Modelovanje geotermičke evolucije sedimentnih stena istočne Hercegovine na osnovu refleksije vitrinita

NIKOLETA M. ALEKSIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Originalni naučni rad
UDC: 552.5:553.065(497.6)
DOI: 10.5937/tehnika2106747A

U radu su prikazani prvi rezultati modelovanja geotermičke evolucije sedimentnih stena istočne Hercegovine i maturacije organske supstance na osnovu refleksije vitrinita. Modelovanje konsedimentacije i geotermičke istorije izvršeno je uz pomoć softvera „SimpleMat“ u kome je korišćen poznati kinetički model refleksije vitrinita – EASY %Ro. Usaglašavanjem rezultata izmerenih i proračunatih refleksija vitrinita došlo se do zaključka da je intenzitet erozije u istražnom području bio oko 900 m, a da se prvo generisanje nafte u ovom području moglo odigrati pre oko 100 miliona godina. Prema utvrđenom modelu maturacije, koji uključuje dodatnu debljinu i kasniju eroziju paleogena, sedimenti gornjeg trijasa dostižu stepen zrelosti koji odgovara refleksiji vitrinita od 0,70 do 1,1% Rr, sedimenti donje jure od 0,62 do 0,70% Rr, a sedimenti gornje krede od 0,40 do 0,60% Rr što je u skladu sa izmerenim vrednostima refleksije vitrinita u 23 uzorka. Budući da se u konkretnom slučaju može uzeti da početku katageneze odgovaraju refleksije vitrinita od 0,50% Rr, svi analizirani mezozojski uzorci nalaze se na katagenetskom stadijumu, tj. u „naftnom prozoru“, a kenozojski u diagenezi.

Ključne reči: nafta, termička zrelost, geotermičko modelovanje, refleksija vitrinita, istočna Hercegovina

1. UVOD

Područje istočne Hercegovine nalazi se u jugoistočnom delu Bosne i Hercegovine (Republika Srpska), a u geološkom smislu pripada spoljašnjim Dinariidima, odnosno području Karbonatne platforme (slika 1). S obzirom na složenu geološku građu ovog prostora i velike rizike istraživanja nafte, do danas je samo nekoliko kompanija obavilo preliminarna naftno-geološka istraživanja – bez dubokog bušenja.

Početnu fazu u istraživanju nafte i gasa nekog područja predstavlja određivanje stepena termičke zrelosti organske supstance pri čemu je važno utvrditi i geotermičku evoluciju mogućih matičnih stena kako bi se sagledalo da li je i kada moglo da dođe do generisanja nafte. U ovom radu, stepen zrelosti organske supstance sedimenta istočne Hercegovine utvrđen je merenjem refleksije vitrinita u 23 odabrana uzorka mezozojske i kenozojske starosti, a geotermička evolu-

cija je sagledana softverskim modelovanjem.

Modelovanje konsedimentacije i geotermičke evolucije sedimenta kao i usaglašavanje izmerenih i proračunatih vrednosti refleksija vitrinita, izvršeno je korišćenjem softvera „SimpleMat“ [1] pri čemu je primenjen opšteprihvaćeni kinetički model refleksije vitrinita – EASY % Ro [2], kao napredniji i tačniji model od prvobitno korišćenog vremensko-temperaturnog TTI modela [3, 4]. Uspešna 1D modelovanja geotermičke evolucije softverom „SimpleMat“ do danas su vršena prvenstveno za Panonski basen [5] [6], dok se u ovom radu daju prvi rezultati modelovanja za bitno drugačije područje – istočne Hercegovine.

Pri modelovanju geotermičke evolucije, za postavku početnog tj. „konceptualnog“ geološkog modela neophodno je obuhvatiti podatke i parametre koji se odnose na reperne stratigrafske jedinice, njihovu apsolutnu starost, litološki sastav, debljinu, relativnu dubinu, površinsku temperaturu i geotermalni gradijent. Poređenje vrednosti proračunate refleksije vitrinita (EASY %Ro) koje proističu iz konceptualnog modela, sa vrednostima merenja refleksije (%Rr) pokazuje da li postavljeni model odgovara realnoj geološko-geotermičkoj situaciji ili je neophodno izvršiti modifikacije. Ukoliko se model geotermičke evolucije i

Adresa autora: Nikoleta Aleksić, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu, Beograd, Dušina 7

e-mail: nikoleta.aleksic@rgf.bg.ac.rs

Rad primljen: 01.12.2021.

Rad prihvaćen: 03.12.2021.

konceptualni model dobro uklapaju može se reći da ulazni podaci i parametri za konceptualni model tokom geološke istorije nisu izmenjeni, iako oni ne moraju uvek biti i potpuno tačni. Ukoliko se, međutim, konceptualni i realni geološki model loše uklapaju potrebno je izmeniti pojedine vrednosti ili ključne parametre. Izmene se mogu odnositi na geotermalni gradijent, repertu temperaturu, toplotnu provodljivost ili toplotni tok, litološki sastav, petrofizička svojstva, postojanje i trajanje hijatusa ili intenzitet erozije [7, 8].

Testiranje i analiza izlaznih rezultata modela predstavlja ključni korak geotermičkog modelovanja. Procedure koje se u tom kontekstu najčešće koriste su: optimizacija tj. kalibracija modela, provera kalibracije i analiza osetljivosti [9, 10, 11].

Optimizacija uključuje izmene i prilagođavanje ulaznih podataka zadržavajući oba geološka modela – i konceptualni i simulacioni, nakon čega slede ponovne kalkulacije novih rešenja koja se upoređuju sa podacima izmerenih vrednosti. Ova procedura poznata je pod nazivom „metoda probanja“ (engl. „trial and error“) koja obično uključuje uzastopne promene različitih ulaznih podataka, sve do dobijanja prihvatljivih rezultata. Optimizacija modela stoga zahteva skup

ulaznih podataka koji su najpribližniji ili se potpuno poklapaju sa opserviranim i izmerenim podacima [7].

Zbog presudnog uticaja temperatura na rezultate modelovanja basena, optimizacija tj. kalibracija geotermičke evolucije je gotovo uvek neophodna. Najveća tačnost takvih kalibracija postiže se poređenjem rezultata merenja refleksije vitritita sa rezultatima njenog proračuna tj. njene numeričke simulacije [7]. Izmenama konceptualnog modela koje dovode do ostvarivanja poklapanja tih vrednosti, tj. „usaglašavanjem“ proračunatih i izmerenih vrednosti refleksije vitritita, dolazi se do detaljne i srazmerno precizne rekonstrukcije konsedimentacione i geotermičke istorije i saznanja o najverovatnijim promenama koje su se dešavale tokom evolucije basena, a koje ne moraju biti očigledne.

2. GEOLOŠKA GRAĐA I GEOTERMIČKE KARAKTERISTIKE

Područje spoljašnjih Dinarida u sklopu kojeg se nalazi Jadranska karbonatna platforma, a kome pripada prostor istočne Hercegovine, prošlo je kroz nekoliko razvojnih geoloških faza, koje su podrazumevale snažne tektonske procese.

Slika 1 – Geološki prikaz terena i profil istražnog područja istočne Hercegovine (delom prema [12, 13 i 14])

Istražno područje istočne Hercegovine (slika 1) u strukturno-tektonskom smislu pripada Dalmatinsko-hercegovačkoj zoni [15] odnosno kako su pojedini autori definisali zoni Visokog Krša [16], koja je pretežno predstavljena karbonatnim tvorevinama. Ova

zona je smeštena između zone Budva i Sarajevske sigmoidne, odnosno zone Prekarsta [16].

Dalmatinsko-hercegovačka zona predstavlja zonu koja je tokom anizijskog kata bila jako diferencirana. Najstarija stratigrafska jedinica istražnog područja,

nalazi se u jezgru antiklinale Lastva i predstavljena je sedimentima trijasa [17], a čine je tamnosivi krečnjaci, karbonatni šejlovi, kao i proslojci uglja praćeni laporcima sa organskom materijom (slika 2). Sedimenti jure odlikuju se tamno-sivim krečnjacima kao i laporcima [17, 18] iz dva tektonska bloka: Visokog Krša i Prekarsta, što je slučaj i kod sedimenata trijasa. Sedimenti krede, koji pokrivaju najveći deo istražnog područja predstavljani su prvenstveno plitkovodnim tanko uslojenim krečnjacima sa organskom materijom [17].

Slika 2 – Sinteza geološkog stuba područja istočne Hercegovine

Sedimentne stene eocena karakterišu pretežno laporci i ugljeviti laporci dok se miocen odlikuje konglomeratima, pešćarima i ugljenim slojem sa laporcima u domenu Gatačkog basena [17].

Period od srednje jure do kasne krede predstavlja glavni sedimentni ciklus u kom je došlo do taloženja velike količine karbonata na području Jadranske karbonatne platforme, debljine preko 5 km [19]. Svi sedimenti na prostoru istočne Hercegovine koji se danas nalaze na površini terena su pre kompresije i izdizanja bili na znatno većim dubinama, pri čemu su nakon izdizanja u poslednjih 20-30 miliona godina pretrpeli i značajnu eroziju.

U karbonatnim sedimentnim basenima, kojima odgovara i područje istočne Hercegovine, geotermalni gradijenti su znatno niži od onih koji u dominantno klastičnim basenima, s obzirom da usled velike toplotne provodljivosti karbonata, toplota znatno brže dospeva na površinu. S tim u vezi, organska supstanca u sedimentnim basenima karbonatnog razvića ima niži stepen transformacije pri istom toplotnom toku [20]. Na prostoru Hercegovine vrednosti geotermalnog gradijenta iznose oko 2,5 °C/100 m dok toplotni tok varira od 60 do 88,7 mW/m² [21]. Navedene vrednosti odnose se na prostor aktivnog kontinentalnog oboda dok su nešto niže vrednosti registrovane u domenu ofiolitske zone i pasivnog kontinentalnog oboda. Temperature i geotermalni gradijenti u domenu Karbonatne platforme najbolje su sagledani na osnovu jedne duboke bušotine u Bosni i Hercegovini i deset bušotina na prostoru Hrvatske i Crne Gore [21].

Na osnovu navedenih saznanja, za postavku konceptualnog geološkog modela istočne Hercegovine usvojen je geotermalni gradijent od 2,5°C/100 m sa prosečnom površinskom temperaturom od 14°C. Ulazni podaci koji su korišćeni pri modelovanju konsedimentacije i geotermalne istorije u softveru „SimpleMat“ prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1. Ulazni podaci i parametri za postavku konceptualnog modela u softveru „Simplemat“

Stratigrafska pripadnost	Aps. starost "trajanje" (Ma)	Litološki sastav	Maksimalna debljina (m) i "relativna dubina" (m)	Max. T (°C)
Kvarter + miocen	*23	Laporci, ugljeni sloj sa laporcima, konglomerati	360	23
Oligocen	23	HIJATUS		
Eocen	*11	Laporci, ugljeviti laporci, laporci sa OM, proslojci krečnjaka	500	
Paleocen	56	HIJATUS		27
Gornja kreda	*10	Tankoslojeviti krečnjaci sa organskom materijom	*860*	
Donja kreda	66	HIJATUS		36
Srednja i gornja jura	*34	HIJATUS		
Donja jura	1500	HIJATUS		
Gornji trijas	*45	Tamno-sivi krečnjaci i karbonatni šejlovi sa proslojcima uglja	*2360*	72
	100	HIJATUS		
	145	HIJATUS		
	*29	HIJATUS		85
	174	HIJATUS		
	*27	HIJATUS		
	201	HIJATUS		135
	*36	HIJATUS		
	237	HIJATUS		

3. METODE I UZORCI

Primenjene metode su obuhvatile numeričke simulacije tj. proračun refleksije vitrinita u softveru „SimpleMat“ – preko kinetičkog modela EASY %Ro, kao i mikroskopska merenja refleksije vitrinita (%Rr) na 23 uzorka starosti od trijasa do miocena.

3.1 Kinetički model refleksije EASY %Ro

Iako je u prošlosti bilo više pokušaja da se model EASY %Ro [2] unapredi i zameni nekim drugim, ovaj kinetički model predstavlja do danas najpouzdaniji metod proračuna refleksije vitrinita. Model koristi dobro poznatu Arenijusovu jednačinu hemijske kinetike uz algoritam sa setom paralelenih reakcija („pseudo-aktivacionim energijama“). EASY %Ro je razrađen zahvaljujući detaljnim laboratorijskim analizama i ispitivanjima promena vitrinita tokom porasta temperature u vrlo širokom opsegu [2]. Na prvobitnom kinetičkom modelu refleksije vitrinita, nazvanom „VITRIMAT“ [22] izvršena je dalja optimizacija koja je omogućila znatno jednostavniji i danas široko prihvaćeni model – EASY %Ro.

Model EASY %Ro koristi aktivacione energije $E = 34 - 72$ kcal/mol., dok Arenijusov frekventni faktor iznosi $A = 1 \times 10^{13}$ /s. Karakteristika tog modela ogleda se u izuzetnom dobrim rezultatima u velikom opsegu brzine zagrevanja, od onih u laboratorijskim uslovima – od 1 °C/nedeljno, do onih u realnim geološkim uslovima koje uključuju raspon od 1 °C/Ma do 100 °C/10³ godina. Za uspešnu primenu modela EASY %Ro, ključni su vremenski intervali (u Ma) koje je neka geološka jedinica provela u određenom temperaturnom intervalu [2], zbog čega softverska simulacija konsedimentacione i termičke istorije daje veoma tačne i precizne rezultate. Osim značajne primene u malo istraživanim basenima, u kojima nije bilo bušenja, model EASY %Ro ima široku primenu za složene rekonstrukcije geotermičke istorije kroz postupak inverznog modelovanja, tj. usaglašavanja sa izmerenim refleksijama vitrinita – u slučajevima kada su uzorci za merenje dostupni.

Budući da softver „SimpleMat“ osim rekonstrukcije konsedimentacione i geotermičke istorije omogućava automatizovani proračun i prikaz izolinija vremensko-temperaturnog indeksa TTI i refleksije vitrinita po modelu EASY %Ro, za geotermičko modelovanje i sagledavanja maturacije organske supstance kroz vreme primenjen je upravo parametar EASY %Ro.

3.2 Merenje refleksije vitrinita

Vitrinit predstavlja glavni maceral ugljeva nastao pretežno od humusnih gelova koji vode poreklo od lignina i celuloze, kao i od drugih delova viših biljaka. Vitrinit kao katagenetski ekvivalent huminita odgovara rangu kamenih ugljeva, sa refleksijom preko 0,50 %

Rr [23, 24 i 25]. Refleksija vitrinita (% Rr) zasniva se na merenju odbijene normalne svetlosti reflektovane od uglačane površine čestica vitrinita/huminita. Refleksiona merenja vrše se sa imerzionim uljem indeksa prelamanja 1,518 pri talasnoj dužini od 546 nm [26]. Optimalna temperatura za merenje refleksije vitrinita je oko 24°C. Uopšte uzevši, početak generisanja nafte (početak „naftnog prozora“) odgovara refleksiji vitrinita od 0,50 do 0,60 % Rr [2, 6, 27], pri čemu je zbog specifičnosti brzine zagrevanja i zapaženih tipova kerogena [14] vrednost od 0,50 % Rr korišćena u radu kao granična.

Za merenje refleksije vitrinita u uzorcima istočne Hercegovine korišćen je savremeni motorizovani mikroskop „Zeiss“ Axio Imager 2 sa digitanom kamerom i softverom za merenje refleksije „FOSSIL“, uljno-imerzioni objektiv uvećanja 50x, pri čemu je merena slučajna refleksija (% Rr) koja ne obuhvata traženje minimalne i maksimalne vrednosti. Za kalibrisanje aparature korišćena su dva standarda sa refleksijom 0,899 % Rr i 0,001 % Rr. Merenje je izvršeno na Rudarsko-geološkom fakultetu, u Laboratoriji za istraživanje mineralnih sirovina Departmana za ekonomsku geologiju.

Merenje refleksije vitrinita izvršeno je na 23 površinska uzorka sedimenata mezozojske i kenozojske starosti, pri čemu su obuhvaćene stratigrafske jedinice od najstarijih trijaskih do neogenih. Uzorkovani sedimenti odlikuju se uglavnom povišenim sadržajem organske supstance, tamnijom bojom, a najčešće su uzimani na usecima puteva i mestima gde je bio smanjen uticaj površinskog raspadanja i drugih spoljašnjih faktora koji bi mogli znatno da izmene organsku materiju prisutnu u sedimentima [28].

Uzorci najstarijih sedimenata gornjeg trijasa (karna) uzeti su sa četiri lokaliteta, pri čemu se tri iz domena antiklinale Lastva odlikuju tamno sivim šejlovima i krečnjacima sa proslojcima ugljevit gline. Avtovac, kao četvrti lokalitet na kom su uzorkovani sedimenti trijasa nalazi se u drugom tektonskom bloku, zoni Prekarsta (istočno od Gacka), a karakterišu ga tankoslojevit bituminozni krečnjaci i laporci.

Sedimenti jure (lijasa) uzorkovani su u domenu antiklinale Lastva i Avtovaca (zona Prekarsta) a, odlikuju se tamno-sivim laminiranim krečnjacima i laporcima sa organskom materijom.

Sedimenti krede (donjeg turona) su uzeti na 7 lokaliteta na potezu Trebinje-Gacko. Uzorkovani sedimenti se odlikuju pretežno tankoslojevitim krečnjacima sa vidljivom organskom materijom najčešće prisutnom u vidu izraženih tamnijih lamina.

Eocenski sedimenti prikupljeni su u severnom delu istražnog područja, a karakterišu se laporcima sa proslojcima ugljevit materije, dok je kao predstavnik

sedimenata miocena analiziran uzorak uglja iz Gatačkog basena [14].

4. REZULTATI

4.1 Kinetičko modelovanje – konceptualni model

Konceptualni geološko-geotermički model za područje istočne Hercegovine urađen je primenom raspoloživih podataka koji se odnose na prosečnu godišnju površinsku temperaturu, usvojeni geotermalni gradijent iz šireg područja kao i utvrđene debljine i

odgovarajuće prvobitne relativne dubine izdvojenih stratigrafskih jedinica u istražnom prostoru. Za postavku modela primenjen je geotermalni gradijent od $2,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ kao i srednja vrednost površinske temperature od 14°C , mada je izvesno da je u prošlosti temperatura bila i znatno viša (posebno u kredi). Korišćene debljine, na osnovu kojih su rekonstruisane i dubine (tabela 1), za jedinice mezozojske stratigrafske pripadnosti uzete su sa shematskog profila istražnog prostora prikazanom na slici 1.

Slika 3 – Ekranski prikaz softvera „SimpleMat“ sa rezultatima postavljenog konceptualnog modela. Crvene linije predstavljaju izolnije proračunate refleksije vitrinita po modelu EASY %Ro

Na slici 3 dat je ekranski prikaz softvera „SimpleMat“ i konkretnih rezultata proračuna refleksije vitrinita kinetičkim modelom EASY %Ro koji se dobijaju na osnovu postavljenog konceptualnog modela, bez vršenja ikakvih modifikacija, a kod koga maksimalna rekonstruisana relativna dubina sedimenata dostiže 4.860 m. Prema rezultatima termičke evolucije koji se dobijaju na konceptualnom modelu istočne Hercegovine, sedimente gornjeg trijasa bi trebalo da odlikuju refleksije vitrinita od 0,53 do 1,00 % Rr, sedimente donje jure od 0,48 do 0,53 % Rr, dok za sedimente gornje krede ne bi trebalo očekivati zrelost veću od 0,48 % Rr. Sedimente paleogena i neogena bi prema rezultatima koji se dobijaju na konceptualnom modelu odlikovala refleksija vitrinita od oko 0,30 % Rr ali takođe i niže vrednosti.

4.2 Merenje refleksije vitrinita

U svim analiziranim uzorcima u kojima je vršeno merenje refleksije vitrinita dominira karbonatna i znatno manje karbonatno-glinovita mineralna materija u kojoj je utvrđen visok sadržaj pirita. U uzorcima jure i

krede zapažena je i česta pojava framboidalnog pirita. Takođe, u većini uzoraka prisutan je i čvrsti granulirani bitumen koji ispunjava pukotine – pretežno u karbonatnoj mineralnoj materiji (jura i trijas). Kod uzorka eocena usled nedostatka čestica vitrinita merenja su vršena na densinitu, dok je kod miocenskog lignita najveći broj merenja izvršen na atrinitu.

Rezultati merenja refleksije u svim uzorcima mezozojske starosti, od trijasa do krede, pokazuju da se oni nalaze na stadijumu katageneze. Merenje refleksije vitrinita u sedimentima trijasa izvršeno je na 5 uzoraka sa ukupno 779 tačaka merenja. Na osnovu sumarnih rezultata svih merenja (slika 4), sedimenti trijasa (karna) odlikuju se zrelošću koja odgovara opsegu vrednosti srednjih refleksija vitrinita od 0,58 do 0,78% Rr (zbirna srednja vrednost 0,68% Rr).

Za sedimente jure merenje refleksije vitrinita obuhvatilo je 4 uzorka sa ukupno 256 tačaka merenja. Izmerene srednje vrednosti refleksije imaju opseg od 0,58 do 0,65% Rr, dok zbirna srednja vrednost za jurske sedimente iznosi 0,62 % Rr. Sedimenti krede

(donjeg turona) odlikuju se izmerenim prosečnim vrednostima od 0,53 do 0,54% Rr (zbirna srednja vrednost 0,54 % Rr) pri čemu je izvršeno merenje na 141 tački u tri analizirana uzorka sa reletivno sitnim fitoklastima.

Srednja refleksija ispitivanog uzorka eocena iznosi 0,38% Rr (huminit), a obuhvaćeno je 456 tačaka merenja. Na uzorku uglja Gatačkog basena izvršeno je merenje na 405 tačaka pri čemu srednja refleksija huminita ima vrednost od 0,34 % Rr (lignit).

Prema izmerenim vrednostima refleksije vitrinita svi ispitivani uzorci mezozojske starosti nalaze se na početku katageneze organske supstance (u naftnom prozoru), dok kenozojske sedimente odlikuje stadijum dijageneze. Rezultati merenja refleksije vitrinita uzoraka istočne Hercegovine prikazani su grafički na osnovu zbirnih reflektograma svih merenja – sumiranih po stratigrafskim jedinicama (slika 4).

Slika 4 – Zbirni histogrami merenja refleksije vitrinita (iz svih uzoraka) sumirani po stratigrafskim jedinicama

4.3 Usaglašavanje i finalizacija modela

Budući da početno proračunate vrednosti refleksije vitrinita iz konceptualnog modela (slika 3) dobijene primenom EASY %Ro nisu bile u dobroj saglasnosti

sa izmerenim refleksijama vitrinita, pojedini ulazni parametri su morali da se izmene kako bi se rezultati simulacionog modela korigovali. U postupku usaglašavanja proračunatih i izmerenih današnjih vrednosti refleksije vitrinita, varirani su različiti parametri, pri čemu je najbolji rezultat tj. najveće poklapanje ostvareno kada je u model maturacije uvedena dodatna početna debljina paleogena od 900 m. Uz podrazumevanje da je ta sekvenca kasnije erodovana, od tih dodatnih 900 m debljine pretpostavljeno je da je tokom oligocena bilo istaloženo 500 m, a tokom eocena i paleocena po 200 m sedimenata.

Uvođenjem dodatne debljine i kasnije erozije paleogena od 900 m, finalni kalibracioni model (slika 5) pokazuje da sedimenti gornjeg trijasa u području istočne Hercegovine dostižu refleksiju vitrinita od 0,7 do 1,1% Rr, donje jure od 0,62 do 0,7% Rr i gornje krede od 0,40 do 0,60% Rr, što je sve u skladu sa izmerenim vrednostima. Mezozojski sedimenti koji su danas na površini i u kojima je merena refleksija vitrinita, nalazili su se prema rezultatima modela na relativnoj dubini od 2.600 m (donji turon) do oko 4.000 m (karn) i temperaturama od 80 do 115 °C (slika 5).

Slika 5 – Kalibracioni model geotermičke evolucije i maturacije organske supstance sedimenata istočne Hercegovine – sa dodatnom debljinom paleogena

Ako se za početak „naftnog prozora“ uzme granica od 0,50% Rr, generisanje nafte iz sedimenata najstarijeg zastupljenog (gornjeg) trijasa moglo je da otpočne pre oko 100 miliona godina na dubini od oko 3000 m i temperaturi od 95°C, dok je kod viših delova trijasa (karna) generisanje nafte moglo započeti pre oko 70 miliona godina na dubini od 2.800 m i temperaturi od oko 85°C. Generisanje nafte za sedimente

starije donje jure moglo je da otpočne pre oko 70 miliona godina na dubini od oko 2.800 m i temperaturi od 85°C, dok se za njene više delove vezuje početak generisanja nafte od pre oko 30 miliona godina na dubini od oko 2.600 m i temperaturi od 80°C. Za sedimente gornje krede početak generisanja nafte može se, slično kao i kod jure, vezati za period oligocena i relativne dubine od oko 2700 m, sa temperaturom od oko 85°C.

Mlađi sedimenti krede i kenozoika nisu do danas dostigli katagenetski stadijum organske supstance, tj. dovoljan stepen zrelosti za generisanje nafte i gasa.

5. ZAKLJUČAK

Modelovanje geotermičke evolucije sedimenata istočne Hercegovine i maturacije organske supstance kroz vreme izvršeno je korišćenjem softvera „Simple-Mat“ pri čemu je primenjen kinetički model refleksije vitritina EASY %Ro. Na osnovu postavljenog konceptualnog geološkog modela korigovana su neslaganja izmerenih i proračunatih vrednosti refleksija vitritina, čime je izvršena kalibracija i finalizacija modela.

Kako bi se usaglasile vrednosti izmerenih i proračunatih refleksija na osnovu modela EASY %Ro, a budući da je poznato da su na prostoru istočne Hercegovine tokom oligocena odigrani snažni tektonski procesi u vidu kompresija, izdizanja dubljih slojeva i naknadnih navlaćanje, uz erodovanje terena, u model maturacije uvedena je dodatna debljina sedimentnih stena paleocena, od 900 m, pri čemu je sedimentima oligocena dodata debljina od 500 m, a sedimentima eocena i paleocena od po 200 m. Postavkom novog geotermičkog modela maturacije koji uključuje dodatnu debljinu kenozoika, postignuta je dobra saglasnost izmerenih i proračunatih vrednosti refleksija vitritina.

Prema rezultatima kalibracionog geotermičkog modela svi mezozojski sedimenti zaključno sa starijim nivoom gornje krede (donji turon) dostižu katagenetski stadijum, tj. prelaze vrednosti refleksije vitritina od 0,50 % – što je u skladu sa rezultatima merenja refleksije. Mlađi sedimenti gornje krede i kenozoika nisu do danas dostigli stadijum katageneze, tj. dovoljan stepen zrelosti potreban za generisanje nafte.

Minimalna relativna dubina naftnog prozora prema izrađenom modelu iznosi oko 2600 m, pri čemu je on veoma širok i dostiže dubinu i preko 5000 m. Vreme glavnog generisanja nafte, iz sedimenata karna i turona – u kojima su nedavno utvrđene efektivne matične stene istočne Hercegovine [14], može se vezati za paleogen – konkretno period paleocen-oligocen.

6. ZAHVALNICA

Deo istraživanja čiji su rezultati prikazani u radu podržan je od strane Ministarstva prosvete, nauke i

tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ugovor broj: 451-03-9/2021-14/200126).

LITERATURA

- [1] Ercegovac M, Kostić A. and Stojić A, Simplemat – Software for the prediction of petroleum generation and fast economic evaluation of unexplored basins. – *7th International Symposium on Application of Mathematical Methods and Computers in Mining, Geology and Metallurgy*, October 28–30, Proceedings 2-16, pp. 325-330, Sofia, 1998.
- [2] Sweeney, J.J. & Burnham, A.K., Evaluation of a Simple Model of Vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics. – *AAPG Bulletin*, V.74, No. 10, pp. 1559-1570, 1990.
- [3] Waples, D.W., *Time and Temperature in Petroleum Exploration: Application of Lopatin's Method to Petroleum Exploration*, AAPG Bull. Vol. 64/6, pp. 916-927, 1980.
- [4] Ercegovac M. & Kostić A, The kerogen maturity of the neogene sediments in the Drmno depression (Kostolac, Serbia). – *J. Serb. Chem. Soc.* 61 (11), pp. 1063-1069, 1996.
- [5] Kostić A, Ercegovac M. i Stojić A. Integralni model konsedimentacione istorije i generiranja ugljovodonika u Smederevskoj depresiji – primena programa SimpleMat. – *13. Kongres geologa Jugoslavije*, Herceg Novi, knjiga IV-Mineralne sirovine, str. 349-365, 1998.
- [6] Kostić A, *Termička evolucija organske supstance i modelovanje geneze nafte i gasa u Panonskom basenu (Srbija)*. – Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, "Planeta print", 150 str, 2010.
- [7] Poelchau H. S, Baker D. R, Hantschel Th, Horsfield. B. & Wygrala B. Basin simulation and the Desing of the Conceptual Basin Model. In: *Petroleum and Basin evolution*, Springer, pp. 53-54, 1997.
- [8] Ercegovac, M., Kostić, A., Karg, H., Welte, D.H. and Littke, R., Temperature and burial history modelling of the Drmno and Markovac depressions, se Pannonian basin, Serbia.- *Journal of Petroleum Geology*, Vol.26 (1), January 2003, pp 5-27, 2003.
- [9] Yukler M. A. *Sensitivity analysis of groundwater flow system and an application to a real case*. In: Gill D, Merriam DF (eds) *Geomathematical and petrophysical studies in sedimentology, computery and geology*. Pergamon Press, Oxford, pp. 33-49, 1979.
- [10] Wygrala B. P. *Integrated study of an oil field in the southern Po basin, northern Italy*. Diss, Univ Koln, Berichte Kernforschungsanlage Julich, no 2313, pp. 1-217, 1989.

- [11] Hermanrud C. *Basin modelling techniques – an overview*. In: Dore, AG et al. (eds) *Basin modelling: advances and applications*. NPF Spec. Publ. 3, Elsevier, Amsterdam, pp. 1-34, 1993.
- [12] Miljuš P, *Geološko-tektonska građa i povjest razvoja vanjskih Dinarida i Jadrana*. Unpubl. PhD Thesis, Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, pp. 255, 1971.
- [13] Schmid S. M, Fügenschuh B, Kounov A, Mañenco, L, Nievergelt P, Oberhänsli R, Pleuger J, Schefer S, Schuster R, Tomljenović B, Ustaszewski K & Van Hinsbergen D. J. J, Tectonic units of the Alpine collision zone between Eastern Alps and western Turkey. *Gondwana Research*, 78: 308-374, 2020.
- [14] Aleksić N, Kostić A. & Radonjić M (). Composition of organic matter and thermal maturity of Mesozoic and Cenozoic sedimentary rocks in East Herzegovina (External Dinarides, Bosnia and Herzegovina). *ASGP Journal*. 2021
- [15] Dimitrijević M. D. *Geologija Jugoslavije* Geoinstitut, Beograd, str. 220-226, 1995.
- [16] Schmid S, Bernoulli D, Fügenschuh B, Matenco L, Schefer S, Schuster R, Tischler M. & Ustaszewski, K. The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss Journal of Geosciences*, 101: 139–183, 2008.
- [17] Natević LJ, Petrović V. *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000. Tumač za list Trebinje K 34–37* – Institut za geološka istraživanja, Sarajevo, Savezni geološki zavod, Beograd, 46 str, 1970.
- [18] Vujisić T. *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000. Tumač za list Nikšić K 34–38*. – Institut za geološka istraživanja, Sarajevo, Savezni geološki zavod, Beograd, 53 str, 1975.
- [19] Vlahović I, Mandić O, Mrinjek E, Bergant S, Čosović V, De Leeuw A, Enos P, Hrvatović H, Matičec D, Mikša G, Nemec W, Pavelić D, Penciger V, Velić I. & Vranjković A. *Marine to continental depositional systems of Outer Dinarides foreland and intramontane basins (Eocene–Miocene, Croatia and Bosnia and Herzegovina)*. – Field Trip Guide, 29th IAS Meeting of Sedimentology, Schlading/Austria, Journal of Alpine Geology 54, 405–470, 2012.
- [20] Welte D. H, Horsfield B. & Baker D. R. (Eds.) *Petroleum and Basin evolution-Insights from Petroleum Geochemistry, Geology and Basin Modeling*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 535 pp, 1997.
- [21] Miošić N, Samardžić N, Hrvatović H, The current status of geothermal energy use and development in Bosnia and Herzegovina. *Proceedings World Geothermal Congress*, Bali, Indonesia, pp. 1, 2010.
- [22] Burnham A. K. & Sweeney J. J, A chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance. – *Geochemica et Cosmochimica Acta*, Vol. 53, pp. 2649-2657, 1989.
- [23] Van Gijzel P, Characterization and identification of kerogen and bitumen and determination of thermal maturation by means of qualitative and quantitative microscopical techniques. In: How to Assess Maturation and Paleotemperature. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Short Note*, 7: 159-216, 1981.
- [24] Peters K. E. & Cassa, M. R, Applied Source Rock Geochemistry. In: Magoon L.B. and Dow W.G. (eds): *The Petroleum System – From Source to Trap*. AAPG Memoir: 60: 93–120, 1994
- [25] Peters K. E, Walters C. C. & Moldowan, J. M. *The Biomarker Guide*. – 2nd Ed. Cambridge University Press, 1155 pp, 2005.
- [26] Taylor G. H, Teichmüller M, Davis A, Diessel, C. F. K, Littke R. & Robert P, *Organic Petrology*. Gebrüder Borntraeger, Berlin, 704 pp, 1998.
- [27] Tissot B. P. & Welte D. H, *Petroleum Formation and Occurrence: A New Approach to Oil and Gas Exploration*. – Springer-Verlag, Berlin, 538 p, 1978.
- [28] Petsch S. T, Berner R. A, Eglinton T. I. *A field study of the chemical weathering of ancient sedimentary organic matter* – Organic Krefeld. *Geochemistry*, 31, 475–487, 2000.

SUMMARY

MODELING OF GEOTHERMAL EVOLUTION OF SEDIMENTARY ROCKS IN EAST HERZEGOVINA BASED ON VITRINITE REFLECTANCE

This paper presents the first results of the geothermal evolution modeling in East Herzegovina based on vitrinite reflectance calculations and measurements. Modeling of burial and geothermal was performed using "SimpleMat" software with well known kinetic model of vitrinite reflectance – EASY % Ro. By fitting the calculated reflectance values with mean measured vitrinite reflectances, it was concluded that there was erosion of some 900 m in the area, and that first possible petroleum generation could have started some 100 Ma ago. According to final calibration model that includes additional thickness and subsequent erosion of Paleogene sequence, the Upper Triassic sediments should have maturity from 0.70 to 1.1 % Rr, Lower Jurassic from 0.62 to 0.70 % Rr, whereas Upper Cretaceous sediments should have values from 0.40 to 0.60 % Rr, which is in accordance with measured vitrinite reflectance in 23 samples. Assuming that beginning of oil window in the East Herzegovina correspond to the vitrinite reflectance of 0.50 % Rr, all analyzed Mesozoic samples are at the initial stage of catagenesis ("oil window"), while Cenozoic sediments are at the stage of diagenesis.

Key Words: *petroleum, thermal maturity, geothermal modeling, vitrinite reflectance, East Herzegovina.*