Ležišta nafte i prirodnoga plina u magmatskim i metamorfnim stijenama

Kunštić, Dora Rebeka

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:712219

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-15**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Preddiplomski studij Geološkog inženjerstva

LEŽIŠTA NAFTE I PRIRODNOG PLINA U MAGMATSKIM I METAMORFNIM STIJENAMA

Završni rad

Dora Rebeka Kunštić

GI 2101

Zagreb, 2021.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Završni rad

LEŽIŠTA NAFTE I PRIRODNOG PLINA U MAGMATSKIM I METAMORFNIM STIJENAMA

DORA REBEKA KUNŠTIĆ

Završni rad je izrađen: na Sveučilištu u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo, Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Dugi niz godina magmatske i metamorfne stijene nisu razmatrane kao ležišne stijene, tek nakon nekoliko slučajnih otkrića nafte i prirodnog plina u metamorfnim i magmatskim stijenama, započinje detaljnije istraživanje upravo takvih ležišta. Zbog kompleksnosti samih ležišta, klasifikacija i karakterizacija su komplicirane, jer ovise o puno faktora te zahtijevaju primjenu više disciplina. Ležišta nafte i plina u magmatitima i metamorfitima u Kini, SAD-u, Venezueli i Indoneziji su primjeri profitabilnih ležišta sa povoljnom proizvodnjom. Najčešći tip zamki ovih ležišta su stratigrafske zamke „buried hill“ tipa. Molve su najveće plinsko polje u Hrvatskoj, dio prirodnog plina nalazi se u magmatskim i metamorfnim ležišnim stijenama. Magmatska i metamorfna ležišta nafte i prirodnog plina važna su objekt daljnjih istraživanja na ugljikovodike, jer su još nedovoljno istražena, a procjenjuje se da sadrže velike rezerve nafte i prirodnog plina.

Ključne riječi: magmatska ležišta, metamorfna ležišta, migracija, istraživanje ugljikovodika

Završni rad sadrži: 45 stranica, 6 tablica, 18 slika i 24 reference
Jezik izvornika: hrvatski
Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: doc. dr. sc. Iva Kolenković Močilac

Ocjenjivači: : 1. doc. dr. sc. Iva Kolenković Močilac
2. izv. prof. dr.sc. Bruno Saftić
3. izv. prof. dr.sc. Marko Cvetković

Datum obrane: 17.09.2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

SADRŽAJ

1 UVOD……. 6

2 KLASIFIKACIJA I KARAKTERISTIKE MAGMATSKIH I METAMORFNIH STIJENA…….. 7

2.1. Klasifikacija magmatskih stijena…… 7
2.2. Klasifikacija metamorfnih stijena…….. 10
2.3. Metamorfni facijesi…… 15

3 LEŽIŠTA NAFTE I PRIRODNOG PLINA U MAGMATSKIM STIJENAMA……..... 16

3.1. Klasifikacija i karakteristike ležišta nafte i prirodnog plina u magmatskim stijenama…….. 16

3.2. Postanak i migracija nafte i prirodnog plina do magmatskih ležišta…….. 23

4 LEŽIŠTA NAFTE I PRIRODNOG PLINA U METAMORFNIM STIJENAMA…… 25

4.1. Postanak i karakteristike ležišta nafte i prirodnog plina u metamorfnim stijenama…… 25

4.2. Migracija, akumulacija i karakteristike nafte i prirodnog plina u metamorfnim stijenama…….. 28

5 PRIMJERI LEŽIŠTA NAFTE I PRIRODNOG PLINA U MAGMATSKIM I METAMORFNIM STIJENAMA U SVIJETU…….. 30

5.1. Kina…… 31
5.2. SAD…… 33
5.3. Venezuela……... 35
5.4. Indonezija……... 37

6 LEŽIŠTA NAFTE I PRIRODNOG PLINA U MAGMATSKIM I METAMORFNIM STIJENAMA U HRVATSKOJ…….. 40

6.1. Molve…… 40
6.2. Bizovac……. 42

7 ZAKLJUČAK…… 43

8 POPIS LITERATURE……. 44

Popis slika

Slika 1-1. TAS dijagram za kemijsku klasifikaciju i nomenklaturu vulkanskih stijena prema preporuci IUGS-a…….. 8

Slika 1-2. Dijagram koji prikazuje vrste metamorfnih facijesa s obzirom na temperaturu i tlak…….. 14

Slika 2-1. Dijagram prikazuje raspodjela ugljikovodika u i oko magmatskih stijena prema litološkom sastavu (Schutter, 2003)……..... 16

Slika 2-2. Prosječna poroznost magmatskih stijena različitog litološkog sastava i stupnja alteracije. (Zou i sur., 2017)…… 21

Slika 2-3. Profil ležišta plina u mezozojskim vulkanskim stijenama, depresija Xujiaweizi, bazen Songliao (Zou i sur., 2017)……. 23

Slika 3-1. Veza između minerala metamorfnih stijena i razvoja kolektorskih svojstava (Zou i sur., 2017)…….. 26

Slika 3-2. Model unutarnje pukotinske migracije i akumulacije ugljikovodika u metamorfnom ležištu Xinlongtai, „burried hill“ tipa u Liahoe depresiji (Zou i sur., 2017)..... 28

Slika 4-1. Karta prikazuje rasprostranjenost ležišta ugljikovodika povezanih s magmatskim stijenama (Schutter, 2003)…… 29

Slika 4-2. Vrste i mikroskopske fotografije rezervoarskih prostora u vulkanskim stijenama (Mao i sur., 2015)…….. 31

Slika 4-3. Proizvodnja nafte iz stijena podloge bazena u Kansasu (Landes i sur., 1960).. 32

Slika 4-4. Profil polja El Segundo u Kaliforniji (Landes i sur., 1960)…… 33

Slika 4-5. Geološki profil polja La Paz (Smith, 1995)……. 34

Slika 4-6. Poopćeni litološki sastav kolektorskih stijena naftnih polja Mara i Maracaibo (Stevenson, 1951)…….. 35

Slika 4-7. Strukturni presjek Beruk Sjeveroistok polja, Sumatra. (Koning i Darmono, 1984)……..... 36

Slika 4-8. Strukturni profil Barito bazena, Kalimantan (Koning, 2000)…….. 37

Slika 4-9. Litostratigrafski stup polja Tanjung, Kalimantan (Koning, 2000)…… 38

Slika 5-1. Geografska lokacija polja Molve (Malvić, Velić 2010)…… 39

Slika 5-2. Prikaz građe polja Molve (Malvić, Velić 2010)…… 40

Popis tablica

Tablica 1-1. Klasifikacija vulkanskih stijena prema TAS klasifikacijskoj shemi preporučenoj od Međunarodne unije geoloških znanosti 1989. godine…… 7

Tablica 1-2. Klasifikacija piroklastičnih čestica i sedimenata na temelju veličine čestica (Tišljar, 1999)…….. 9

Tablica 1-3. Klasifikacija i karakteristike metamorfnih stijena prema teksturi i specijalnim imenima metamorfnih stijena (modificirano prema nastavnim materijalima prof. Garašić, 2018)…… 10

Tablica 2-1. Proces formiranja ležišta, mjesto akumulacije i klasifikacija ležišta nafte i prirodnog plina u magmatskim stijenama (modificirano prema Zou i sur., 2017)…… 17

Tablica 2-2. Tip i karakteristike pornog prostora u magmatskim ležištima (modificirano prema Zou i sur., 2017)…… 18

Tablica 3-1. Tipovi rezervoarskog prostora u metamorfnim ležištima (modificirano prema Zou i sur., 2017)……. 25

1 UVOD

Dugi niz godina magmatske i metamorfne stijene, zajedničkim nazivom kristalinske stijene, smatrale su se stijenama podloge bazena te se kao takve nisu razmatrale kao ležišne stijene, a također su bile karakterizirane kao ekonomski neprofitabilna ležišta. Međutim, u zadnjih nekoliko desetljeća sve više se istražuju ležišta ugljikovodika upravo u magmatskim i metamorfnim stijenama te se otkriva njihov potencijal.

Ležišta nafte i prirodnog plina u magmatskim stijenama usko su vezana za vulkanizam, dijagenezu i tektoniku. Stoga takva ležišta imaju jedinstvene geološke uvjete, kontrolne faktore, migracijske zakone i drugo. Ležište nafte i plina u magmatskim stijenama prvo je otkriveno u San Joaquin bazenu u Kaliforniji, u Sjedinjenim Američkim Državama 1887. godine.

Ležišta nafte i plina u metamorfnim stijenama su ležišta u kojima su nafta i prirodni plin akumulirani u metamorfnim stijenama. Metamorfne stijene imaju specifične uvjete formiranja. Kao i ležišta nafte i prirodnog plina u magmatskim stijenama, ležišta nafte i prirodnog plina u metamorfnim stijenama imaju jedinstvene geološke uvjete, kontrolne faktore i migracijske zakone.

Cilj ovog rada je klasificirati i opisati značajke ležišta nafte i prirodnog plina u magmatskim i metamorfnim stijenama te prikazati nekoliko primjera takvih ležišta u Hrvatskoj i drugim državama u svijetu.

2 KLASIFIKACIJA I KARAKTERISTIKE MAGMATSKIH I METAMORFNIH STIJENA

2.1. Klasifikacija magmatskih stijena

Magmatske stijene nastaju kristalizacijom iz magme u dubini, plitkim dijelovima kore i na samoj površini. Prema načinu pojavljivanja dijele se na intruzivne, efuzivne i žilne magmatske stijene. Ležišta ugljikovodika nalaze se u vulkanskim, odnosno efuzivnim stijenama te piroklastičnim stijenama koje pripadaju sedimentnim stijenama, ali su vulkanskog podrijetla.

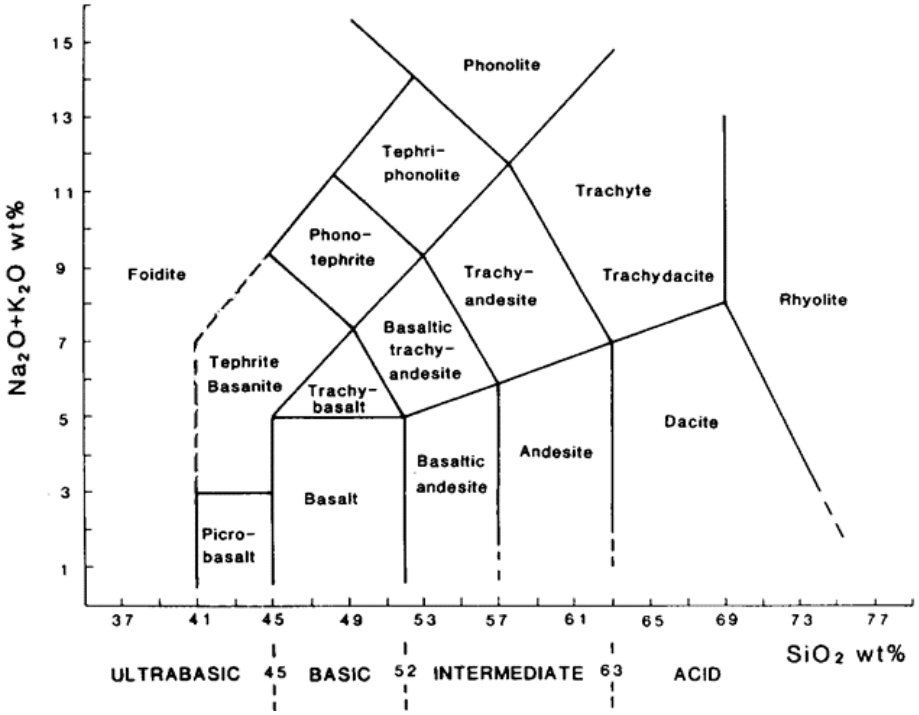
Vulkanske stijene kristaliziraju iz lave na površini ili iz submarinskih izljeva lave. U nastavku je dana TAS (Total Alkalis versus Silica) klasifikacija vulkanskih stijena prema Međunarodnoj uniji geoloških znanosti (IUGS; u nastavku IUGS) iz 1989. godine koja se temelji na odnosu između SiO_2 komponente i sadržaju alkalijskih komponenata (Na_2O + K_2O).

Tablica 1-1. Klasifikacija vulkanskih stijena prema TAS klasifikacijskoj shemi preporučenoj od Međunarodne unije geoloških znanosti 1989. godine

SiO2 komponenta (%)	**pH**	**Naziv stijene**	**Karakterističan mineralni sastav**
45- 52	Ultrabazične	Pikrit	Plagioklas, pirokseni i olivin
52-57	Bazične	Bazaltni andezit/trahiandezit	Plagioklasi, pirokseni, hornblenda
52-63	Neutralne	Andezit	Plagioklasi, hornblenda, biotit i pirokseni
		Trahit/trahiandezit	Alkalijski feldspati, hornblenda, biotit i pirokseni
>69	Kiselo	Riolit	Alkalijski feldspati, kvarc, plagioklasi, biotit, hornblenda

generalno >63	Kiselo	Vulkansko staklo	Fenokristali kvarca i feldspata, biotit, hornblenda, pirokseni, fenokristali olivina, itd.

Na sljedećem dijagramu prikazana je klasifikacija vulkanskih stijena prema odnosu između SiO_2 komponente i sadržaju alkalijskih komponenta (Na_2O + K_2O). Prema takvoj klasifikaciji i udjelu SiO_2 komponente razlikujemo kisele, neutralne, bazične i ultrabazične stijene.



Slika 1-1. TAS dijagram za kemijsku klasifikaciju i nomenklaturu vulkanskih stijena prema preporuci IUGS-a

Piroklastične stijene su stijene nastale izravnim taloženjem izbačenog, vrućeg vulkanskog materijala te se prema veličini zrna i njihovoj zaobljenosti dijele na aglomerate ili breče te lapilne i praškaste tufove.

Tablica 1-2. Klasifikacija piroklastičnih čestica i sedimenata na temelju veličine čestica (Tišljar, 1999.)

Piroklastične čestice	**Veličina čestica**	**Piroklastične stijene**
Bombe/ blokovi	>64 mm	Aglomerat/vulkanske breče
Lapili	64-2mm	Lapilit
Krupnozrnasti pepeo	2- 0,06	Vulkanski pješčenjak
Sitnozrnasti pepeo	<0,06mm	Vulkanski muljnjak

2.2. Klasifikacija i karakteristike metamorfnih stijena

Metamorfne stijene nastale su složenim procesom metamorfoze koji dovodi do promjena u mineralnom sastavu, strukturi i teksturi ishodišne stijene zbog prilagođavanja novonastalim fizikalnim i kemijskim uvjetima, različitim od uvjeta stvaranja ishodišne stijene. Metamorfoziraju se magmatske, sedimentne i starije metamorfne stijene.

Metamorfne stijene se klasificiraju prema teksturi i prema mineralnom sastavu. Na temelju teksture dijele se na tri podskupine: folijativne/trakaste stijene, zrnaste stijene i stijene izuzetno visokog stupnja deformacije. Prema mineralnom sastavu se metamorfne stijene dalje grupiraju u podskupine. U tablici 1-3. dan je detaljniji prikaza klasifikacije metamorfnih stijena, zajedno s njihovim nazivom i karakteristikama.

Tablica 1-3. Klasifikacija i karakteristike metamorfnih stijena prema teksturi i specijalnim imenima metamorfnih stijena (modificirano prema nastavnim materijalima prof. Garašić, 2018).

Vrsta klasifikacije	**Naziv metamorfne stijene**	**Karakteristike metamorfne stijene**
1) Na temelju teksture		
Trakastu teksturu	Slejt	Kompaktna, vrlo sitnozrnasta metamorfna stijena s dobro razvijenim klivažom. Minerali glina, tinjci, klorit i kvarc nisu vidljivi golim okom.
	Filit	Kompaktna, sitnozrnasta metamorfna stijena s dobro razvijenim klivažom. Sericit, fengit, klorit i kvarc rijetko vidljivi golim okom.
	Škriljavac	Kompaktna, krupnozrnasta metamorfna stijena s dobro razvijenom škriljavošću. Ovisno o vrsti škriljavaca može sadržavati minerale kvarc, klorit, muskovit, biotit, disten, amfibol, silimanit, granat, andaluzit, koji su vidljivi golim okom
	Gnajs	Kompaktna, krupnozrnasta metamorfna stijena

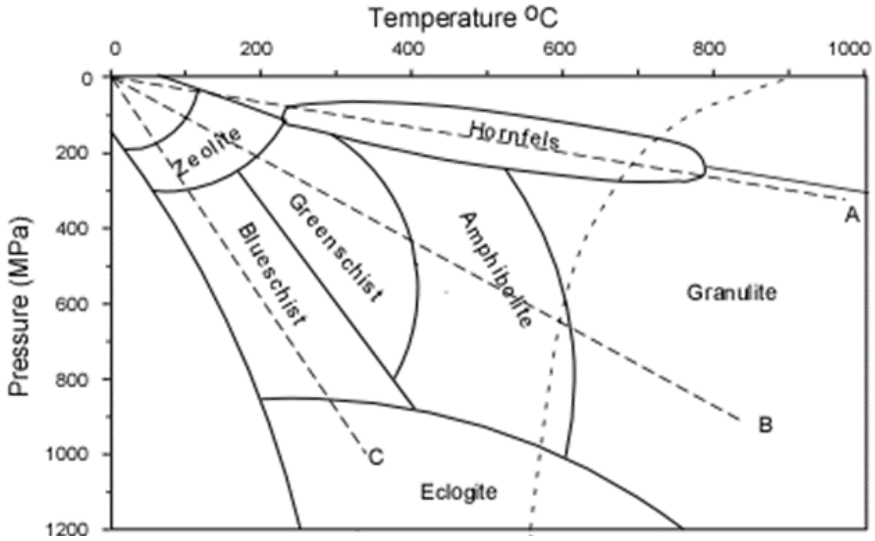
		karakterizirana s trakama i lećama različitog mineralnog sastava. Obično se sastoji od leukokratnih traka kvarca i feldspata u izmjeni sa trakama tamnije obojenih minerala plastičnog ili izduženog habitusa.
Zrnastu teksturu	Granofels	Srednje do krupno zrnaste metamorfne stijene koje imaju granoblastičnu strukturu, a nemaju izaženu niti folijaciju niti lineaciju.
Stijene izuzetno visokog stupnja deformacije	Rasjedne breče	Nastaju tektonskim kretanjem duž lokalizirane zone, pri čemu se radi o krtim deformacijama.
	Okcasti gnajs	Karakteriziran okcastom teksturom, a formiranje je vezano za zone visokog stupnja deformacije u kataklastičnim do duktilnim uvjetima.
	Milonit	Sitnozrnasta metamorfna stijena koja sadrži intenzivno spljoštene minerale, formirana duktilnom deformacijom duboko u kori.
	Ultramiolinit	Metamorfna stijena koja sadrži više od 90% matriksa, a ostalo izgrađuju porfiroklasti.
	Pseudotahilit	Sitnozrnasta ili staklasta tamna stijena koja se pojavljuje kao materiks u rasjednim brečama ili u obliku žila i često sadrži inkluzije okolnih stijena.
2) Specijalna imena metamorfnih stijena		
	Plavi škriljavac	Metamorfna stijena orogenog metamorfizma, niskog stupnja metamorfoze uz visok tlak i nisku temperaturu. Karaktrističan za zone subdukcije i kolizije.
	Zeleni škriljavac	Metamorfna stijena orogenog metamorfizma, obično

		granonematoblastične strukture te niskog stupnja metamorfoze. Često sačuvana reliktna intergranularna struktura dijabaza/dolerita. Mineralna parageneza: albit, aktinolit, klorit, epidot/coisit, kvarc.
	Talkni škriljavac	Metamorfna stijena orogenog metamorfizma i niskog stupnja metamorfoze. Mineralna parageneza: talk, klorit i kloritoid.
	Tinjčev škriljavac	Metamorfna stijena orogenog metamorfizma i srednjeg stupnja metamorfoze. Svijetle stijene izrazite škriljave teksture i krupne granolepidoblastične strukture, često porfiroblastični. Mineralna parageneza: muskovit i/ili biotit, kvarc, plagioklas, tipomorfni minerali (disten, staurolit, granat, kordijerit, andaluzit)
	Amfibolit	Metamorfna stijena orogenog metamorfizma i srednjeg stupnja metamorfoze. Mineralna parageneza: hornblenda, plagioklas, titanit, kvarc, biotit.
	Granulit	Metamorfna stijena orogenog metamorfizma i visokog stupnja metamorfoze. Ako se metamorfozira iz gnajsa nastaje felzitni granulit, a ako se metamoforfozira iz amfibolit nastaje mafitni granulit.
	Eklogit	Metamorfna stijena orogenog metamorfizma, nužno visokog tlaka, ali velikog raspona temperature postanka. Mineralna parageneza: omfacit, granat, disten, rutil i kvarc.
	Hornfels	Metamorfna stijena kontaktnog metamorfizma. Mineralni sastav

		odgovara jednom od hornfels facijesa i njima odgovarajućim paragenezama.
	Mramor	Metamorfna stijena regionalnog metamorfima. Ako sadrži tremolit, klorit i serpentin radi se o mramoru niskog stupnja metamorfizma, a ako sadrži diopsid, forsterit onda se radi o mramoru visokog stupnja metamorfizma.
	Kvarcit	Metamorfna stijena kontaktnog metamorfizma koja je izgrađena uglavnom od kvarca.
	Skarn	Metamorfan stijena sljedeće mineralne parageneze: wollastonit, diopsid, forsterit, andradit i granat, epidot i kalcit. Mogu sadržavati i rudne minerale.
	Migmatit	Složena metamorfna, kompozitna stijena izgrađena od dvije komponente: mafitne sastavnice metamorfnog sklopa i leukokratne sastavnice magmatskog sklopa.
	Serpentinit	Metamorfna stijena sastavljena uglavnom od serpentina, ali može sadržavati i rudne minerale, npr. Kromit i magnezit.

2.3. Metamorfni facijesi

Postoje četiri stupnja metamorfoze vrlo niski, niski, srednji i visoki. U svakom stupnju metamorfoze definirani su metamorfni facijesi koji predstavljaju stijene, odnosno parageneze nastale pod istim ili sličnim uvjetima tlaka i temperature te pripadaju istom facijesu bez obzira na različiti mineralni i kemijski sastav, vrijeme i mjesto nastanka. Na dijagramu 1-2. prikazani su metamorfni facijesi i stupnjevi metamorfoze. Stupnjevanje metamorfoze izvršeno je u seriji metamorfnih stijena na temelju temperatura na kojima se pojavljuje karakteristični indeks mineral i taj proces naziva se Winkler-ova shema. Granice između određenih stupnjeva metamorfoze postavljaju se na minimalnoj temperaturi potrebnoj za reakciju određenih minerala u karakterističnu paragenezu. Vrlo niski stupanj metamorfoze definiran je temperaturom od 180/200° do 300°C te prisustvom karakterističnih minerala laumonita i lavsonita. Niski stupanj metamorfoze definiran je temperaturom od 370° do 510°C te je donja granica određena prvom pojavom klinocoisita. Srednji stupanj metamofroze je označen prvom pojavom kordijerita i/ili staurolita u metapelitima, odnosno plagioklasa u metabazaltima. Temperatura karakteristična za srednji stupanj metamorfoze je u rasponu od 510° do 620°C, dok je za visoki stupanj metamorfoze karakteristična temperatura veća od 620°C. Granica srednjeg i visokog stupnja metamorfoze određena je pojavom K-feldspata nastalog reakcijom muskovita i kvarca (Lugović, 2011).



Slika 1-2. Dijagram koji prikazuje vrste metamorfnih facijesa s obzirom na temperaturu i tlak

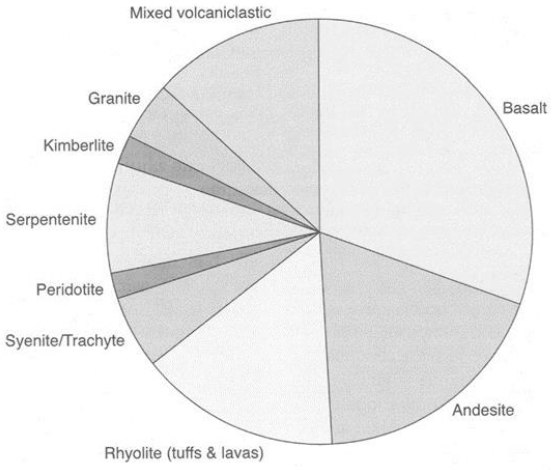
3 LEŽIŠTA NAFTE I PRIRODNOG PLINA U MAGMATSKIM STIJENAMA

3.1. Klasifikacija i karakteristike ležišta nafte i prirodnog plina u magmatskim stijenama

Dugi niz godina istraživanja ležišta nafte i plina bila su fokusirana na sedimentne stijene, procese i bazene, dok su kristalinske stijene smatrane isključivo stijenama podloge naftonosnih bazena te se nisu proučavala kao potencijalna ležišta.

Prvo otkriće naftnog ležišta u magmatskim stijenama bilo je 1887. godine u bazenu San Juan u Kaliforniji. Kako je istraživanje ugljikovodika napredovalo otkrilo se sve više ležišta ugljikovodika u magmatskim stijenama. Krajem 1990.-ih geologija ležišta u magmatskim stijenama postala je vrlo važna disciplina (Zhu i sur., 2010a, b) koja je proučavala unutarnju strukturu, poroznost i makrorasprostranjenost magmatskih ležišta te dinamičnu promjenu parametra ležišta tijekom razvoja vulkanskih stijena. Istraživanje ležišta u magmatskim stijenama teže je nego istraživanje ležišta u sedimentnim stijenama jer zahtijeva primjenu više disciplina poput vulkanologije, petrologije i fizike ležišta, teoriju naftne geologije i seizmička istraživanja (Pan i sur., 2008; Zhu i sur., 2010a, b; Chen i sur., 2014). Do sada je u svijetu otkriveno preko 300 ležišta nafte i prirodnog plina u magmatskim stijenama, a od toga 169 ležišta ugljikovodika u magmatitima imaju dokazane rezerve (Zou i sur., 2008).

Za ležišta nafte i prirodnog plina u magmatskim stijenama karakteristično je da su formirana uglavnom u mezozojsko-kenozojskom pasivnom kontinentalnom rubu, litološki dominiraju ležišta u bazaltima (32%) i andezitima (17%) te riolitima (15%), te da sekundarna poroznost poboljšava svojstva ležišta. Uglavnom su to manja ležišta, ali koja istodobno mogu imati bušotine visoke proizvodnje (Zou i sur., 2017; Schutter, 2003).



Slika 2-1. Dijagram prikazuje raspodjela ugljikovodika u i oko magmatskih stijena prema litološkom sastavu (Schuttera, 2003).

Ležišta nafte i prirodnog plina u magmatskim stijenama formirala su tri procesa: vulkanizam, dijageneza i tektonika, prema čemu se magmatska ležišta mogu podijeliti u četiri vrste: ležišta lava tipa, ležišta piroklastičnog tipa, ležišta nastala otapanjem i pukotinski tip ležišta (Zou i sur., 2017). Ova se ležišta značajno razlikuju u geometriji ležišta, tipu poroznosti, fizikalnim svojstvima i karakteristikama perkolacije (Zou i sur., 2017). U tablici 2-1. dana je klasifikacija ležišta s obzirom na proces nastanka ležišta, mjesto akumulacije, raspodjeli i pojavi ugljikovodika te vrsti stijena u kojima se ležište nalazi.

Vrsta magmatskih stijena i vulkanski facijes definira vrstu magmatskog ležišta. Različiti facijesi imaju različite tipove poroznosti, dok isti facijesi mogu imati različita fizička svojstva ležišta. Efuzivni vulkanski facijes može biti stvoren u bilo kojoj fazi vulkanske erupcije. Pri tome se stvaraju dobro razvijene primarne pore u lavi, a sekundarne pore nastaju otapanjem feldspata ili volumnim skupljanjem minerala, primjerice feldspata, kvarca i drugih, nastalih nakon devitrifikacije staklaste mase (Zou i sur., 2017). Tijekom vulkanske erupcije, pri kojoj nastaju piroklastične stijene, dolazi do velikog razora okolnih stijena i stvaranja pukotina. Budući da se takvi facijesi nalaze na izdignutom terenu, odnosno paleookolišu, gdje su novonastale piroklastične stijene izložene atmosferskim uvjetima dolazi do mehaničkog i kemijskog trošenja nastalih stijena (Zou i sur., 2017). Zato su pukotine i šupljine nastale trošenjem dobro razvijene te tvore povoljan porni prostor.

Dijageneza magmatskih stijena uglavnom uključuje zbijanje minerala, kristalizaciju minerala u šupljini stijene i otapanje od kojih svaki ima različite učinke na stvaranje ležišta i kontrolira razvoj sekundarnih pora (Zou i sur., 2017). Zbijanje minerala i taloženje minerala u šupljinama smanjuje poroznost i propusnot magmatskih stijena što negativno utječe na razvoj magmatskih ležišta.

Tektonika igra ključnu ulogu u nastanku rasjeda i pukotina, a stvaranje pukotina može utjecati povoljno ili nepovoljno na razvoj ležišta. Pukotine koje se stvaraju u vezikulama povećavaju poroznost stijene te povoljno utječu na razvoj magmatskih ležišta. Pukotine mogu poboljšati i protok vode, ubrzavajući otapanje i tvoreći sekundarne otopljene pore duž strukturnih lomova (Zou i sur., 2017).

Tablica 2-1. Proces formiranja ležišta, mjesto akumulacije i klasifikacija ležišta nafte i prirodnog plina u magmatskim stijenama. (modificirano prema Zou i sur., 2017).

Kontrolni mehanizam	**Mjesto akumulacije ugljikovodika**	**Tip ležišta**	**Raspodjela i pojave ugljikovodika**	**Klasifikacija ležišta**
Vulkanizam	Primarne pore	Vulkanska lava	Efuzivni facijes, slojevito	lava tip ležišta
		Subvulkanske stijene	Intruzivni facijes, cijevno	Piroklastični tip ležišta
		Piroklastične stijene	Eksplozivni facijes, konusno i prstenasto	
Dijageneza	Sekundarne pore	Istrošena kora krša	Unutar ležišta, debljine do 300m	Ležišta nastala otapanjem
		Prekriven krš	Otapanje kisele tekućine, dubina je neograničena	Pukotinski tip ležišta
		Alteracije	Sil, štok, zona alteracije	
Tektonika	Pukotine	Pukotine	Borani pojas	Pukotinski tip ležišta

Vulkanske stijene su općenito tvrđe od ostalih stijena te se zbog tog svojstva lakše odupiru mehaničkom trošenju. Upravo zbog toga u magmatskim ležištima dolazi do lakšeg očuvanja pora. Evolucija pornog prostora u magmatskim stijena je kompleksna. Pore se prema načinu formiranja dijele na primarne i sekundarne pore. Porni prostori govore nam o procesu nastanka, karakteristikama i mogućnosti pronalaska nafte i plina u određenom vulkanskom ležištu. Nakon vulkanske erupcije, pore nastalih vulkanskih stijena nisu povezane te stoga nema efektivne poroznosti. Tek naknadnim geološkim procesima ove stijene postaju mjesta akumulacije nafte i prirodnog plina. Općenito, vulkanizam, tektonski pokreti, atmosferski uvjeti, ispiranje i djelovanje fluida glavni su čimbenici kontrole i geološki procesi ključni za stvaranje i razvoj pora u magmatskim ležištima, a upravo su pore i pukotine mjesto akumulacije ugljikovodika (Zou i sur., 2017). U tablici 2-2. dan je detaljniji pregled vrsta pora, u kojim stijenama ih nalazimo, kako nastaju, koje su im karakteristike i koja je vjerojatnost pronalaska nafte i prirodnog plina.

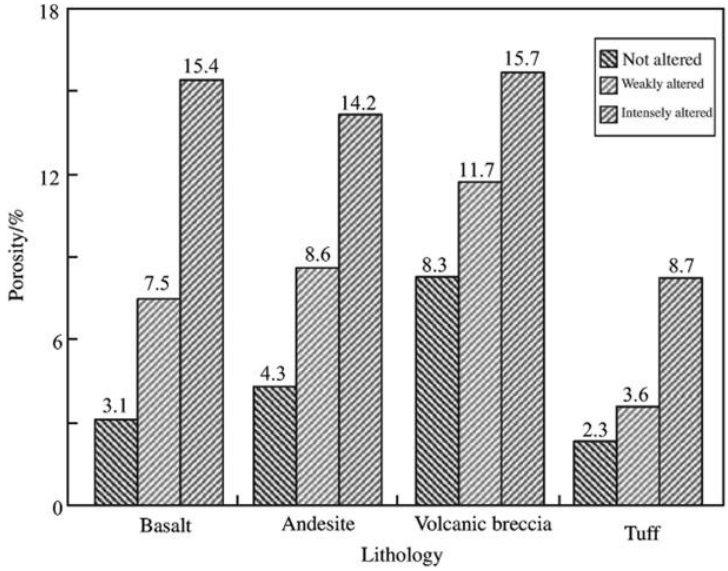
Tablica 2-2. Tip i karakteristike pornog prostora u magmatskim ležištima (modificirano prema Zou i sur., 2017).

Vrste pornog prostora		**Stijena**	**Geneza**	**Karakteristike**	**Vjerojatnost pronalska nafte i prirodnog plina**
Primarne pore	Pore nastale od mjehurića zraka	andezit, bazalt, breča	Plin se tijekom formiranja stijene širio i redistibuira o	Uglavnom raspoređen na vrhu i dnu toka lave ili piroklastičnog toka; razlikuju se po veličini i obliku	Ukoliko je ovaj tip pora povezan pukotinama, mogu imati povoljna kolektorska svojstva
	Intragranula -rne pore	vulkanska breča, aglomerat i piroklastična stijena	Zaostale pore nastale nakon kompakcije zrna	Uglavnom uočena u piroklastičnim stijenama	Povoljna kolektorska svojstva
	Interkristali -nske i intrakristali-nske pore	Bazalt, andezit, breča	Nastaju tijekom formiranja minerala,	Uglavnom se distribuira sredinom stijene, pore su malene	Uglavnom bez nafte

			odnosno stijene		
	Pore nastale kondenzaci-jom	Bazalt, andezit, breča	Nastaje smanjenjem volumena magmatskih taljevina tijekom kondenzacij e plinova	Bez usmjerenosti i često nepravilnog oblika	Kada su ove pore spojene s porama nastalima od mjehurića zraka, mogu rezultirati kolektorskim svojstvima
Sekundar -ne pore	Pore nastale devitrifika-cijom	Devitrifici-rani riolit	Nastaje devitrifika-cijom stakla	Mikropore s povoljnom povezanošću	Povoljna poroznost
	Pore nastale otapanjem feldspata	Različite vrste stijena	Otapanje feldspata uglavnom se odvija uz pukotine	Nepravilne pore	Povoljna kolektorska svojstva
	Pore nastale otapanjem vulkanskog pepela	tuf, vulkanska breča	Otapanje vulkanskog pepela	Mali do veliki broj pora uz povoljnu povezanost	Povoljna kolektorska svojstva
	Pore nastale otapanjem	Različite vrste stijena	Otapanje kalcita i siderita	Velike pore	Povoljna kolektorska svojstva
	Krške špilje	Bazalt, andezit, breča	Ispiranje i otapanje djelova-njem atmosferili-ja	Razvijen uz rasjede i pukotine, pojaseve klastičnih stijena te strukturna uzvišenja	Povoljna kolektorska svojstva
Pukotine	Eksplozivne pukotine	Subvulkan-ska stijena	Automatska ili prikrivena eksplozija	Pukotine nepravilnog oblika	Povoljna kolektorska svojstva
	Sužene pore	Bazalt, andezit, breča	Magma se ohladila i stegla, konvekci-jom se	Stupčaste pukotine u zjapećim i površinskim	Povoljna kolektorska svojstva

			magma s dna izdiže i lomi zonu lave pri vrhu	pukotinskim formama	
	Strukturne pukotine	Različite vrste stijena	Tektonsko djelovanje	Razvijeno u blizini rasjeda, relativno ravne pukotinske plohe, uglavnom lomovi pod velikim kutem	Kolektorska svojstva ovise o vremenu
	Pukotine nastale atmosfer-skim utjecajem	Različite vrste stijena	Razne vrste trošenja djelovanjem atmosferili-ja	Disolucijske pore, pukotine, šupljine i strukturne pukotine	Slaba kolektorska svojstva

Na slici 2-2. prikazana je prosječna poroznost magmatskih stijena različitog litološkog sastava i stupnja alteracije. Magmatske stijene koje nisu alterirane imaju najmanju poroznost, u prosjeku oko 4,5%. Slabo alterirane magmatske stijene imaju poroznost u prosjeku oko 7%, što znači da je poroznost slabo alteriranih magmatskih stijene u prosjeku veća oko 64% od nepromijenjenih magmatskih stijena. Snažno alterirane magmatske stijene imaju poroznost u prosjeku oko 13,5%, te je poroznost snažno alteriranih magmatskih stijena veća za oko 52% u odnosu na slabo alterirane magmatske stijene. Vulkanska breča je jedina nepromijenjena magmatska stijena koja može tvoriti povoljna ležišta, dok alteracija najviše utječe na promjenu poroznosti kod bazalta. Snažno alterirani bazalt, andezit, vulkanska breča i tuf zbog visoke poroznosti formiraju visokokvalitetna magmatska ležišta.



Slika 2-2. Prosječna poroznost magmatskih stijena različitog litološkog sastava i stupnja alteracije (Zou i sur., 2017).

3.2. Postanak i migracija nafte i prirodnog plina do magmatskih ležišta

Nafta i plin u magmatskim ležištima mogu biti organskog podrijetla, a plin može biti i anorganskog podrijetla premda je većina nafte i plina organskog podrijetla jer matične stijene koje stvaraju ugljikovodike u sedimentnim bazenima predstavljaju izvore za ležišta u magmatskim stijenama.

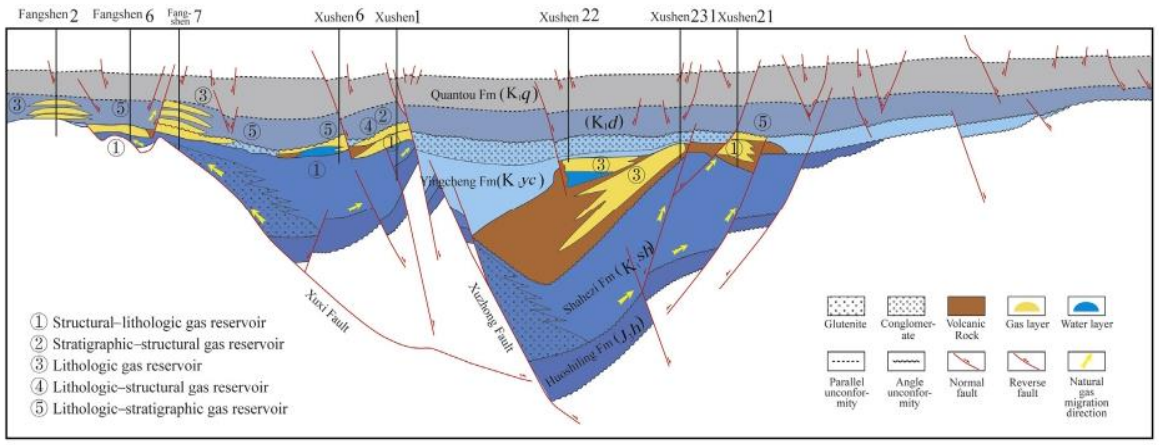
Utjecaj vulkanskih aktivnosti na stvaranje i evoluciju organskih tvari uglavnom je predstavljen u tri aspekta. Vulkanski pepeo koji prekriva velike površine terena može uzrokovati biološko izumiranje tijekom i nakon vulkanske erupcije, što može dovesti do očuvanja organske tvari. Zbog prijelaznih metala (kao što su Ni, Co, Cu, Mn, Zn, Ti i V) u hidrotermalnoj tekućini koja zajedno s vodenom parom izbija u velikoj količini tijekom vulkanizma, može doći do poboljšavanja rasta i reprodukcije organizama što za rezultat ima nastajanje organske tvari. Vulkanska aktivnost i hidrotermalne tekućine mogle bi potaknuti sazrijevanje organske tvari, tvoreći tvari koje stvaraju ugljikovodike u magmatskim ležištima (Zou i sur., 2017).

Neke vulkanske aktivnosti mogu omogućiti stvaranje ležišta anorganskog podrijetla te takva plinska ležišta mogu biti prilično velika. Ugljikovodici anorganskog podrijetla mogu biti podrijetlom iz plašta gdje nastaju Fischer Tropschovom sintezom CO, CO_2 i H_2, ili iz kozmičkih materijala sačuvanih u plaštu (tj. ugljikovodici nakupljeni tijekom formiranja Zemlje) (Zou i sur., 2017). Ovi ugljikovodici dospijevaju iz plašta u koru kroz duboke rasjede. Ugljikovodici mogu nastati i otplinjavanjem magme te serpentinizacijom. (Petford i McCafrey, 2003).

Migracija ugljikovodika do magmatskih ležišta je iznimno kompliciranа jer ovisi o dosta faktora te je još uvijek nedovoljno istražena. Dio migracijskih procesa i zakona bit će objašnjen prema ležištu u mezozojskim magmatskim stijenama u Xujiaweizi depresiji u Songliao bazenu kako je objašnjeno u Zou i sur. (2017).

Model migracije u Xujiaweizi depresiji u Songliao bazenu ovisi o strukturnoj zoni u kojoj se nalazi ležište ugljikovodika te je na slici 2-3. prikazan profil ležišta plina u mezozojskim vulkanskim stijenama Xujiaweizi depresije. Duboki rasjedi u bazenu Songliao su karakterizirani polugrebenskim rasjednim depresijama uglavnom karakteriziranim strmim padinama, tektonskim grabama i zonama blagih padina. Zbog obližnjih riječnih delti i aluvijalnih lepeza, došlo je do taloženja sedimenta na padini brdovitog paleokoliša dok su

rasjedi i stijene na vrhu formacije Yingcheng izložene atmosferilijama omogućile povoljne migracijske putove za naftu. Tektonska graba nalazi se u središnjem dijelu depresije, to je središte slijeganja te je to središnja zona za stvaranje ugljikovodika. Zbog distribucije sedimenata i magmatita u zonu tektonske grabe, ona je povoljna za razvoj ležišta nafte i plina. U zoni blagih padina razvijaju se strukture koje omogućuju migraciju nafte i plina te ako postoji zamka u smjeru uzgona formiraju se ležišta nafte i plina. Tijekom formiranja Xujiaweizi depresije došlo je do stvaranja središnjeg strukturnog pojasa NNW Xuzhong. Na istočnoj strani pojasa razvijena su udubljena korita Anda i Xudong, dok su na zapadnoj strani nastala korita Xuxi i Xunan. Matične stijene Shahezi Formacije su muljnjak i ugljen koje su generirale obilne količine prirodnog plina. Pukotine nastale tektonskim djelovanjem dodatno su povezale pore te poboljšale fizička svojstva ležišta (Zou i sur., 2017).



Slika 2-3. Profil ležišta plina u mezozojskim vulkanskim stijenama, depresija Xujiaweizi, bazen Songliao (Zou i sur., 2017).

4 LEŽIŠTA NAFTE I PRIRODNOG PLINA U METAMORFNIM STIJENAMA

4.1. Postanak i karakteristike ležišta nafte i prirodnog plina u metamorfnim stijenama

Ležišta nafte i prirodnog plina u metamorfnim stijenama imaju posebne uvjete formiranja, kontrolne faktore i zakone distribucije. Stijensko tijelo metamorfnog ležišta nafte konstantno je pod utjecajem atmosferilija, otapanja i/ili strukturnih promjena te samo nema uvjete za stvaranje nafte. Nafta se generira u sedimentnim stijenama u stratigrafskoj krovini.

Najstariji zapisi o uspješnom bušenju metamorfnih stijena datira iz 1953. Bušilo se u bazenu Maracaibo u Venezueli, dubina bušotine iznosila je 2709 m, izbušeno je 332 m metamorfne stijene te je testna proizvodnja nafte bila 557 t/dan. Ovaj bazen ima najveću proizvodnju iz nesedimentne akumulacije ugljikovodika. Trenutno su ležišta nafte i plina u metamorfitima otkrivena u Kini, Iranu, Venezueli, Brazilu, Alžiru, Maroku, Angoli, Egiptu, Mađarskoj, Rumunjskoj i bivšem Sovjetskom Savezu (Zou i sur., 2017).

Tijekom metamorfizma dolazi do niza promjena ishodišne stijene koje uključuju promjenu sastava minerala, teksture i strukture, a mogu rezultirati stvaranjem pora i pukotina, prostora za akumulaciju ugljikovodika. Tektonizam je također povoljan za stvaranje učinkovitih ležišnih prostora u metamorfitima. Atmosferski uvjeti potiču razvoj pora i pukotina u metamorfnim stijenama tako što se dugotrajno izložena stijena podvrgava eroziji i/ili drobljenju tijekom različitih vremenskih uvjeta. Pore i pukotine mogu se zapuniti različitim mineralima, što nepovoljno utječe na fizička svojstva ležišta jer slabi poroznost i propusnost. S povećanjem dubine i tlaka smanjuje se otvorenost pukotina ležišta. Kad je formacija duboko smještena, podnosi statički pritisak okolnih i nadležećih stijena. Porast tlaka s porastom dubine dovodi do pojave plastičnosti stijene, stoga pukotinska poroznost općenito opada s povećanjem dubine (Zou i sur., 2017).

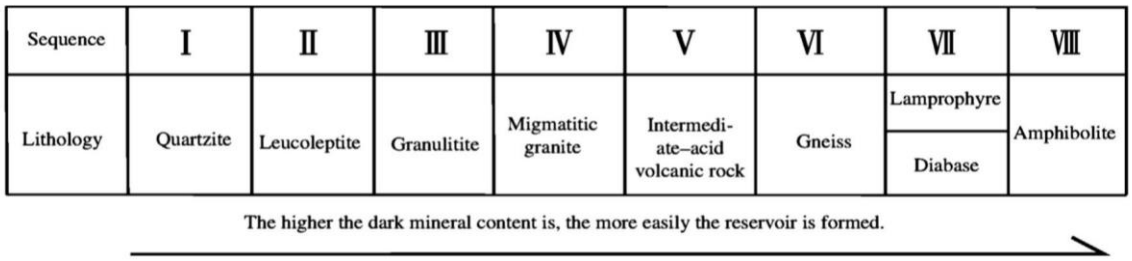
Na temelju podrijetla, pore u metamorfnom ležištu mogu se podijeliti na četiri vrste: pore nastale tijekom kristalizacije, pore strukturnog postanka, pore nastale djelovanjem atmosferilija i pore nastale kemijskom kemijskim otapanjem.

Tablica 3-1. Tipovi rezervoarskog prostora u metamorfnim ležištima (Modificirano prema Zou i sur., 2017).

Tip postanka	Prostor rezervoara	Karakteristike
Kristalizacija	Meta-međukristalna pora	Pore između meta-minerala, uočavaju se kristaliziranim mineralima
	Blasto-intergranularna pora	Primarne pore u stijenama niskog stupnja metamorfoze
	Pukotine šava	Pukotine nastale duž spojeva minerala
	Pukotine između dvije sastavne ravnine	Prijelom između dvije sastavne ravnine
Pore strukturnog postanka	Fragmentirane intergranularna pore	Pore između minerala i zrna stijene, nastaju u stijenama na koje djeluju velika naprezanja
	Fragmentirane pukotine	Linearni porni prostor ležišta nastao strukturnim naprezanjima
Pore nastale djelovanjem atmosferilija	Pukotine nastale djelovanjem atmosferilija	Pukotine nastale trošenjem stijena izloženih djelovanju atmosferilija
	Pore nastale djelovanjem atmosferilija	Pore u stijenama nastaju zbog raznih fizičkih čimbenika kojima je stijena izložena (temperaturne razlike, smrzavanje, itd.)
Kemijsko otapanje	Pore otapanja	Nastaju kasnijim otapanjem pora nastalih u ranoj fazi
	Pukotine otapanja	Ranije formirane pukotine koje su podvrgnute kasnijem otapanju i širenju ili zapunjene pukotine koje su se otopile.

Na porni prostor u metamorfnim stijenama uvelike utječu izvorna svojstva stijena, dok se kolektorska svojstva razvijaju kristalizacijoma, tektonizmom ili kemijskim trošenjem povezanim s izvornim mineralnim sastavom stijene, metamorfizmom ili migmatizmom. Prema istraživanjima ležišta u metamorfnim stijenama u Liaohe depresiji, razvoj pukotina i

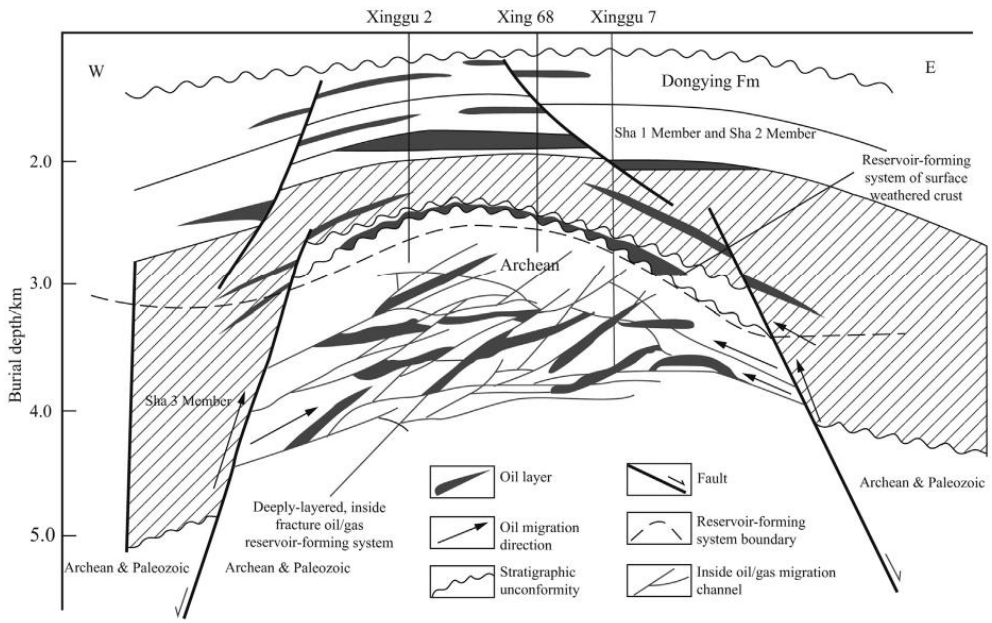
pora ovisi o mineralnom sastavu te je veza između minerala metamorfita i razvoja kolektorskih svojstava prikazana na slici 3-1. Stijena s visokim udjelom tamnih minerala razvija visoku plastičnost zbog čega teže puca, dok stijena s niskim sadržajem tamnih minerala lakše puca zbog niže plastičnosti. I jedne i druge stijene stvaraju ležišta ugljikovodika međutim, što je veća komponenta tamnih minerala to se lakše formira ležište ugljikovodika.



Slika 3-1. Veza između minerala metamorfnih stijena i razvoja kolektorskih svojstava (Zou i sur., 2017).

4.2. Migracija, akumulacija i karakteristike nafte i prirodnog plina u metamorfnim stijenama

Model migracije i akumulacije ugljikovodika bit će objašnjen na primjeru metamorfnog ležišta Xinlongtai, „burried hill“ tipa, koji se nalazi u Liahoe depresiji. Metamorfna ležišta otkrivena u Kini uglavnom su rasprostranjena u mezozojskim i kenozojskim riftnim bazenima gdje je izvor ugljikovodika kenozojska matična stijena te postoje dva načina na koji kenozojska nafta i plin migriraju do metamorfnih ležišta. Rasjedi povezani s izvorom ugljikovodika vode naftu i plin gotovo izravno do metamorfnog ležišta kao što je prikazano na slici 3-2. Duboki rasjedni sustavi povezuju matične stijene Sha-3 člana sa arhajskim metamorfnim stijenama te se stvara bočni prozor za migraciju nafte i plina. Rasjedi s velikim pomacima sa svake strane izdignutog paleokoliša pružaju regionalno veliki prozor za migraciju ugljikovodika. Ležišta unutar arhajskih metamorfnih stijena karakterizirana su pukotinskom migracijom ugljikovodika smjerovi koje su naznačeni strijelicama na sl. 3-2. Arhajske metamorfne stijene su uglavnom amfiboliti i dijabazi te su u izravnom kontaktu sa sedimentnim stijenama Sha-3 člana. Migraciju i akumulaciju karakteriziraju bočni izvor ugljikovodika, dvosmjerna migracija i višestruke akumulacije. Svojstva nafte i plina, kao i njihov izvor, u dubljem i plićem izdignuću su ista. Vrijeme akumulacije ugljikovodika uglavnom je bilo od sedimentacije člana Sha-1 do taloženja Dongying formacije (Zou i sur., 2017).

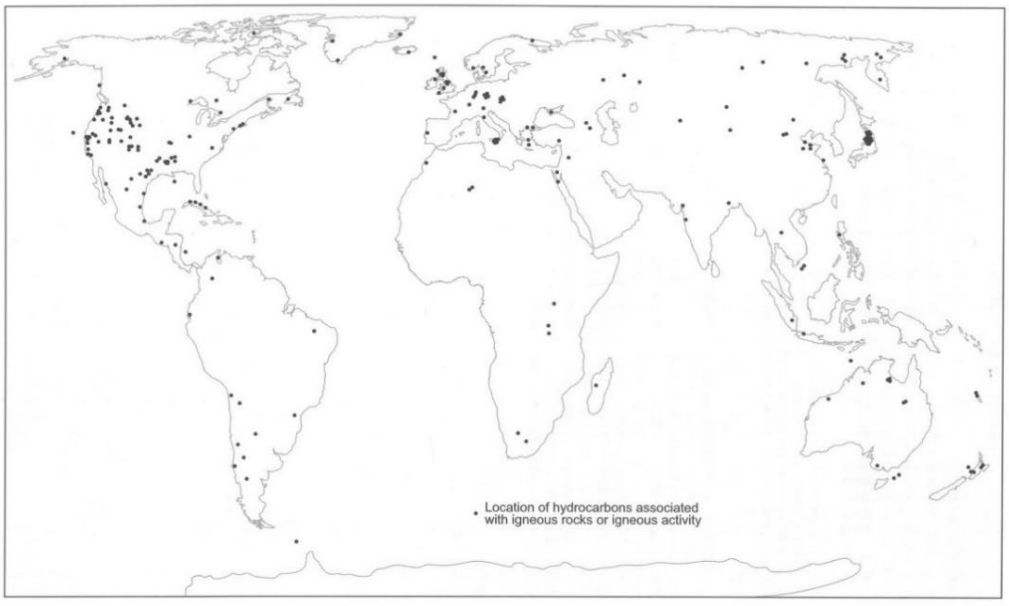


Slika 3-2. Model unutarnje pukotinske migracije i akumulacije ugljikovodika u metamorfnom ležištu Xinlongtai, „burried hill“ tipa u Liahoe depresiji (Zou i sur., 2017).

Metamorfna ležišta nafte i plina su malih dimenzija i vrlo su raspršena. Uglavnom sadrže naftu, karakterizirana su promjenjivom proizvodnjom naftnih bušotina te su kontrolirana pukotinama. Nema mnogo metamorfnih ležišta u svijetu te je prisutno svega 10 milijuna tona geoloških rezervi ugljikovodika u metamorfnim ležištima. U Kini su u metamorfnim stijenama otkrivena samo mala plinska ležišta, dok su velika ležišta nafte i plina u metamorfitima otkrivena u Venezueli, Gruziji te Indoneziji (Zou i sur., 2017).

5 PRIMJERI LEŽIŠTA NAFTE I PRIRODNOG PLINA U MAGMATSKIM I METAMORFNIM STIJENAMA U SVIJETU

Kao što je već prije navedeno ležišta nafte i prirodnog plina u magmatskim i metamorfnim stijenama nisu se sustavno proučavala, već su sva istraživanja bila usmjerena na ležišta ugljikovodika u sedimentnim stijenama. Kako se nisu provodila detaljnija istraživanja takvih ležišta, njihovi pronalasci i karakteristike su se spominjale usputno u kontekstu regionalnih studija. Na slici 4-1. prikazana je geografska karta Zemlje na kojoj su točkicama prikazana ležišta nafte i prirodnog plina povezana s magmatskim stijenama (Schutter, 2003). Ova karta pokazuje da postoje brojna ležišta nafte i prirodnog plina u magmatskim ležištima te se pokazuje i naglašava raspon pojava i obilje ugljikovodika, ali i da postoje područja koja još nisu uopće ili nisu dovoljno istražena po pitanju ovakvih ležišta ugljikovodika. Stijene podloge bazena važna su ležišta nafte i plina u raznim područjima svijeta te uključuju lomljene ili istrošene granite, kvarcite ili neke metamorfne stijene. U Južnoj Americi ležišta u stijenama podloge bazena javljaju se u Venezueli i Brazilu, dok se u SAD-u javljaju u Kaliforniji, Kansasu i Teksasu. U sjevernoj Africi takva ležišta javljaju se u Maroku, Libiji, Alžiru i Egiptu, a u Aziji u bazenu Zapadnog Sibira, Vijetnamu, Indoneziji i Kini (Koning i sur., 2013).



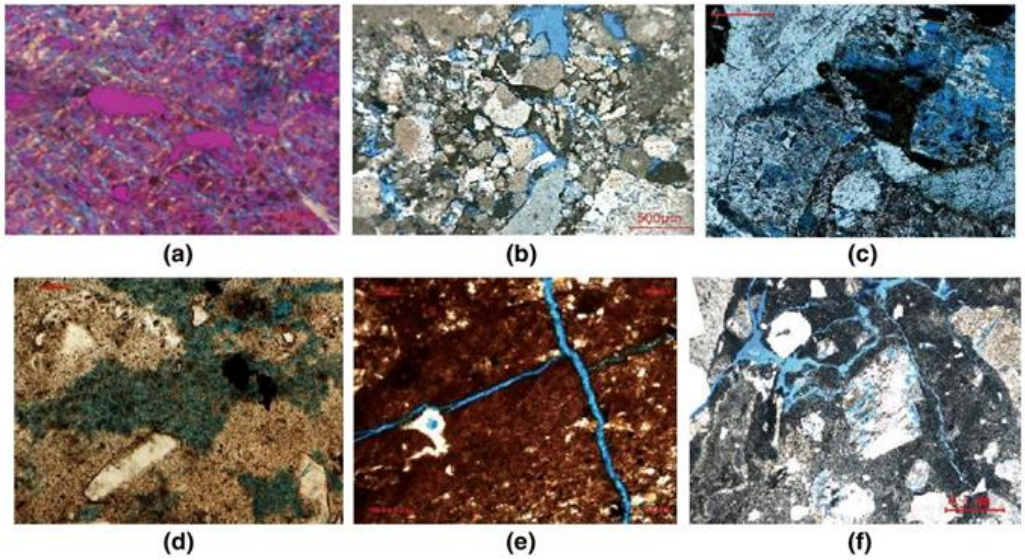
Slika 4-1. Karta prikazuje rasprostranjenost ležišta ugljikovodika povezanih s magmatskim stijenama (Schutter, 2003).

5.1. Kina

U Kini su se mezozojsko-kenozojske magmatske stijene razvile u bazenu Songliao i bazenu Bohai zaljeva na istoku, a magmatske stijene mlađeg paleozoika prisutne su u bazenu Junggar, bazenu Santanghu i bazenu Tarim na zapadu. Magmatsko ležište nafte i plina u Kini prvi puta je otkriveno na sjeverozapadnom rubu bazena Junggar. U vulkanskim stijenama Kine postoje primarna vulkanska ležišta koja imaju veliki istraživački potencijal. Do kraja 2013. Kina je imala dokazane geološke rezerve nafte od $5{,}9x10^8$ t i geološke rezerve prirodnog plina od $4730{,}12x10^8$ m^3 u vulkanskim stijenama (Zou i sur., 2017).

Ležišta nafte i plina u magmatskim stijenama na području Kine uključuju vulkanske stijene bazalt, andezit, dacit, riolit, trahit, i druge. Piroklastične stijene u kojima se nalaze ležišta su vulkanske breče. Mezozojska magmatska ležišta u istočnoj Kini uglavnom su nastala u kasnoj juri ili ranoj kredi, s bazičnim do kiselim stijenama, ali uglavnom kiselim. Kenozojska magmatska ležišta litološki se sastoje od kiselih do bazičnih stijena (Zhao i sur., 2008).

U usporedbi sa sedimentnim stijenama, vulkanske stijene znatno su složenije u vrstama i karakteristikama ležišta. Prema zapažanjima i istraživanjima na velikom broju uzoraka, porni prostori vulkanskih ležišta mogu se klasificirati u tri velike kategorije: primarne pore, sekundarne pore i pukotine (Mao i sur., 2015). Primarne pore uglavnom se sastoje od pora nastalih tijekom vulkanizma, mikropora među kristalima i pora među klastima vulkanskih breča (slika 4-2. a, b). Sekundarne pore uglavnom uključuju pore devitrifikacije vulkanskog stakla te pore i pukotine nastale otapanjem minerala i čestica (slika 4-2. c, d). Pukotine nastaju zbog pucanja i kontrakcijskih prijeloma nastalih tijekom vulkanizma i hlađenja (slika 4-2. a), strukturni prijelomi nastaju deformacijom vulkanskih stijena i klizanjem izazvanim tektonskim naprezanjima (slika 4-2. e); te pukotine otapanja nastale zbog izloženosti atmosferskim uvjetima (slika 4-2. f).



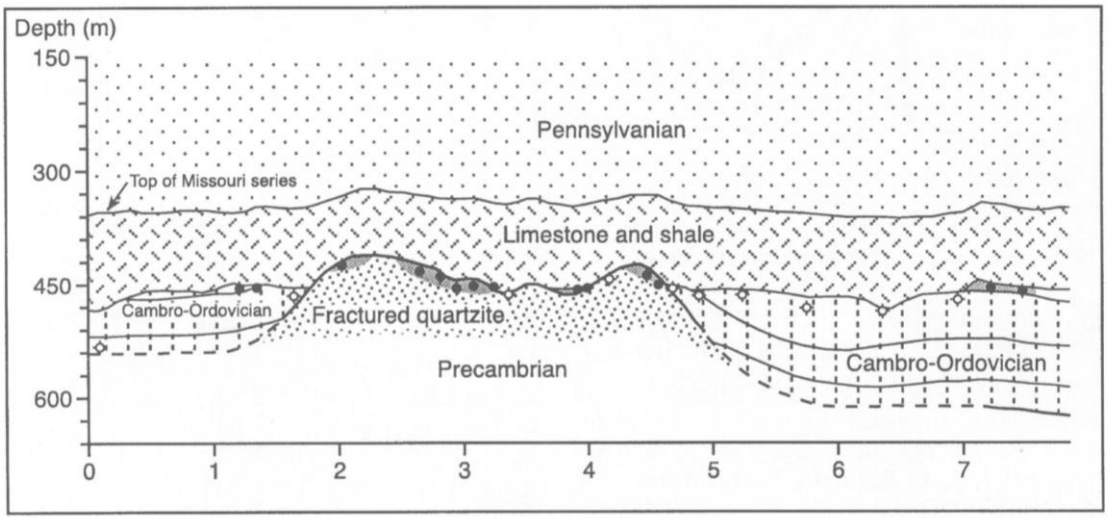
Slika 4-2. Vrste i mikroskopske fotografije rezervoarskih prostora u vulkanskim stijenama. a. riolitički ignimbrit; b. Vulkanska breča,; c. Lava, fenokristal feldspata; d. kvarc porfir; e. tuf; f. tuf (Mao i sur., 2015).

Zbog različitih evolucija bazena, u dubokim slojevima u bazenu Songliao uglavnom dominiraju ležišta plina u vulkanskim stijenama, dok u bazenu Bohai zaljeva te Erlian i Halar bazenima dominiraju ležišta nafte.

U Kini postoje tri paketa povoljnih vulkanskih stijena koje dolaze u intervalima karbon - perm, jura - kreda i paleogen razvijenih u postojećim naftnim bazenima. Preliminarne studije pokazuju da ukupne rezerve nafte u vulkanskim stijenama iznose 19–26 x 10^8 t, a rezerve prirodnog plina 4,2 x 10^{12} m^3 . Ukupne ekvivalentne rezerve ugljikovodika dosežu 52–59 x 10^8 t (Mao i sur., 2015).

5.2. SAD

U Kansasu se nafta proizvodi iz pretkambrijskih stijena podloge bazena, a pretkambrijske stijene uključuju kvarcit, škriljavac, gnajs i granit. Ležišta nafte u stijenama podloge bazena uključuju polja Orth, Ringwald, Kraft-Prusa, Beaver, Bloomer, Trapp, Eveleigh i Silicu. Matične stijene su kambrij-ordovicijski šejlovi i pensilvanijski šejlovi koji se nalaze pliće u odnosu na pretkambrijske stijene (slika 4-3.). Proizvodnja s polja kao što su Orth i Ringwald relativno je niska te proizvodne količine variraju između 120 i 190 barela nafte po danu (Koning i sur., 2013).

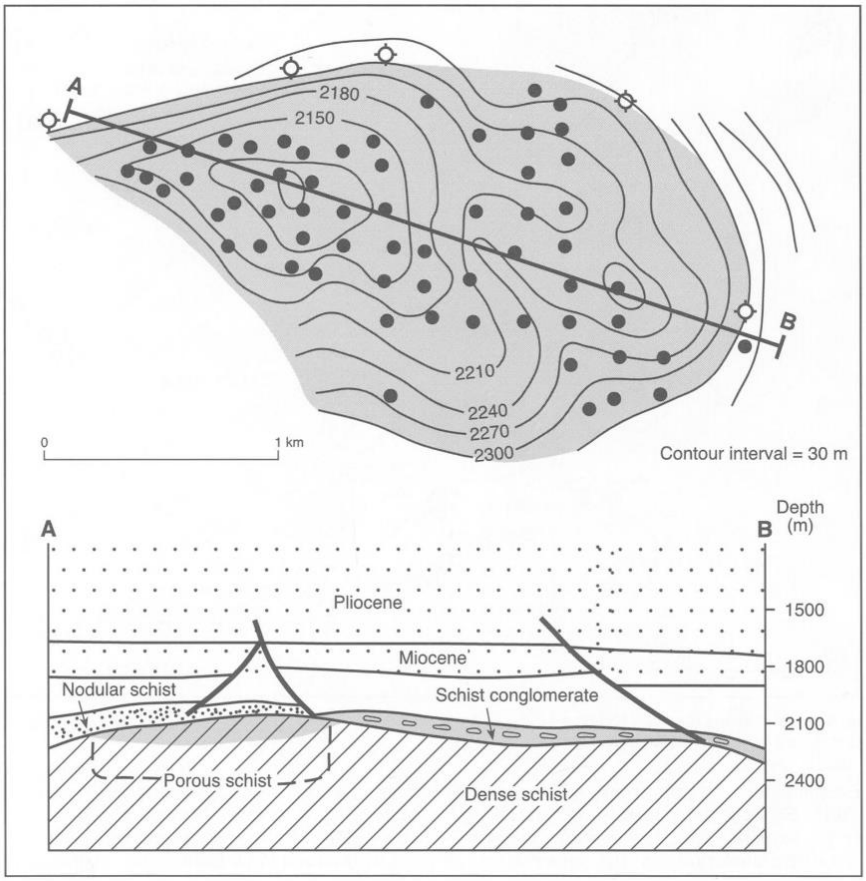


Slika 4-3. Proizvodnja nafte iz stijena podloge bazena u Kansasu. Nafta se dobiva iz bočnih kambrij-ordovicijskih ili nadređenih pensilvanijskih stijena (Landes i sur., 1960).

U Kaliforniji se nafta proizvodi iz ležišta u stijenama podloge bazena koje se sastoje od raspucanih jurskih škriljavaca. Polja koja sadrže ovakva ležišta uključuju polja Playa del Rey, El Segundo, Santa Maria, Wilmington i Edison.

Ležišta polja El Segundo se nalaze u raspucanim jurskim šriljavcima na zapadu te škriljavcima i konglomeratima na istoku. Prosječna dubina naftnog bazena u proizvodnji je oko 2 300 m, a prikaz profila naftnog polja dan je na slici 4-4. (Landes i sur., 1960).

Bušotine na polju Edison proizvodile su prosječno oko 1 000 barela nafte po danu. Polje Wilmington proizvelo je više od 22 milijuna barela nafte iz stijena podloge, a proizvodne količine variraju od 1 200 do 2 000 barela nafte po danu (Koning i sur., 2013).

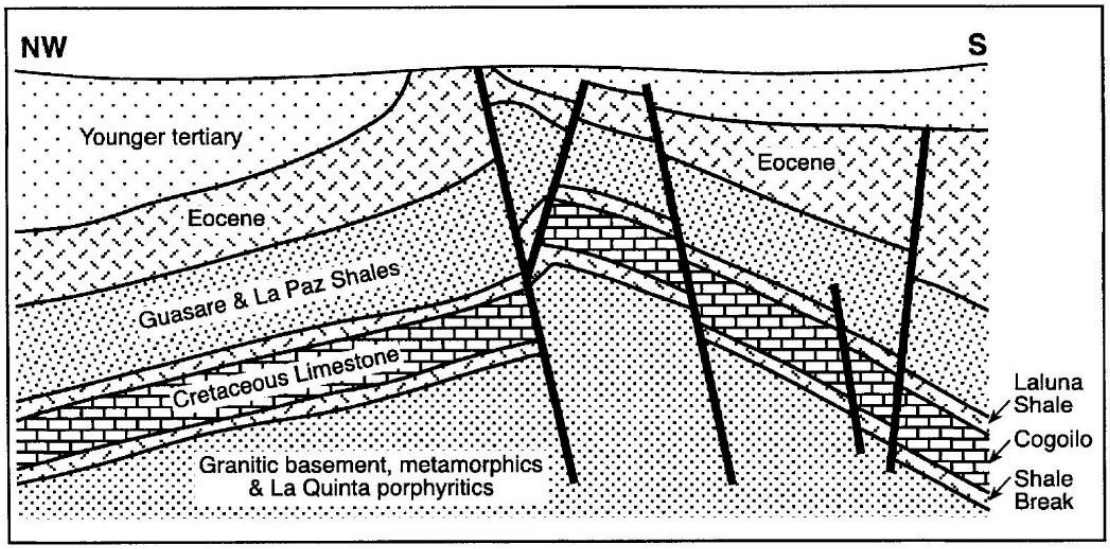


Slika 4-4. Profil polja El Segundo u Kaliforniji (Landes i sur., 1960).

5.3. Venezuela

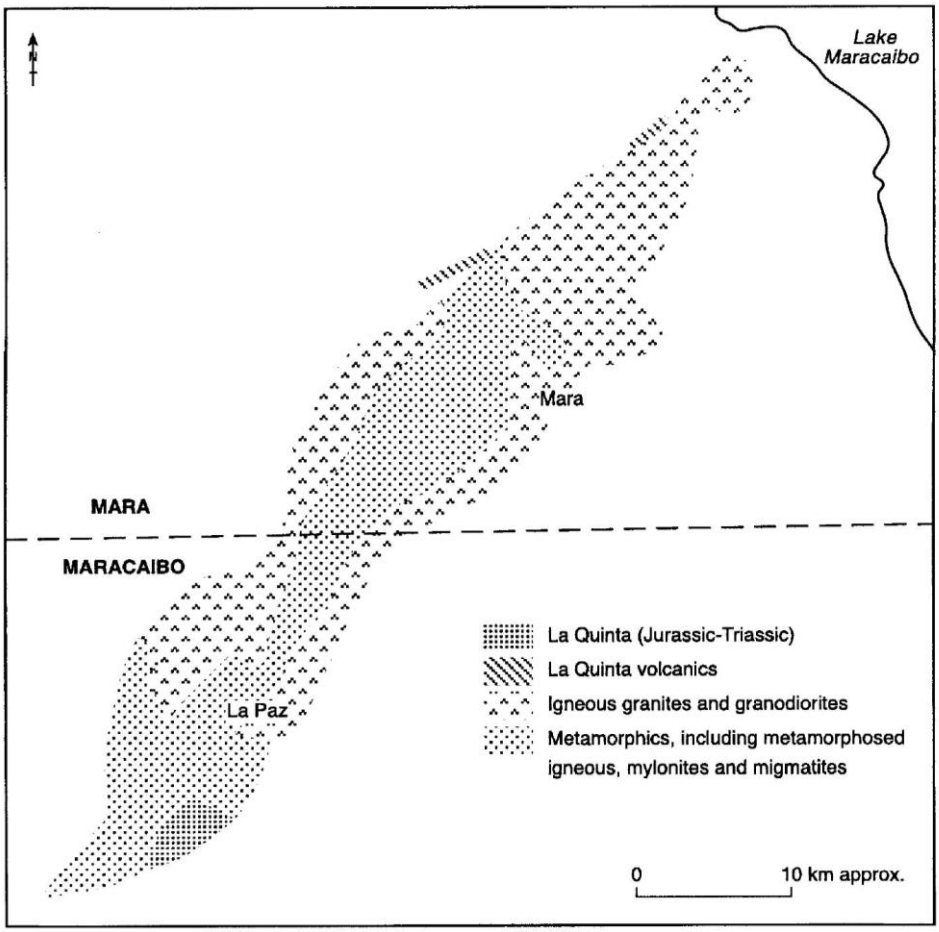
Polja La Paz i Mara nalaze se unutar venezuelskog bazena Maracaibo te se nafta dobiva iz razlomljenih granitnih i metamorfnih stijena podloge bazena. Dubina podloge bazena na ova dva polja kreće se od 2 750 m do 3 500 m, a ležišta se pojavljuju duž antiklinale pružanja SI-JZ, intenzivno borane i rasjednute (Stevenson, 1951).

Polje La Paz otkriveno je 1923. godine i proizvelo je više od 830 milijuna barela nafte iz krednih vapnenaca niske poroznosti i ispod-ležeće granitne podloge (Nelson i sur., 2000). Prve bušotine u ležištima stijena podloge izbušene su tek 1953. Kumulativna proizvodnja nafte iz stijena podloge bazena iznosi približno 245 milijuna barela, a preostale rezerve procijenjene su na od 80 milijuna barela (Talukdar i Marcano, 1994).



Slika 4-5. Geološki profil polja La Paz (Smith, 1955.)

Polje Mara otkriveno je 1944. te je proizvelo 27 milijuna barela nafte iz stijena podloge bazena. Preostale rezerve procjenjuju se na 5 milijuna barela nafte. Stijene podloge bazena su intenzivno raspucane, najčešće u okomitim ravninama (Smith, 1955).

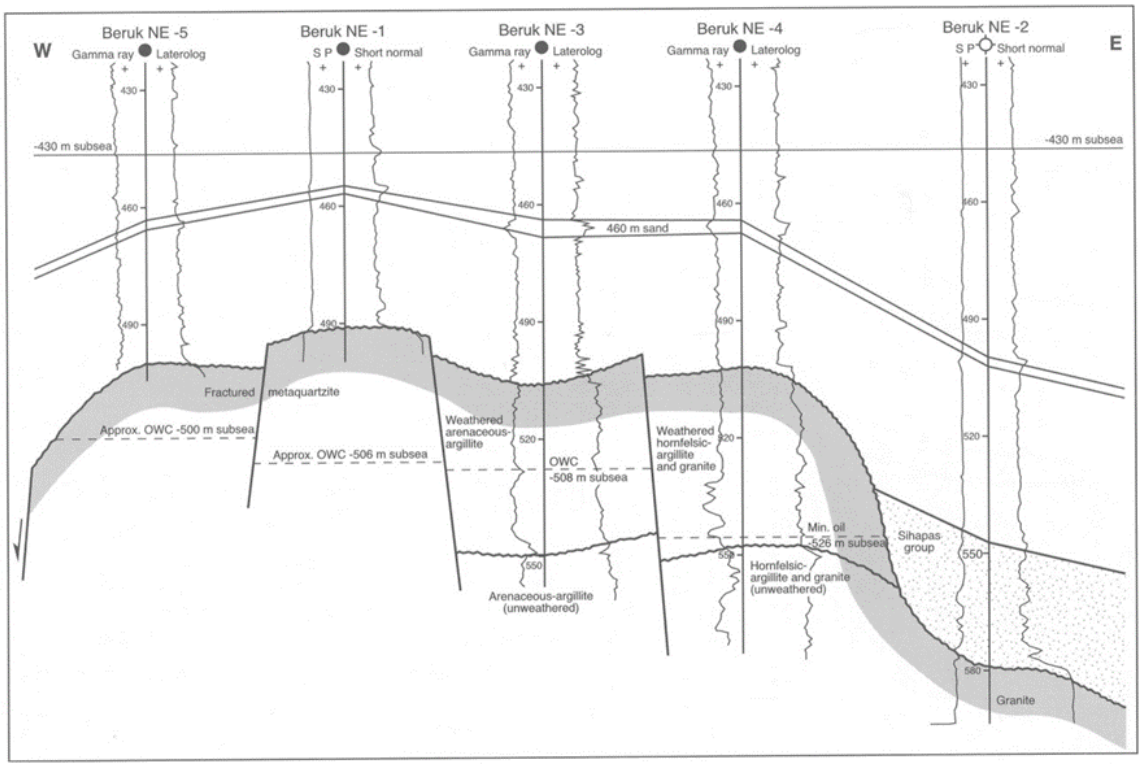


Slika 4-6. Poopćeni litološki sastav kolektorskih stijena naftnih polja Mara i Maracaibo (Stevenson, 1951.)

5.4. Indonezija

U Indoneziji je dugi niz godina proizvodnja nafte i plina iz stijena podloge bazena bila minimalna. Međutim, nedavno veliko otkriće plina u predpaleogenskim raspucanim granitima na jugu Sumatre u Indoneziji je dovelo do fokusiranja istraživanja na ležišta u stijenama podloge bazena.

Polje Beruk Sjeveroistok jedino je polje u naftonosnom bazenu središnje Sumatre koje proizvodi samo iz stijena podloge bazena (Koning i Darmono, 1984). Otprilike 2 milijuna barela nafte proizvedeno je iz kvarcita, argilita i trošnog granita. Stijenama podloge bazena K-Ar radiometrijskom metodom datirane su starosti koje variraju od ranog perma do rane krede, što ukazuje na složenu predpaleogensku geološku povijest. Polje Beruk Sjeveroistok karakteriziraju problemi u proizvodnji zbog velike varijabilnosti svojstava ležišnih stijena te prisutnosti najmanje četiri odvojena kontakta nafta-voda (Koning i sur., 2013).



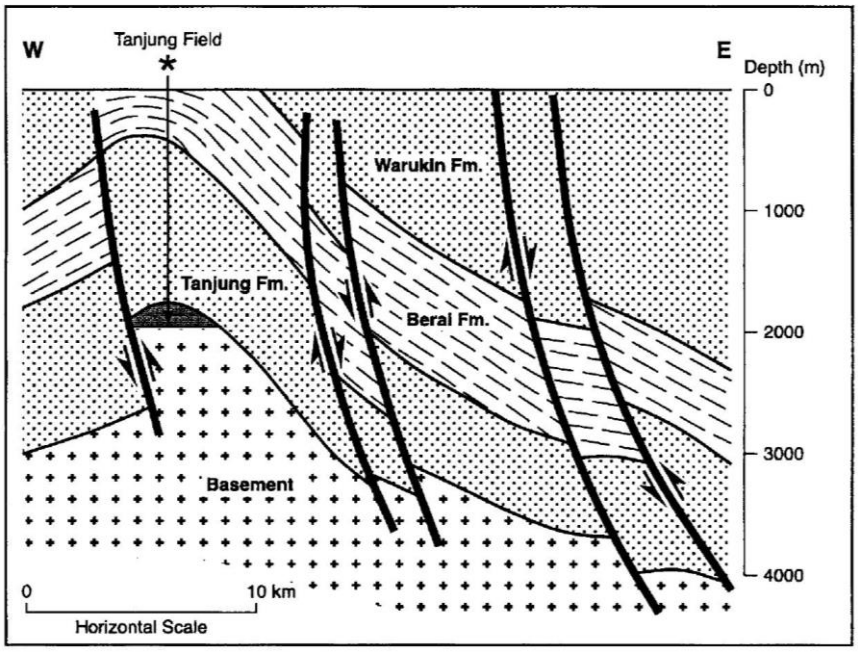
Slika 4-7. Strukturni presjek Beruk Sjeveroistok polja, Sumatra (Koning i Darmono, 1984).

Tri bušotine izbušene 1999. godine definirale su plinsko polje Suban koje se nalazi unutar lomljenih predpaleogenskim granita. Rezerve se procjenjuju na približno 5 bilijuna kubičnih

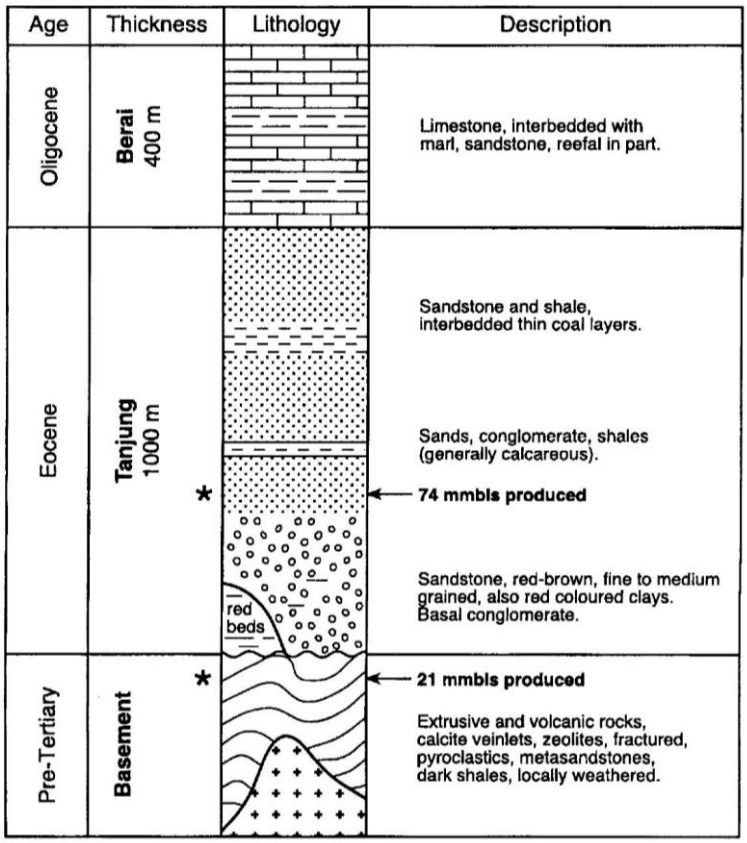
stopa plina. Područje gdje je polje Suban otkriveno je već bilo podvrgnuto brojnim istraživanjima u kojima se tražila nafta. Međutim nijedna kompanija nije izbušila dovoljno duboko, sve do stijena podloge kako bi otkrila divovsko plinsko polje Suban, sve do 1999. kada ga je otkrila kompanija Gulf Indonesia.

Polje Tanjung u Barito bazenu u južnom Kalimantanu otkriveno je 1938. godine i proizvelo je više od 21 milijuna barela nafte iz predpaleogenskim stijena podloge bazena. Profil kroz Barito bazen dan je slikom 4-8. Nafta se javlja u vulkanskim i piroklastičnim stijenama te metamorfoziranim pješčenjacima i glinencima koji su lokalno duboko istrošeni i lomljeni (slika 4-9.).

Polje Beruk Sjeveroistok i Tanjung imaju mnoge sličnosti. Na primjer, oba polja pojavljuju se unutar rasjednutih antiklinala. Debljina tercijarnih sedimenata na oba polja je manja od 2 000 m. Vjerojatne matične stijene za ova polja su bočni tercijarni šejlovi.



Slika 4-8. Strukturni profil Barito bazena, Kalimantan (Koning, 2000).



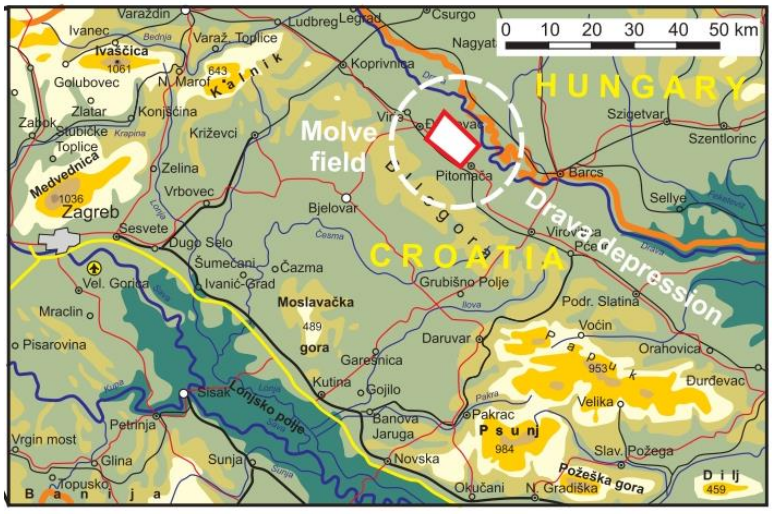
Slika 4-9. Litostratigrafski stup polja Tanjung, Kalimantan (Koning, 2000).

6 LEŽIŠTA NAFTE I PRIRODNOG PLINA U MAGMATSKIM I METAMOFRNIM STIJENAMA U HRVATSKOJ

6.1. Molve

Molve je najveće ležište plina i kondenzata u Hrvatskoj otkriveno 1974. godine. Ležište Molve je netipičan primjer ležišta Panonskog bazena jer se sastoji od 4 različita litofacijesa čija litologija obuhvaća i sedimentne stijene, ali i granit, gnajs, škriljavce i kvarcit. Geološke rezerve ležišta Molve za plin iznose 43 500 106 m^3 , a za kondenzat 3 106 m^3. Dubina ležišta je veća od 3 000 m. Polje ima ukupnu prosječnu poroznost ležišta od 8,17% te približnu prosječnu dnevnu proizvodnju od 2 900 000 m^3 plina i 166 m^3 kondenzata (Malvić, Velić 2010).

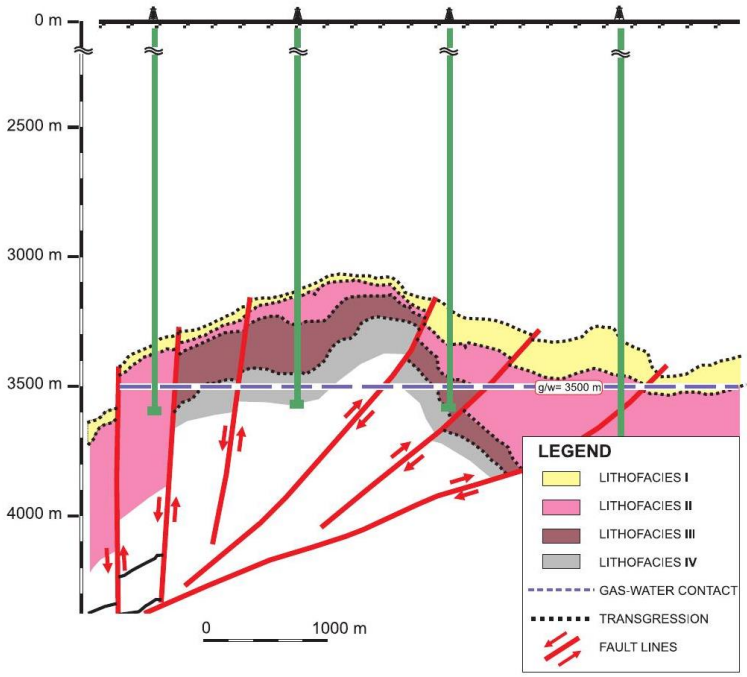
Sličnih karakteristika su i dva manja okolna polja Kalinovac i Stari Gradac, a zajedno s Molvama čine jednu geološku cjelinu. Plinsko-kondenzatno polje Kalinovac otkriveno je 1978. godine, dok je plinsko-kondenzatno polje Stari Gradac otkriveno 1980. godine.



Slika 5-1. Geografska lokacija polja Molve (Malvić, Velić 2010.)

Polje Molve izrazito je heterogeno te se sastoji od paleozojskih, mezozjskih i kenozojskih stijena. Ležišne stijene polja Molve razvrstane su prema starosti i litološkom sastavu u četiri

litofacijesa. Litofacijes I sastoji se od litotamnijskog vapnenca s biokalkarenitom, biokalkruditom i biomikritom te je rano do srednje miocenske starosti. Litofacijes II sastoji se od rano i kasno dijagenetskih dolomita, oolitskih dolomita, vapnenca, breča i konglomerata srednjeg do kasnog trijasa. Litofacijes III sastoji se od metapješčenjaka, kvarcita, sporadičnih dolomita, dolomitnih breča i šejla ranog trijasa. Litofacijes IV sastoji se od različitih metamorfnih i magmatskih stijena, uglavnom kataklastičnog granita, gnajsa i amfibolitičnog škriljavca devonske starosti. Litofacijes III najvažniji je za proizvodnju plina i kondenzata zbog najveće efektivne debljine te je najperspektivniji dio ležišta za daljnju proizvodnju (Malvić, Velić 2010).



Slika 5-2. Prikaz građe polja Molve (Malvić, Velić 2010).

6.2. Bizovac

Naftno polje Bizovac bilo je otkriveno još 1967. godine, a u proizvodnju pušteno tek 1989. godine (Elezović i sur., 2018; Velić, 2007).

Smješteno je u Dravskoj depresiji te je kompleksne strukturne građe (Hernitz i sur, 1995). Bizovac je u miocenu bio vulkanski otok koji je duboko potonuo u pliocenu. Polje je izgrađeno uglavnom od vulkanskih stijena i to raspucanih andezita koje pripadaju članu Bizovac Vukovarske formacije. Na andezite naliježu lapori Vinkovačke formacije, a tek mjestimično se pojavljuju konglomerati, pijesci i lapori Vukovarske formacije. Nedostatak sedimentnih stijena dijela Vukovarske formacije i cijele Valpovačke formacije upućuje na postojanje unutarmiocenske diskordancije (Hernitz, 1980).

Godine 1967., osim prve istražne bušotine, izrađene su još dvije bušotine, od kojih je jedna bušotina otkrila veće zalihe geotermalne vode. Danas je polje Bizovac u proizvodnji kao geotermalno ležište (Elezović i sur., 2018).

7 ZAKLJUČAK

Ležišta nafte i prirodnog plina u magmatskim i metamorfnim stijenama nisu slučajna, već to mogu biti vrlo profitabilna ležišta koja imaju svoje zakone migracije i akumulacije ugljikovodika te bi se kao takva trebale istraživati kao potencijalna ležišta ugljikovodika, a ne samo kao stijene podloge bazena.

Istraživanje ležišta nafte i plina u magmatskim i metamorfnim ležištima vrlo je složeno zbog kompleksnosti litološkog sastava i strukture samog ležišta te je zbog toga potrebno detaljno proučavanje takvih ležišta.

Do danas su sva velika vulkanska ležišta otkrivena u neposrednoj blizini matičnih stijena, tvoreći najpovoljniju kombinaciju izvora na dnu i/ili vrhu ležišta.
Na većim dubinama magmatske i metamorfne stijene pokazuju bolja ležišna svojstva nego sedimentne stijene upravo zbog načina postanka samih stijena te se zbog toga u dubokim dijelovima bazena treba fokusirati upravo na istraživanja ležišta ugljikovodika u magmatitima i metamorfitima.

Polje Beruk Sjeveroistok, Tanjung i Suban ukazuju na to da predpaleogenke stijene podloge bazena predstavljaju valjani cilj istraživanja nafte u zapadnoj Indoneziji te da istražne bušotine u tim bazenima treba izbušiti sve do stijene podloge bazena.
Bogata naftna i plinska polja u stijenama podloge bazena u Libiji, Vijetnamu, Indoneziji, SAD-u, Venezueli i drugdje služe kao podsjetnik da stijene podloge bazena mogu biti potencijalno dobra ležišta nafte ili prirodnog plina.

Najčešći tip zamki u ležištima magmatita i metamorfita su stratigrafske zamke „buried hill“ tipa, a takve su otkrivene i u hrvatskom dijelu Panonskog bazena. Najznačajnije otkrivene kolektorske stijene su magmatske i metamorfne stijene devonske starosti na polju Molve, a najznačajnije ležište u vulkanskim stijenama je u miocenskim andezitima polja Bizovac.

S obiljem preostalih resursa i velikim potencijalom za istraživanje, magmatska i metamorfna ležišta nafte i prirodnog plina važan su objekt budućih istraživanja ugljikovodika.

8 Popis literature

Objavljeni radovi

ELEZOVIĆ, I, ŠKRLEC, M, KOLBAH, S, (2018),: Konstrukcije proizvodnih geotermalnih bušotina u Hrvatskoj, *Nafta i Plin,* 38. No. 155., str. 60-78.

HERNITZ, Z, (1980),: *Dubinski strukturno tektonski odnosi u području istočne Slavonije*, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

HERNITZ, Z, VELIĆ, J, BARIĆ, G, (1995),: Origin of Hydrocarbons in the Eastern Part of the Drava Depression (Eastern Croatia), *Geologia Croatica,* 48 No. 1, str. 87-95.

KONING, T, (2000),: Oil production from basement reservoirs- examples from Indonesia, USA and Venezuela, *Proceedings of the 16th World Petroleum Congress, Calgary*

KONING, T, (2013),: Fractured and Weathered Basement Reservoirs: Best Practices for Exploration and Production – Examples from USA, Venezuela, and Brazil, *Adapted from poster presentation given at AAPG 2013 Annual Convention and Exhibition, Pittsburgh, Pennsylvania, May 19-22, 2013*

KONING T, DARMONO F. X. (1984),: The geology of the Beruk Northeast Field, Central Sumatra oil production from pre-Tertiary basement rocks. *Proceedings of the Thirteenth Annual Convention, May 29-30, 1984. Indonesian Petroleum Association, Jakarta, Indonesia*

LANDES, K, K, AMORUSO, J, J, CHARLESWORTH, L, J, HEANVY, F, LESPERANCE, P, J, (1960),: Petroleum resources in basement rocks, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 44, str. 1682-1691.

LE BAS, M, J, STRECKEISEN, A, L, (1991): The IUGS systematics of igneous rocks, *Journal of the Geological Society, London,* 148, str. 825-833.

LUGOVIĆ, B, (2011),: *Petrologija magmatita i metamorfita, interna skripta*, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

MALVIĆ, T, VELIĆ, J, (2010),: Relations between effective thickness, gas production and porosity in heterogeneous reservoirs: an example from the Molve Field, Croatian Pannonian Basin, *Petroleum Geoscience*, 16, str. 41-51

MAO, Z-G, ZHU, R-K, LUO, J-L, WANG, J,-H, DU, Z-H, SU, L, ZHANG, S-M, (2015),: Reservoir characteristics, formation mechanisms and petroleum exploration potential of volcanic rocks in China, *Petroleum Science,* 12, str. 54-66

PETROR, N, MCGAFREY K, J, W, (2003),: Hydrocarbons in Crystalline Rocks, *Geological Society, London, Special Publications 2003*, 214, str. 35-68

SCHUTTER, S, R, (2003),: Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks, *Geological Society, London, Special Publications 2003*, 214, str. 35-68.

SEUBERT, B, W, (2015),: Vulcaniclastic Petroleum Systems – Concept and Examples from Indonesia, *Proc. Indon. Petrol. Assoc., 39th Ann. Conv.*

SMITH, J, E, (1955),: Basement reservoir of La Paz--Mara Oil Fields, Western Venezuela, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 40, str. 381-385

STEVENSON, M, (1951),: The Cretaceous limestone producing areas of the Mara and Maracaibo Districts, Venezuela--reservoir and production engineering, *Third World Petroleum Congress*, section 1, preprint 14

TALUKDAR, S, C, MARCANO, F, (1994),: Petroleum systems of the Maracaibo Basin, Venezuela. In: Magoon, L. B. & Dow, W. G. (eds) The Petroleum System--From Source to Trap. *American Association of Petroleum Geologists, Memoirs*, 60, str. 463-481.

TIŠLJAR, J, (1999),: *Petrologija s osnovama mineralogije*, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

VELIĆ, J, (2007),: *Geologija ležišta nafte i plina,* Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

ZHAO, W-Z, ZOU, C-N, FENG, Z-Q, (2008),: Geological features and evaluation techniques of deep-seated volcanic gas reservoirs, Songliao Basin, *Petroleum Exploration and Development*, 35(2), str. 42-129

ZHU, X-M, ZHU, S-F, XIAN, B-Z, i sur., (2010),: Reservoir differences and formation mechanisms in the Ke-Bai overthrust belt, northwestern margin of the Junggar Basin, China. *Petroleum Science,* 7, str. 8-40

ZOU, C, WENZHI, Z, JIA, C, i sur. (2008),: Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China, *Acta Petrolei Sinica*, 35 (3), str. 257-272.

ZOU, C, ZHU, R, TAO, S, HOU, L, YUAN, X, ZHANG, G, SONG, Y, NIU, J, DONG, D, WU, X, LIU, S, JIANG, L, WANG, S, GUO, Q, YANG, Z, ZHANG, Y, ZHOU, C, BAI, B, (2017),: *Unconventional Petroleum Geology*, 2. izd., Elsevier Inc.

Neobjavljeni radovi

GARAŠIĆ, V, (2018),: nastavni materijali za kolegij Petrologija magmatskih i metamorfnih stijena, Merlin

KLASA: 602-04/21-01/47
URBROJ: 251-70-14-21-2
U Zagrebu, 9.9.2021.

Dora Rebeka Kunštić, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/47, URBROJ: 251-70-14-21-1 od 01.4.2021. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

LEŽIŠTA NAFTE I PRIRODNOG PLINA U MAGMATSKIM I METAMORFNIM STIJENAMA

Za voditeljicu ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Doc. dr. sc. Iva Kolenković Močilac nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditeljica:

(potpis)

Doc. dr. sc. Iva Kolenković Močilac

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Stanko Ružičić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)