko geo-

dinamičko modelovanje ima višedecenijsku istoriju [4], međutim, zadnjih godina ova disciplina se primenjuje pri istraživanjima mnogih geoloških i geodinamičkih problema [5, 6]. Tek se u poslednjih deset godina pojavljuju prvi uspešni rezultati numeričkih simulacija procesa obdukcije i trajnog smeštanja ofiolita [7, 8]. U ovim istraživanjima su ustanovljena dva važna faktora koji utiču na uspešno i trajno smeštanje ofiolita: a) reologija stena kontinentalne kore preko koje se vrši obdukcija, b) reverzija brzina kretanja ploča nakon prvobitne obdukcije. Ustanovljeno je da promena brzine kretanja ploča koja je takva da se konvergencija menja u divergenciju, u periodu nakon što je okeanski stenski materijal došao u položaj iznad kontinentalne kore, povoljan po konačno odvajanje obdukovano materijala od ostatka okeana.

S druge strane, ustanovljeno je i da mehanizam kontinentalne ekstruzije, pri čemu se subdukovana kontinentalna kora povlači naviše, može igrati važnu ulogu u trajnom smeštanju ofiolita, pogotovo tzv. dalekoputujućih ofiolita [8].

U nekim slučajevima, na mestima nekadašnjeg zatvaranja okeana, nalaze se dva različita ofiolitska

Adresa autora: Nikola Stanković, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Đušina 7
e-mail: nikola.stankovic@rgf.bg.ac.rs

Rad primljen: 13.09.2024.

Rad prihvaćen: 18.09.2024.

pojasa. Ovo je npr. slučaj u Vardarskoj zoni [9] koja se sastoji od dva ofiolitska pojasa – Zapadne vardarske zone i Istočne vardarske zone. Ovakva pojava se potencijalno može objasniti zatvaranjem dva ili više okeanska domena [10]. Međutim, u slučaju kada se radi o jednom okeanskom domenu, ovakav raspored ofiolita treba objasniti.

Iz tog razloga je u ovom radu istražena mogućnost korišćenja promenljive brzine ploča pri modelovanju smeštanja dva različita ofiolitska pojasa na dve suprotne strane okeana koji se zatvara jednom intraoceanskom subdukcijom. U modelu koji je ovde razvijen, brzina ukupne konvergencije se razvija u sledeće tri faze: konvergencija – divergencija – konvergencija. Istraženo je da li ovakav razvoj, koji dovodi do razvoja intraoceanske subdukcije okeana koji se zatvara, može rezultirati u stvaranju i obdukciji dva ofiolitska pojasa.

U modelima se brzine kretanja ploča uspostavljaju definisanjem internog graničnog uslova za brzinu, pri čemu se određenoj oblasti modela pripisuje vrednost brzine koja će biti promenljiva u vremenu.

2. NUMERIČKE METODE I POSTAVKA MODELA

U ovom radu primenjeno je 2D numeričko geodinamičko modelovanje zasnovano na jednačini kontinuiteta, Stoksovoj jednačini sporog toka, kao i jednačini temperature, odnosno redom:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

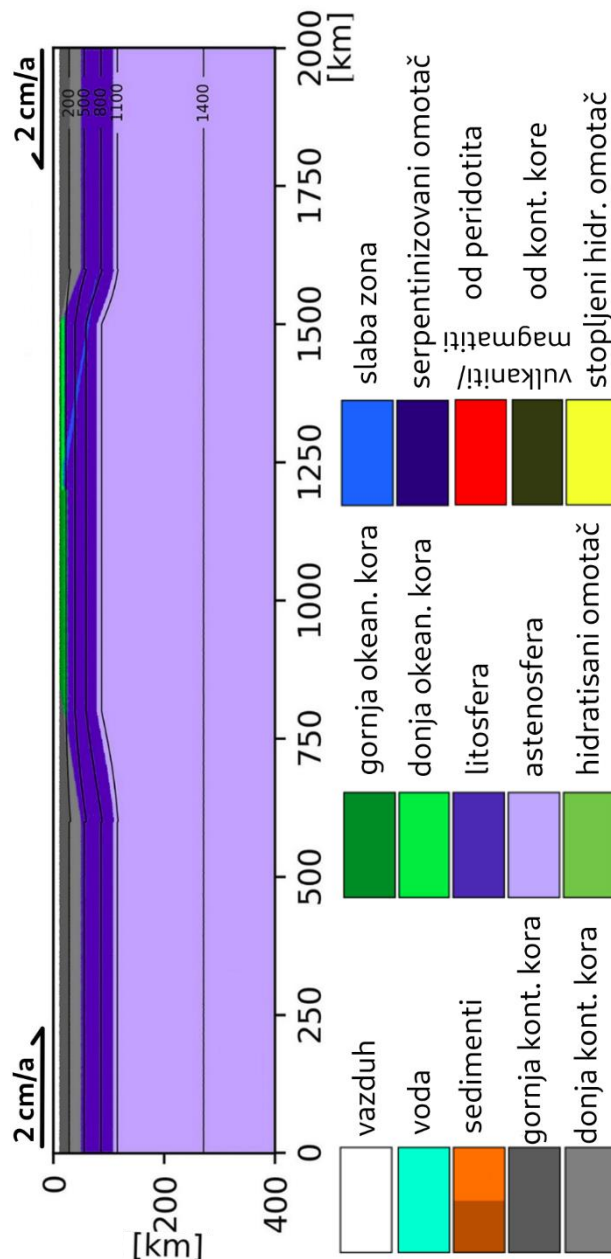
$$\frac{\partial \sigma_{ii}}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} = \rho g_i \quad (2)$$

$$\rho C_P \frac{DT}{Dt} = -\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + H \quad (3)$$

gde je ρ gustina, v brzina, σ_{ij} tenzor stresa, P , pritisak, g_i gravitaciono ubrzanje, T temperatura, C_P toplotna kapacitivnost pri konstantnom pritisku, q_i toplotni fluks, t vreme, a H obuhvata različite toplotne izvore (toplota usled radioaktivnog raspada, adiabatsko zagrevanje ili hlađenje, latentna toplota i viskozno zagrevanje), dok x označava prostornu koordinatu određenu koordinatnim indeksima i, j .

Za diskretizaciju jednačina primenjena je metoda konzervativnih konačnih razlika, a za rešavanje problema advekcije postupak markera u ćeliji. U te svrhe je iskorišćen kod I2VIS [11, 12].

Početna konfiguracija modela (slika 1) se sastoji od početnog kompozicionog polja, polja temperature $T(x,y)$ i polja pritiska $P(x,y)$. Kompoziciono polje predstavlja raspodelu stenskih materijala, i posledično njihovih reoloških parametara (gustine, viskoznosti, aktivacione energije, ugla unutrašnjeg trenja itd) u prostoru.



Slika 1 – Početna konfiguracija modela. Izolinije predstavljaju polje temperature. Različite boje odgovaraju različitim materijalima. Legenda je data sa desne strane

Model predstavlja vertikalnu 2D sekciju veličine 4.000 x 1.400 km i obuhvata litosferu u astenosferu. Horizontalno, model obuhvata dva kontinenta odvojena jednim okeanskim domenom. Okeanski domen predstavlja okeansku litosferu starosti 70 Ma. Kontinentalna kora se sastoji od dva reološki različita sloja iste debljine (po 20 km). Okeanska litosfera se sastoji od okeanske kore (bazalt u gornjoj kori i gabro u donjoj) dok ostatak okeanske litosfere, definisan izotermom od 1600 K čine peridotiti omotača. Temperaturno polje u ostatku omotača prati adijabatski gradijent temperature (geotermalni gradijent) od 0,4 K/km [13].

Gornjoj i donjoj granici su pripisane konstantne temperature, dok su na vertikalnim granicama pripisani izolacioni granični uslovi, odnosno toplotni fluks je jednak nuli u smeru upravnom na granicu. Svi spoljni granični uslovi za brzinu su bez proklizavanja (eng. „free-slip“), odnosno nema prenosa materije preko granica. Na gornjoj granici se simulira slobodna površina metodom lepljivog vazduha („sticky air“) [14]. Gornjih 20 km modela zauzima „vazduh“ dinamičke viskoznosti 10^{18} Pa s.

Konvergencija ploča se u modelu izaziva pripisivanjem internog graničnog uslova za brzinu. Ovo se postiže tako što se veoma uskom ($2\Delta x$) sektoru pripisuje vrednost horizontalne komponente brzine v_x . Ovaj sektor se nalazi na značajnoj udaljenosti od dela modela u kojem se očekuju relevantni rezultati modelovanja. Vrednost v_x se menja dva puta u toku simulacije, pri čemu ona menja znak.

Evolucija brzine konvergencije u modelu je prikazana na slici 2. U periodima kada dolazi do promene (i reverzije) brzina kretanja ploča, brzina se menja linearno.

Reologija stenskih materijala je visko-plastična pri čemu ona prati jednostavni Mor-Kulonov kriterijum. Na visko-plastičnu snagu σ_{yield} stene utiče prisustvo fluida i rastopa tako da [15, 16]:

$$\sigma_{yield} = C + \lambda P \sin \phi_{dry} \quad (4)$$

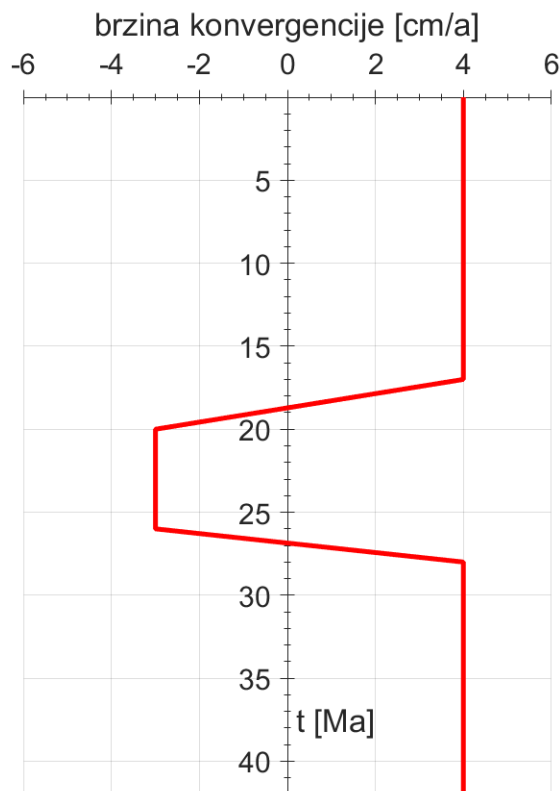
gde je λ faktor slabljenja usled prisustva fluida ili rastopa, P pritisak, ϕ_{dry} ugao unutrašnjeg trenja za suv materijal, a C kompresivna snaga materijala.

Model računa parcijalno stapanje materijala na osnovu definisanih linija solidusa i likvidusa za svaki stenski materijal.

Na osnovu prisustva parcijalno stopljenog materijala, računa se ekstrakcija stopljenog materijala [15]. Ekstrakcija rezultuje u smeštanju magmatita/vulkanita u/na kori. Nova magmatska tela se modeluju stvaranjem novih markera na mestima stvaranja tih tela. Tačna pozicija se određuje na osnovu lokalne vrednosti divergencije [17].

U modelu se vodi računa i o hidrataciji. Na početku simulacije, voda se nalazi u sedimentima, gornjoj kontinentalnoj kori bazaltnom delu okeanske kore.

Procenat vode u porama stena je funkcija dubine. Sadržaj vode u različitim materijalima u modelu su računati na osnovu termodinamičkih baza podataka [16]. Tokom računanja numeričke simulacije primenjuje se jednostavan model računanja erozije i sedimentacije na slobodnoj površini.

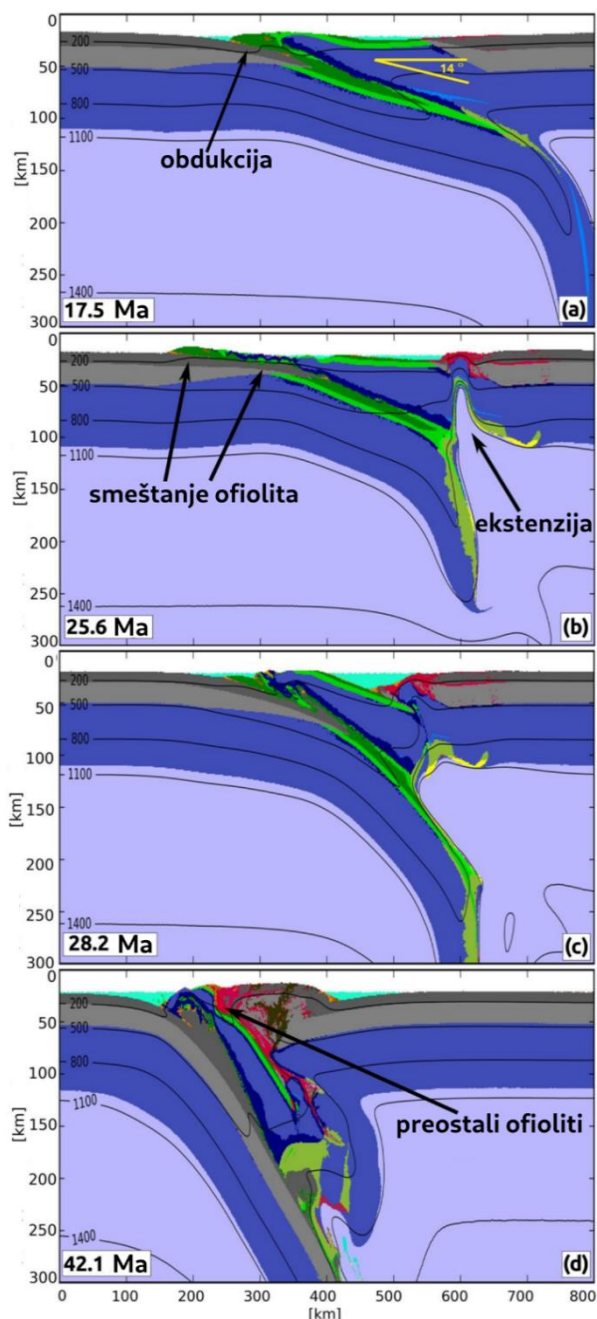


Slika 2 – Promena brzine ukupne konvergencije sa vremenom tokom trajanja simulacije. Period od oko 5 Ma tokom kojeg dolazi do divergencije je povoljan po razvoj riftovanja i stvaranja nove okeanske kore

3. REZULTATI

Razvoj modela u vremenu je prikazan na slici 3. Intraokeanska subdukcija je izazvana po slaboj zoni na osnovu prvobitno nametnute konvergencije od 4 cm/a. Ukupna konvergencija ploča je postignuta pripisivanjem simetričnih brzina kretanja ploča od 2 cm/a. Slaba zona (svetlo-plava boja na slici 3) koja predstavlja orijentisani rased sa padom udesno predstavlja oslabljeni omotač koji je pretrpeo deformacije. Ova zona ima ograničene niske vrednosti dinamičke viskoznosti u opsegu od 10^{18} do 10^{19} Pa s. Kako bi se izazvala plitka intraokeanska subdukcija, nagib ove zone je oko 15 stepeni.

Prvih 17 Ma od početka simulacije odlikuje konvergentni režim koji dovodi do daljeg razvoja plitke intraokeanske subdukcije. Donja okeanska ploča se subdukuje ispod gornje ploče koju čini litosfera istog okeana. Kako je ugao subdukcije mali, donja ploča se takođe podvlači i ispod pasivne margine desnog kontinenta. Tek nakon dostizanja udaljenosti od oko 200 km desno od pasivne margine subdukujuća ploča se povija i dostiže subvertikalni položaj. Ovaj razvoj odgovara vremenu od oko 17 Ma od početka simulacije (slika 3a).



Slika 3 – Vremenska evolucija modela. Polje temperature je prikazano izolinijama. Boje su iste kao na slici 1

Usled pristizanja hidratisanog materijala gornje okeanske kore na značajnu dubinu, dolazi do dehidracije [18] i oslobađanja vode. Ovo dovodi do hidratacije okolnog omotača u subdukcionom klinu. Hidratirani omotač se parcijalno stapa i izaziva magmatizam u okolini pasivne margine desnog kontinenta (slika 3a-c). Zona koja odgovara kori i omotaču direktno ispod i u okolini pasivne margine desnog kontinenta je sada oslabljena usled prisustva fluida i rastopa (faktor λ).

Reverzija brzina kretanja ploča ima uticaja na dalji razvoj simulacije. Nametnuta divergencija dovodi do

toga da se obdukovani stenski materijal okeanskog porekla sada odvaja od ostatka okeanskog domena (slika 3b). Najudaljeniji delovi obdukovane okeanske kore (kao i u manjoj meri peridotitskog omotača) se trajno smeštaju preko kontinentalne kore. Ovo se dešava usled viskoznog srastanja dva materijala (obdukovanih ofiolita i kontinentalne kore), pri čemu divergencija dovodi do dodatnog istanjivanja veze ovih ofiolita sa ostatkom okeana i konačnog odvajanja.

Nametnuta divergencija dovodi do izazivanja ekstenzije u gornjoj ploči. Ova ekstenzija se javlja na mestu koje je u prethodnom periodu oslabljeno usled hidratacije i migracije rastopa (slika 3b). Vrednosti faktora slabljenja λ_f (prisustvo fluida) i λ_m (prisustvo rastopa) od 0,1 određuju smanjenje plastične snage oslabljene zone. Održavanje divergentnog kretanja narednih 5 Ma, dovodi do razvoja ove ekstenzije. Ovaj razvoj se ogleda u riftovanju pasivne margine desnog kontinenta, što je praćeno astenosferskim uzdizanjem, i dodatnim magmatizmom. Divergencija dovodi do stvaranja nove, veoma uske zone okeanske litosfere. Tokom divergentne faze najdublji delovi subdukovane ploče, odnosno oni njeni delovi koji su se nalazili u subvertikalnom položaju, počinju da se odvajaju od plićih delova iste ploče. Ovo kidanje ploče se dešava na dubini od oko 220 km. Plići delovi subdukovane okeanske litosfere ostaju u položaju koji je definisan malim uglom nagiba od oko 20 stepeni (slika 3b).

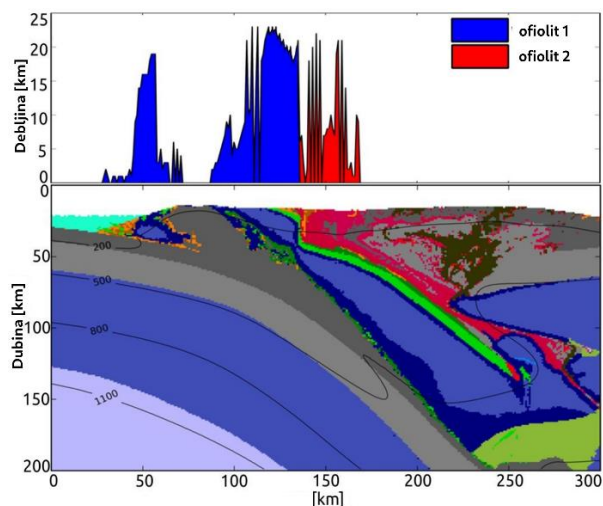
Ponovnom reverzijom brzina na 28 Ma od početka simulacije, iznova se nameće konvergencija između ploča. Ovaj kompresioni režim dovodi do zatvaranja uskog okeanskog domena i aktiviranja nove subdukcije preostalog dela okeanske litosfere (slika 3c). Nova subdukcija se inicira po prethodno oslabljenoj zoni koja se nalazi na mestu kratkotrajnog širenja okeanskog dna u prethodnom periodu. Održavanje konvergentnog režima dovodi do razvoja subdukcije preostalog dela okeanske litosfere i do konačnog zatvaranja okeana.

Poslednji delovi evolucije modela se ogledaju u konačnom zatvaranju okeana. Ovo se dešava usled održavanja konvergencije do kraja simulacije. Zatvaranje je praćeno subdukcijom kontinentalne kore levog okeana. Delovi gornje kontinentalne kore se aktiviraju na dubinama od oko 150 km i počinju da se uzdižu naviše (slika 3d). Ovaj mehanizam kontinentalne ekstruzije, konačno smešta preostale ofiolite trajno na površini, u blizini kontakta dva okeana. Na kraju simulacije trajno su obdukovana dva različita ofiolitska pojasa.

4. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Modelovanje u ovom radu je pokazalo da promeljiva brzina konvergencije pozitivno utiče na obdukciju dva različita ofiolitska pojasa (slika 4). Razvoj

konvergencije ploča u tri faze je omogućio da se intraokeanskom subdukcijom zatvori okean, pri čemu dolazi do obdukcije okeanske litosfere na levi kontinent. Istovremeno, usled nametnute divergencije tokom 5 Ma, na pasivnoj margini desnog kontinenta dolazi do ekstenzije i stvaranja okeanskih stena koje se u finalnim fazama razvoja obdukuju.



Slika 4 - Rasprostranjenost obdukovanih ofiolita na kraju simulacije. Debljine su date na gornjem panelu. Dva različita ofiolitska pojasa su označena plavom i crvenom bojom

Slabljenje gornje ploče usled prisustva fluida i rastopa je u velikoj meri odgovorno za mesto izazivanja ekstenzije. Vreme izazivanja ekstenzije kasni za vremenom nametanja divergencije nekoliko miliona godina. Uspostavljeni divergentni režim prvo dovodi do otkidanja duboko subdukovanih delova okeanske litosfere. Tek nakon 4 Ma, dolazi do istanjivanja gornje ploče i uzdizanja astenosfere (uporediti slike 2 i 3b).

Rezultat ovog modelovanja govori da kompleksna evolucija kretanja ploča može imati važne posledice po obdukciju i trajno smeštanje ofiolita. Ovo je posebno važno za slučajeve gde se dva različita ofiolitska pojasa nalaze jedan pored drugog, a posledica su zatvaranja jednog okeana npr. Vardarska zona [9].

5. ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija preko Ugovora br. 451-03-66/2024-03/200126.

LITERATURA

- [1] Dilek Y, & Furnes H. Ophiolites and their origins. *Elements*, 10(2), 93-100, 2014.
- [2] Coleman R. G. & Coleman R. G. *What is an Ophiolite?* (pp. 1-7). Springer Berlin Heidelberg, 1977.
- [3] Moores E. M. Origin and emplacement of ophiolites. *Reviews of Geophysics*, 20(4), 735-760, 1982.
- [4] Turcotte D. L. & Schubert G. *Geodynamics*. Cambridge university press, 2002.
- [5] Gerya T. Future directions in subduction modeling. *Journal of Geodynamics*, 52(5), 344-378, 2011.
- [6] Gerya T. Numerical modeling of subduction: State of the art and future directions. *Geosphere*, 18(2), 503-561, 2022.
- [7] Duretz T, Agard P, Yamato P, Ducassou C, Burov E. B. & Gerya T. V. Thermo-mechanical modeling of the obduction process based on the Oman ophiolite case. *Gondwana Research*, 32, 1-10, 2016.
- [8] Porkoláb K, Duretz T, Yamato P, Auzemery A. & Willingshofer E. Extrusion of subducted crust explains the emplacement of far-travelled ophiolites. *Nature Communications*, 12(1), 1499, 2021.
- [9] Schmid S. M. Bernoulli D, Fügenschuh B, Matenco L, Schefer S, Schuster R, ... & Ustaszewski K. The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss Journal of Geosciences*, 101, 139-183, 2008.
- [10] Robertson A, Karamata S. & Šarić K. 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(1-4), 1-36, 2009.
- [11] Gerya T. V. & Yuen D. A. Characteristics-based marker-in-cell method with conservative finite-differences schemes for modeling geological flows with strongly variable transport properties. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 140(4), 293-318, 2003.
- [12] Gerya T. V. & Yuen D. A. Robust characteristics method for modelling multiphase visco-elasto-plastic thermo-mechanical problems. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 163(1-4), 83-105, 2007.
- [13] Katsura, T. A revised adiabatic temperature profile for the mantle. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(2), e2021JB023562, 2022.
- [14] Crameri F, Schmeling H, Golabek G. J, Duretz T, Orendt R, Buitter S. J. H, ... & Tackley P. J. A comparison of numerical surface topography calculations in geodynamic modelling: an evaluation of the 'sticky air' method. *Geophysical Journal International*, 189(1), 38-54, 2012.
- [15] Gerya, T. V., & Meilick, F. I. (2011). Geodynamic regimes of subduction under an active margin: effects of rheological weakening by fluids and melts. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(1), 7-31.1
- [16] Baitsch-Ghirardello B, Gerya T. V. & Burg J. P. Geodynamic regimes of intra-oceanic subduction: Implications for arc extension vs. shortening processes. *Gondwana Research*, 25(2), 546-560, 2014.

- [17] Vogt K, Gerya T. V. & Castro A. Crustal growth at active continental margins: Numerical modeling. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 192, 1-20, 2012.
- [18] Schmidt M. W. & Poli S. Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1-4), 361-379, 1998.

SUMMARY

APPLICATION OF THE TIME-DEPENDENT BOUNDARY CONDITIONS FOR CONVERGENCE VELOCITY FOR MODELLING OF OPHIOLITE OBDUCTION

2D numerical geodynamic modelling applied in this paper gives a better insight into the process of obduction of two distinct ophiolite belts during the closure of a single ocean. Closure of the ocean is achieved by imposed convergence of the tectonic plates. In the created numerical thermomechanical models, the influence of the variable velocity of the tectonic plate motions is analyzed. Convergence rate variation is modelled with the goal of achieving obduction and the permanent emplacement of ophiolites via complex evolution of the plate velocities. The basis of the model is the closure of an ocean through a flat intra-oceanic subduction, during which the plates change intensity and direction of their motion. Divergent phase of the evolution leads to the short-lived spreading of the new oceanic domain in from which, after the final closure, one of the two ophiolite belts originates.

Key Words: *geodynamics, numerical modelling, obduction, boundary conditions*