

Procjena poroznosti korištenjem karotaže gustoće, neutronske i zvučne karotaže - primjer pješčenjačkih ležišta u Savskoj depresiji

Matešković, Petra

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:169:514250>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Prije diplomski studij naftnog rudarstva

**PROCJENA POROZNOSTI KORIŠTENJEM KAROTAŽE GUSTOĆE,
NEUTRONSKE I ZVUČNE KAROTAŽE – PRIMJER PJEŠČENJAČKIH
LEŽIŠTA U SAVSKOJ DEPRESIJI**

Završni rad

Petra Matešković

N4504

Zagreb, 2023.

PROCJENA POROZNOSTI KORIŠTENJEM KAROTAŽE GUSTOĆE, NEUTRONSKE I ZVUČNE
KAROTAŽE – PRIMJER PJEŠČENJAČKIH LEŽIŠTA U SAVSKOJ DEPRESIJI

Petra Matešković

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geofizička istraživanja i rudarska mjerenja
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Poroznost stijene je jedan od najvažnijih parametara koji možemo dobiti putem karotažnih mjerenja te se kao takva koristi za daljnje određivanje brojnih drugih svojstava ležišta. Postoje razni načini na koje se može određivati poroznost. To mogu biti laboratorijska mjerenja na uzorcima jezgara koja su obično smatrana najtočnijom metodom, s obzirom da se izravnim putem određuje poroznost, ali mogu biti i neizravne metode određivanja, poput karotažnih mjerenja. Najveći nedostatak karotažnih mjerenja je upravo u toj neizravnosti, odnosno činjenici da se potrebno osloniti na dodatne podatke i pretpostavke uvjeta i fizikalnih svojstava stijena na kojima se provodi mjerenje. To nerijetko dovodi do odstupanja i nepravilnosti prilikom interpretacije podataka, naročito ako se radi o složenijim geološkim uvjetima. Ipak, korištenjem softvera prilikom interpretacije i nekoliko karotažnih mjerenja, kao što su karotaža gustoće, zvučna i neutronska karotaža, omogućava se dobra procjena, te se mogu dobiti zadovoljavajuće vrijednosti koje značajnije ne odstupaju od onih dobivenih laboratorijskim putem.

Ključne riječi: poroznost, volumen gline, karotažna mjerenja, *Interactive Petrophysics*

Završni rad sadrži: 24 stranice, 4 tablice, 12 slika i 6 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Jasna Orešković, izvanredna profesorica RGNF-a

Ocjenjivači: Dr. sc. Jasna Orešković, izvanredna profesorica RGNF-a

Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNF-a

Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF-a

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA	IV
1. UVOD	1
2. POROZNOST	2
2.1. Određivanje poroznosti	2
3. METODE MJERENJA	3
3.1. Električne metode	3
3.1.1. Spontani potencijal	3
3.2. Radioaktivne metode	4
3.2.1. Karotaža gustoće.....	4
3.2.2. Gama karotaža.....	5
3.2.3. Neutronska karotaža.....	7
3.3. Zvučna karotaža	8
3.3.1. Određivanje poroznosti iz zvučne karotaže	8
4. ANALIZA PODATAKA U PROGRAMU <i>INTERACTIVE PETROPHYSICS</i>.....	10
4.1. Principi analize podataka u programu <i>Interactive Petrophysics</i>	10
4.2. Određivanje propusnih i nepropusnih intervala	10
4.3. Izračun volumnog udjela gline	12
4.4. Izračun poroznosti.....	16
5. ZAKLJUČAK	23
6. LITERATURA	24

POPIS SLIKA

Slika 3-1 Krivulja spontanog potencijala (preuređeno iz Johnson i Pile, 1988.)	3
Slika 3-2 Primjer krivulje gama-karotaže koja prati trend povećanih vrijednosti u niskopropusnim naslagama, a smanjenih vrijednosti u visokopropusnim (preuređeno iz Rider, 2002).....	6
Slika 3-3 Usporedba krivulje gama-karotaže (crvena linija) s krivuljom spontanog potencijala (plava linija).....	7
Slika 4-1 Karotažne krivulje i definirani propusni i nepropusni slojevi u Interactive Petrophysicsu, za bušotinu A	11
Slika 4-2 Karotažne krivulje i definirani propusni i nepropusni slojevi u Interactive Petrophysicsu za bušotinu B.....	12
Slika 4-3 Prikaz krivulje volumena gline (VCLAV) dobivenog iz krivulje prirodne gama karotaže (GR), za bušotinu A	14
Slika 4-4 Prikaz krivulje volumena gline (VCLAV) dobivenog iz krivulje prirodne gama karotaže (GR) za bušotinu B	15
Slika 4-5 Redom prikazane krivulje su krivulja gama-karotaže, krivulja volumena gline, krivulja zvučne karotaže i krivulja izračunate poroznosti za bušotinu A	16
Slika 4-6 Redom prikazane krivulje s lijeva na desno su krivulja gama-karotaže, krivulja volumena gline, krivulja zvučne karotaže i krivulja poroznosti za bušotinu B.....	17
Slika 4-7 Histogram poroznosti za bušotinu A. Boje stupaca odgovaraju bojama propusnih slojeva 1-4 na Slici 4-5.....	18
Slika 4-8 Histogram poroznosti za bušotinu B. Boje stupaca odgovaraju bojama propusnih slojeva 1-4 na Slici 4-6.....	19
Slika 4-9 Histogram vrijednosti kompenzirane neutronske karotažom za bušotinu A.....	21

POPIS TABLICA

Tablica 4-1 Vrijednosti srednje poroznosti za bušotinu A (slojevi od 1 do 4) i za bušotinu B (slojevi od 1 do 3).	10
Tablica 4-2 Vrijednosti poroznosti iz histograma za bušotinu A.	19
Tablica 4-3 Vrijednosti poroznosti iz histograma za bušotinu B.	20
Tablica 4-4 Vrijednosti kompenzirane neutronske karotaže za pojedini sloj	21

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
\emptyset	-	poroznost
V_p	m^3	volumen pora
V_m	m^3	volumen matriksa stijene
V_{uk}	m^3	ukupni volumen
ρ_b	kg/m^3	volumna gustoća izmjerena karotažom
ρ_{ma}	kg/m^3	gustoća matriksa stijene
ρ_f	kg/m^3	gustoća fluida u pornom prostoru
S_{xo}	-	zasićenje isprane zone filtratom isplake
ρ_h	kg/m^3	gustoća ugljikovodika
ρ_{mf}	kg/m^3	gustoća filtrata isplake
V	m/s	brzina vala kroz stijenu
V_f	m/s	brzina vala kroz porni fluid u stijeni
V_m	m/s	brzina vala kroz matriks stijene
Δt	$\mu s/m$	mjereno intervalno vrijeme
Δt_m	$\mu s/m$	vrijeme prolaska vala kroz matriks stijene
V_{Cl}	-	volumni udio gline
GR_{mjer}	GAPI	očitana vrijednost gama karotaže na dubini na kojoj se određuje V_{Cl}
GR_{min}	GAPI	radioaktivnost čistih naslaga s 0% gline
GR_{max}	GAPI	radioaktivnost gline
ρ_{Cl}	kg/m^3	gustoća mokre gline
C_p	-	korekcijski faktor
SP	mV	krivulja spontanog potencijala
CAL	mm	krivulja kalipera
AC	$\mu s/m$	krivulja zvučne karotaže
DEN	kg/m^3	krivulja karotaže gustoće
GR	GAPI	krivulja gama karotaže
CN	-	krivulja kompenzirane neutronske karotaže
$VCLAV$	-	krivulja volumnog udjela gline
PHI	-	krivulja poroznosti

1. UVOD

U gotovo svakoj fazi procesa istraživanja i proizvodnje ugljikovodika se koriste karotažna mjerenja, te kao takva predstavljaju vrlo bitan korak prilikom donošenja odluka za vrijeme bušenja i završetka bušotine. To su vrlo detaljni zapisi geofizičkih mjerenja koja su provedena unutar bušotine. Postoje mnogobrojne vrste karotažnih mjerenja. Ti zapisi mogu predstavljati različite pojave, od kojih su neke spontane, poput gama zračenja, odnosno mjerenje prirodne gama-radioaktivnosti pomoću sonde koja sadrži osjetljiv detektor zračenja. Ili to mogu biti inducirana mjerenja, kao što je to slučaj sa zvučnom karotažom, gdje se pomoću odašiljača na sondi emitira elastični val (zvuk) u stijenu te se mjeri vrijeme potrebno da taj val dođe do prijemnik (Rider, 2002).

U svakom slučaju, karotažna mjerenja su nužno sredstvo pomoću kojeg možemo odrediti brojne parametre ležišnih stijena od kojih je jedna od najvažnijih poroznost, odnosno volumen pora u stijeni u odnosu na ukupni volumen stijene. Poroznost, kao i propusnost, je parametar koji je ključan prilikom određivanja količine, vrste i, posljedično, protoka ležišnih fluida. Svrha rada je prikaz određenih fizikalnih parametara koji su posljedica električnih, radioaktivnih i elastičnih svojstava stijena te određivanje poroznosti pomoću tih parametara korištenjem različitih metoda obrade karotažnih podataka u programu *Interactive Petrophysics*.

2. POROZNOST

Prilikom procesa sedimentacije ne formira se u potpunosti kompaktna stijena, već nastaje slobodan prostor u stijeni koji je obično ispunjen nekim fluidom (Johnson i Pile, 1988) Obujam tog prostora u odnosu na ukupnu stijensku masu naziva se poroznost te se računa prema (Wisconsin Geological and Natural History Survey, 2023):

$$\emptyset = \frac{V_p}{V_{uk}} = \frac{V_{uk} - V_m}{V_{uk}} \quad (2-1)$$

Pri čemu je: \emptyset – poroznost

V_p – volumen pora

V_m – volumen matriksa

V_{uk} – ukupni volumen (mineralnog dijela zajedno s pornim prostorom).

U tim porama dolazi do akumulacije pornih fluida poput slojne vode, nafte ili plina.

Poroznost može biti *primarna*, odnosno poroznost koja je rezultat uvjeta u kojima je stijena nastala te *sekundarna*, odnosno poroznost koja je posljedica geoloških procesa u kasnijim fazama (npr. djelovanje tektonskih sila i otapanja). Druga, vrlo važna podjela vrste poroznosti u stijenama su *ukupna* i *efektivna* poroznost. Ukupna poroznost predstavlja omjer ukupnog pornog prostora u stijeni i ukupnog volumena stijene, a efektivna poroznost je ukupna poroznost umanjena za volumen koji zauzimaju šejlovi odnosno gline (Ellis i Singer, 2008).

2.1. Određivanje poroznosti

Poroznost se može određivati mjerenjem na jezgrama u laboratoriju (uz simulaciju ležišnih uvjeta temperature i tlaka) ili "*in situ*" pomoću geofizičkih mjerenja u bušotini, koja u svojoj osnovnoj podjeli mogu biti zvučna, radioaktivna ili električna. (Johnson i Pile, 1988.) Prilikom izrade rada, proračun poroznosti u potpunosti se temeljio na postojećim geofizičkim mjerenjima dviju različitih bušotina sa istog polja. Točnije, za obje bušotine u programu su za interpretaciju i proračun poroznosti korištene krivulje: spontanog potencijala, kalipera, zvučne karotaže, karotaže gustoće, gama-karotaže te kompenzirane neutronske karotaže.

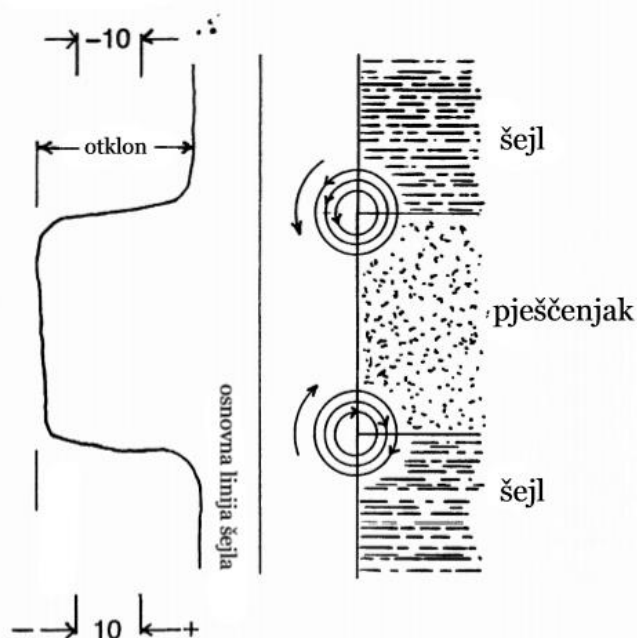
3. METODE MJERENJA

3.1. Električne metode

3.1.1. Spontani potencijal

Spontani ili prirodni potencijal se svrstava u električne metode mjerenja koji predstavlja prirodno prisutan napon (razliku potencijala) koja nastaje zbog kontakta između vodljive isplake i slojne vode u ispranoj zoni. Iz tog razloga se mjerenje spontanog potencijala može provoditi samo onda kada je bušotina ispunjena isplakom na bazi vode. Najčešća primjena spontanog potencijala je u određivanju propusnih i nepropusnih intervala u stijenama ili za određivanje električne otpornosti slojne vode (Johnson i Pile, 1988)

krivulja spontanog potencijala



Slika 3-1 Krivulja spontanog potencijala (preuređeno iz Johnson i Pile, 1988.)

Spontani potencijal je obično mjeren u milivoltima. Na Slici 3-1, relativno konstantna linija nasuprot šejlovima se naziva osnovna linija šejla (ili osnovna linija lapora u slučaju sloja lapora). Nasuprot zone u kojoj je pješčenjak, krivulja spontanog potencijala je obično otklonjena u lijevu stranu, negativno, jer je isplaka manjeg saliniteta od slojne vode, u suprotnom bi otklon bio u desno. Dakle, ako se radi o propusnim stijenama vidljiv je otklon krivulje spontanog potencijala od osnovne linije šejla (lapora), a ako se radi o izrazito slabo propusnoj stijeni, kao što su to šejlovi ili lapori, vrijednosti su bliže vrijednostima osnovne linije.

3.2. Radioaktivne metode

Radioaktivne metode su sve metode mjerenja koje ili detektiraju prisutnost nestabilnih izotopa u stijeni (odnosno radioaktivnog zračenja) ili emitiraju radioaktivno zračenje u stijenu. Radioaktivne metode su značajne po tome jer prodorna moć čestica i fotona omogućuje njihov neometan prolazak i kroz zacijevljen kanal bušotine, te se mogu koristiti neovisno o vrsti fluida u bušotini. (U.S. Environmental Protection Agency, 2016) Radioaktivne metode korištene u svrhu izrade ovog rada su gama-karotaža, karotaža gustoće i neutronska karotaža (kompenzirana). Radioaktivnost je mjerena na način da se čestice, odnosno gama-fotoni, konvertiraju u elektroničke pulseve, koji se potom mogu prebrojati i rasporediti kao funkcija njihove energije. S obzirom da stijene sadrže različite količine nestabilnih elemenata, sadrže i određenu količinu prirodne radioaktivnosti. Glavni izvori te radioaktivnosti u stijenama su izotop torija (^{232}Th), izotop kalija (^{40}K) i izotopi urana (^{238}U i ^{235}U). Najzastupljeniji je izotop kalija, a najčešće se nalazi u laporima, šejlovima i glinama. (Rider, 2002)

3.2.1. Karotaža gustoće

Primarna svrha karotaže gustoće je određivanje gustoće stijene, a zatim i poroznosti. Princip mjerenja se sastoji u tome da sonda koja sadrži radioaktivni izvor (najčešće više njih) gama-zraka i detektore, emitira gama-fotone koji zatim prolaze kroz stijenu. Tako gube energiju, pa je samim time i manja količina zraka registrirana na detektoru što je stijena veće gustoće. (Rider, 2002)

Kako bismo mogli primijeniti ovaj princip mjerenja gustoće stijene za proračun poroznosti, moramo unaprijed znati (ili barem pretpostaviti) gustoću matriksa stijene i gustoću fluida koji se nalazi u porama. Takve pretpostavke se rade za područja gdje je litologija poznata. Dakle, radi se o podacima iz literature ili o podacima laboratorijskih mjerenja. Za pješčenjake se uzima da je gustoća matriksa jednaka $2,65 \text{ g/cm}^3$, što odgovara gustoći kvarca, za dolomite se uzima vrijednost gustoće $2,87 \text{ g/cm}^3$, a za vapnence je to raspon vrijednosti između $2,68$ i $2,71 \text{ g/cm}^3$. Fluid u porama je slojna voda, nafta ili plin, ali s obzirom da sonda za mjerenje ima mali doseg, kao referentna vrijednost se obično uzima $1,0 \text{ g/cm}^3$ ili gustoća filtrata isplake. (Ellis i Singer, 2008) Te iste vrijednosti su korištene i

u *Interactive Petrophysicsu* za proračun poroznosti. Izraz pomoću kojeg se iz karotaže gustoće računa poroznost je:

$$\rho_b = \rho_{ma} - \Phi(\rho_{ma} - \rho_f) \quad (3-1)$$

gdje je: ρ_b – volumna gustoća

ρ_{ma} – gustoća čvrstog dijela stijene (matriks)

ρ_f – gustoća fluida u pornom prostoru

Veličinu ρ_f , kad je sloj zasićen ugljikovodicima izražavamo drugačije, jer u slučaju zasićenja ugljikovodicima, fluid u pornom prostoru nije samo filtrat isplake:

$$\rho_f = S_{xo}\rho_{mf} + (1 - S_{xo})\rho_h \quad (3-2)$$

gdje je:

S_{xo} – zasićenje isprane zone filtratom isplake

$1 - S_{xo}$ – rezidualno zasićenje

ρ_h – gustoća ugljikovodika

ρ_{mf} – gustoća filtrata isplake.

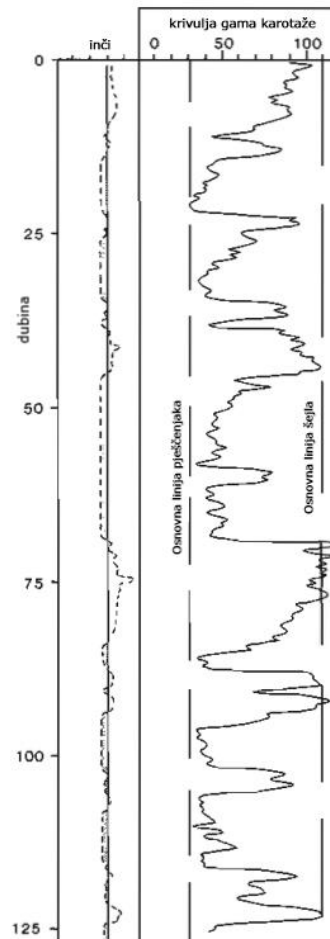
Konačno, izraz za poroznost dobiven uz pomoć mjerenja karotaže gustoće je:

$$\Phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} [\%] \quad (3-3)$$

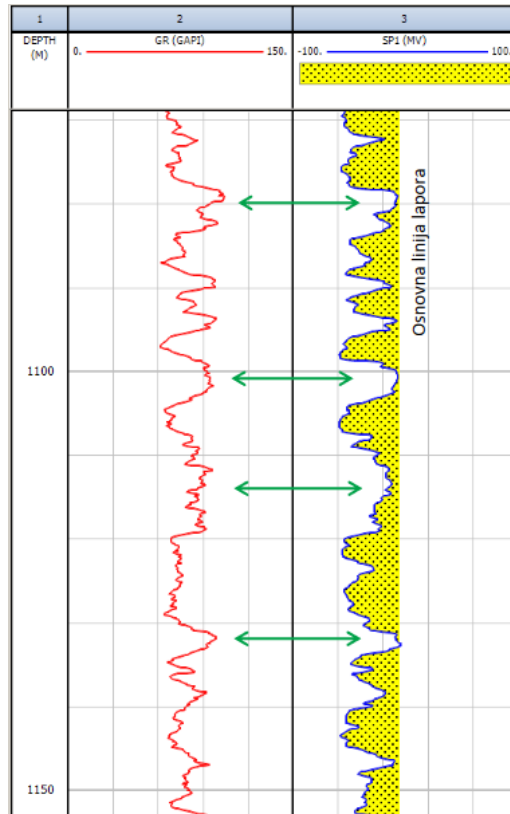
3.2.2. Gama karotaža

Ranije je spomenuto da su najzastupljeniji izotopi u stijenama izotopi kalija, uranija i torija, te da se kao takvi najčešće pronalaze u nepropusnim stijenama poput šejlova, lapora i glina. To znači da će krivulja gama radioaktivnosti pokazivati visoke vrijednosti u nepropusnim naslagama, a puno manje vrijednosti u propusnim naslagama. Iz tog razloga se krivulja gama-radioaktivnosti koristi uz ranije spomenutu krivulju spontanog potencijala za

odvajanje propusnih (niskoradioaktivnih) i nepropusnih (viskoradioaktivnih) naslaga što se jako dobro vidi na Slici 3-3. Ono za što se još koristi (a korišteno je i u radu) je za izračunavanje volumnog udjela gline (formula 4-1).



Slika 3-2 Primjer krivulje gama-karotaže koja prati trend povećanih vrijednosti u niskopropusnim naslagama, a smanjenih vrijednosti u viskopropusnim (preuređeno iz Rider, 2002)



Slika 3-3 Usporedba krivulje gama-karotaže (crvena linija) s krivuljom spontanog potencijala (plava linija)

3.2.3. Neutronska karotaža

Bombardiranjem stijene sa brzim neutronima iz kemijskog izvora na sondi, može se mjeriti odgovor stijene kao funkcija količine prisutnih vodikovih atoma u stijeni. S obzirom da većina vodikovih atoma dolazi od molekula vode i nafte, i s obzirom da su u stijeni prisutne ili jedan ili oba fluida, možemo odrediti poroznost preko količine vodikovih atoma. (Johnson i Pile, 1988.) Danas se koristi kompenzirana neutronska karotaža, odnosno umjesto jednog, sonda sadrži dva ili više detektora kako bi se smanjio utjecaj isplačnog obloga i isplake u bušotini. Ograničenja ovakvog mjerenja su prisutnost glina u stijenama i pore ispunjene plinom. Gline u porama sadrže vodu te kemijski vezan vodik u kristalnoj rešetci pa neutronska karotaža daje prevelike vrijednosti. Plin ima manju koncentraciju vodika u odnosu na naftu i vodu, pa su vrijednosti smanjene. Dakle, osnovna primjena neutronske karotaže je u određivanju poroznosti i sadržaja fluida u porama.

3.3. Zvučna karotaža

Mjerenje zvučnom karotažom se zasniva na principu da se zvučni valovi koji se odašilju sa sonde šire različitim brzinama u različitim vrstama materijala, odnosno stijenama i fluidima unutar stijene. Brzina rasprostiranja vala kroz stijenu ovisi o litologiji, kompakciji stijene, pornim fluidima te poroznosti stijene. Ako je poznata litologija, uz pomoć intervalnog vremena (vrijeme potrebno valu da prijeđe put kroz stijenu, od odašiljača do prijemnika) može se odrediti poroznost. Intervalno vrijeme se izražava u mikrosekundama po metru ($\mu\text{s/m}$).

3.3.1. Određivanje poroznosti iz zvučne karotaže

Poroznost se obično izračunava uz pomoć Wyllieve jednadžbe. Ona se temelji na tome da intervalno vrijeme zvučnog vala koji prolazi kroz stijenu koja je zasićena nekim pornim fluidom ovisi o dvije vrste brzina, brzini prolaska vala kroz matriks stijene i brzini prolaska vala kroz fluid u porama (U.S. Environmental Protection Agency, 2016.):

$$\frac{1}{V} = \frac{\phi}{V_f} + \frac{(1-\phi)}{V_m} \quad (3-4)$$

gdje je:

V – brzina vala kroz stijenu,

V_f – brzina vala kroz porni fluid u stijeni,

V_m – brzina vala kroz matriks stijene,

Formula 3-4 izražena pomoću intervalnog vremena glasi:

$$\Delta t = \phi \Delta t_f + (1 - \phi) \Delta t_m \quad (3-5)$$

gdje je:

Δt – mjereno intervalno vrijeme,

Δt_m – vrijeme prolaska vala kroz čvrsti dio stijene,

Δt_f – vrijeme prolaska vala kroz fluid u pornom prostoru,

Iz formule 3-5 slijedi formula za poroznost:

$$\emptyset = \frac{\Delta t - \Delta t_m}{\Delta t_f - \Delta t_m}. \quad (3-6)$$

4. ANALIZA PODATAKA U PROGRAMU *INTERACTIVE PETROPHYSICS*

Za analizu su uzeti podaci o karotažnim mjerenjima sa dvije bušotine istog polja; ovdje nazvane bušotina A i bušotina B. Kolektorske naslage u obje bušotine izgrađene su od sitnozrnatih do srednjezrnatih pješčenjaka i pijesaka koje su prožete proslojcima lapora (Linarić et al., 2000). U Tablici 4-1 su navedene očekivane srednje vrijednosti poroznosti za pojedine slojeve koji predstavljaju ležišne slojeve, a rezultat su laboratorijskih mjerenja na jezgrama.

Tablica 4-1 Vrijednosti srednje poroznosti za bušotinu A (slojevi od 1 do 4) i za bušotinu B (slojevi od 1 do 3).

Sloj	Srednja vrijednost poroznosti (%)
1	29
2	26
3	26
4	26

4.1. Principi analize podataka u programu *Interactive Petrophysics*

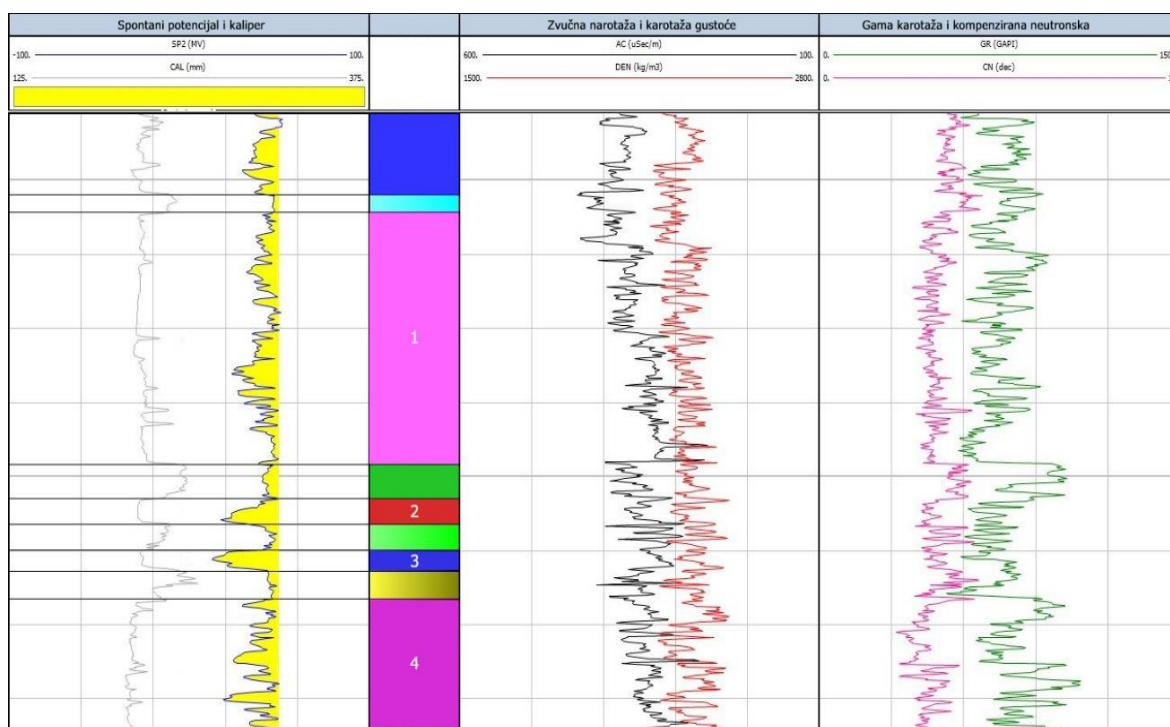
Dva temeljna principa na kojima se zasniva analiza karotažnih mjerenja u programu *Interactive Petrophysics* u ovom radu su:

- 1) Kvalitativna analiza – određivanje propusnih i nepropusnih intervala za svaku bušotinu
- 2) Kvantitativna analiza – određivanje volumnog udjela gline i poroznosti za svaku bušotinu.

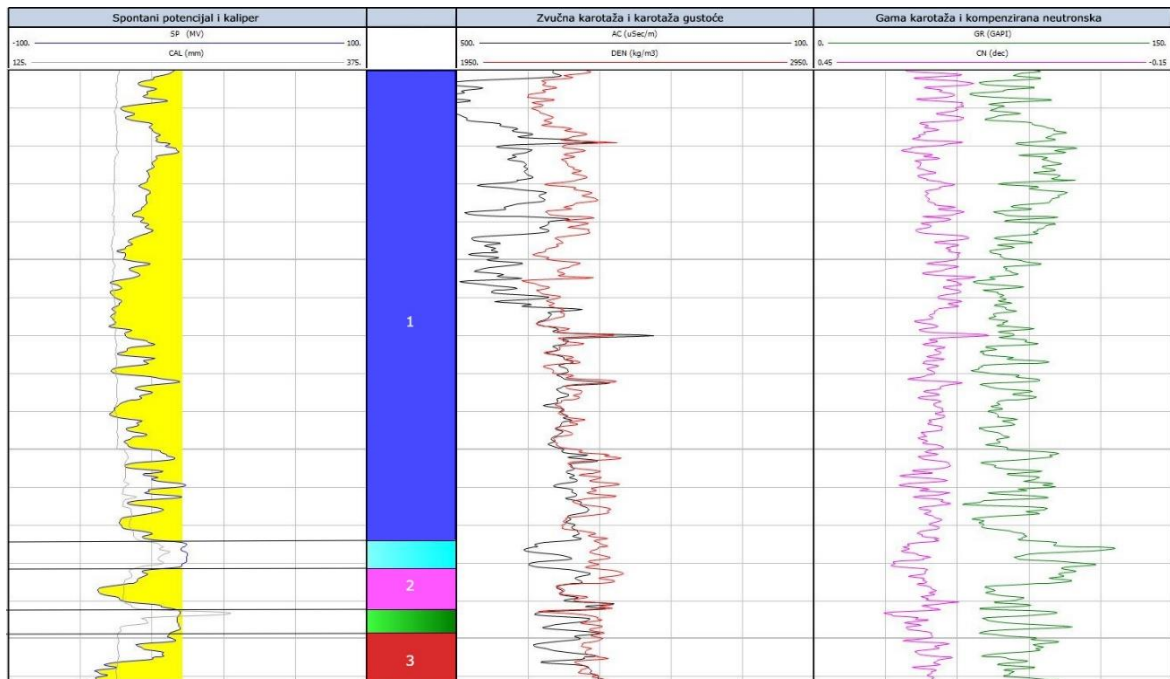
4.2. Određivanje propusnih i nepropusnih intervala

S obzirom da je nemoguće za očekivati da su petrofizikalna svojstva konstantna duž cijelog intervala, pogotovo u slučaju duljih intervala, potrebno je u skladu s promjenom tih svojstava definirati intervale. Kvalitativna analiza za određivanje propusnih i nepropusnih

intervala se temeljila prvenstveno na krivuljama spontanog potencijala (SP), kalipera (CAL) i prirodne gama-radioaktivnosti (GR) . U skladu s tim određeni su propusni intervali za bušotinu A i prikazani na Slici 4-1, te propusni i nepropusni intervali za bušotinu B, prikazani na Slici 4-2. Pri tome su propusni intervali označeni brojevima (1 do 4), dok neoznačeni intervali predstavljaju nepropusne intervale.



Slika 4-1 Karotažne krivulje i definirani propusni i nepropusni slojevi u Interactive Petrophysicsu, za bušotinu A



Slika 4-2 Karotažne krivulje i definirani propusni i nepropusni slojevi u Interactive Petrophysicsu za bušotinu B

Za bušotinu B, zbog činjenice da krivulja spontanog potencijala u korelaciji s ostalim krivuljama ne daje jasne granice slojeva (na što značajan utjecaj mogu imati i već spomenuti proslojci lapora u kolektorskim naslagama), prvi propusni interval na Slici 4-2 (označen brojem 1) zapravo objedinjuje nekoliko puno tanjih nepropusnih proslojaka lapora sa svim propusnim slojevima, te će se kao takav uzeti u obzir prilikom komentiranja procjene poroznosti dobivene kvantitativnim metodama.

4.3. Izračun volumnog udjela gline

Određivanje volumnog udjela gline je vrlo bitno iz nekoliko razloga. Određivanjem tog volumena se pridonosi daljnjoj karakterizaciji i predviđanju ponašanja slojeva koji mogu sadržavati ugljikovodike i proizvodnju istih. Čak i manji udio gline može imati velik utjecaj, što je bitno jer su gotovo sve ležišne stijene u nekom postotku i zaglinjene. Volumni udio gline u stijeni značajno utječe na poroznost te stijene. Kad su minerali glina prisutni u stijeni oni zauzimaju i određeni porni prostor, ali vrlo malo pridonose ukupnoj poroznosti te stijene jer su vrlo kompaktni i nepropusni, što je vrlo bitno sa stanovišta proizvodnje ugljikovodika.

Ovaj postupak je zahtijevao korištenje krivulja prirodne gama karotaže, karotaže gustoće i zvučne karotaže. Kao što je već ranije spomenuto u trećem poglavlju, jedna od glavnih

svrha gama-karotaže je određivanje volumnog udjela gline. Prvi korak je izračun prema sljedećem linearnom modelu:

$$V_{Cl} = \frac{GR_{mjer} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (4-1)$$

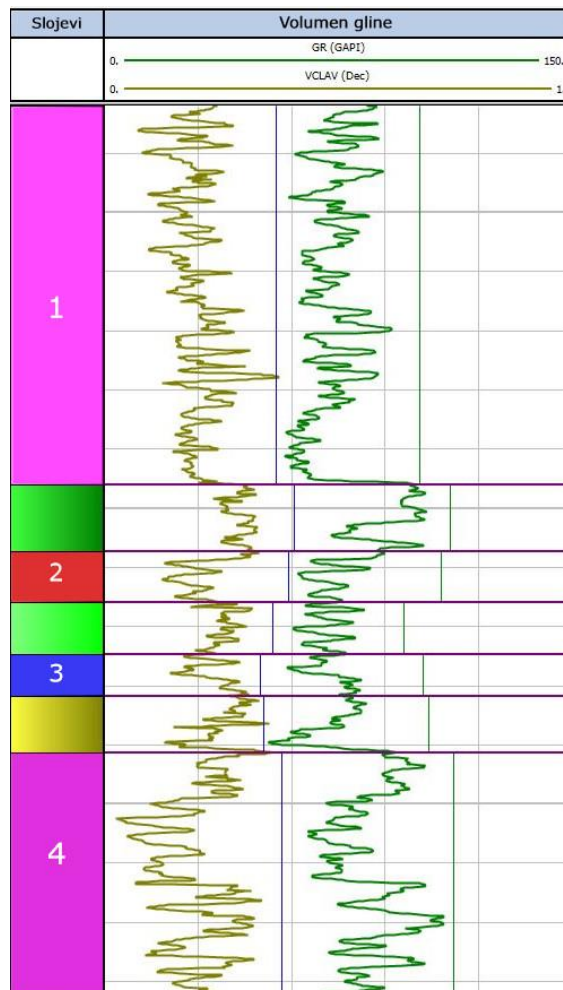
gdje su:

GR_{mjer} – vrijednost očitana na krivulji na dubini na kojoj se određuje V_{Cl} ,

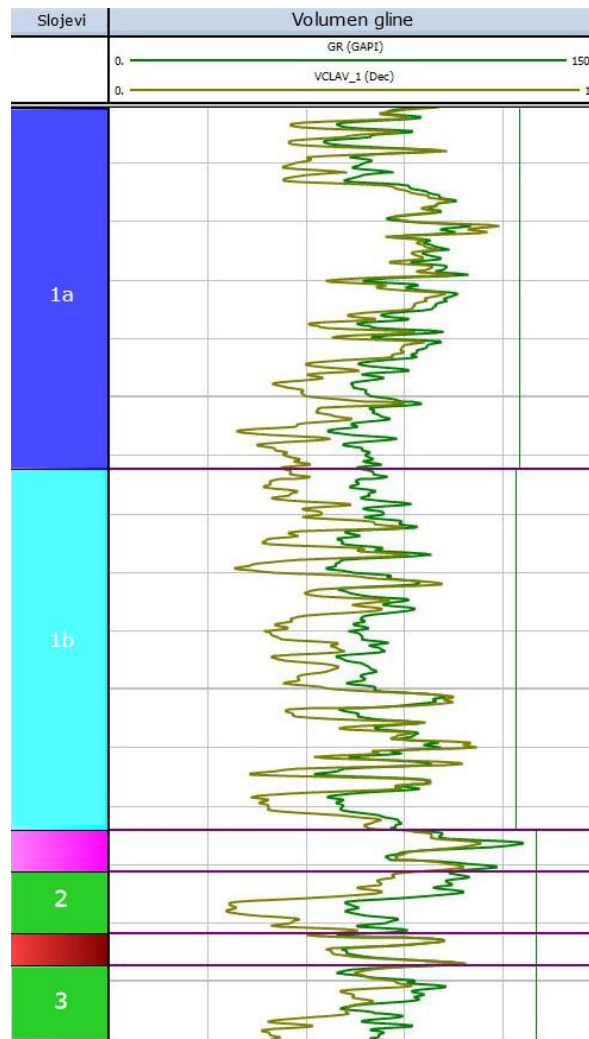
GR_{min} – radioaktivnost čistih naslaga s 0% gline,

GR_{max} – radioaktivnost gline.

Pri čemu bi vrijednost od $V_{Cl} = 100\%$ značilo da se radi o čistoj glini, a $V_{Cl} = 0\%$ da sloj ne sadrži glinu. Naravno, ovakav linearni model nije precizan te se u stvarnosti ne može očekivati u potpunosti linearna ovisnost između volumena gline i prirodne radioaktivnosti s obzirom na to da na mjerenje mogu utjecati i druge vrste minerala koji ne potječu iz gline. Iz tog razloga se u obzir uzimaju korelacije dobivene empirijski. Međutim, prilikom izrade rada korišten je linearni model koji ne uzima u obzir te korelacije.



Slika 4-3 Prikaz krivulje volumena gline (VCLAV) dobivenog iz krivulje prirodne gama karotaže (GR), za bušotinu A

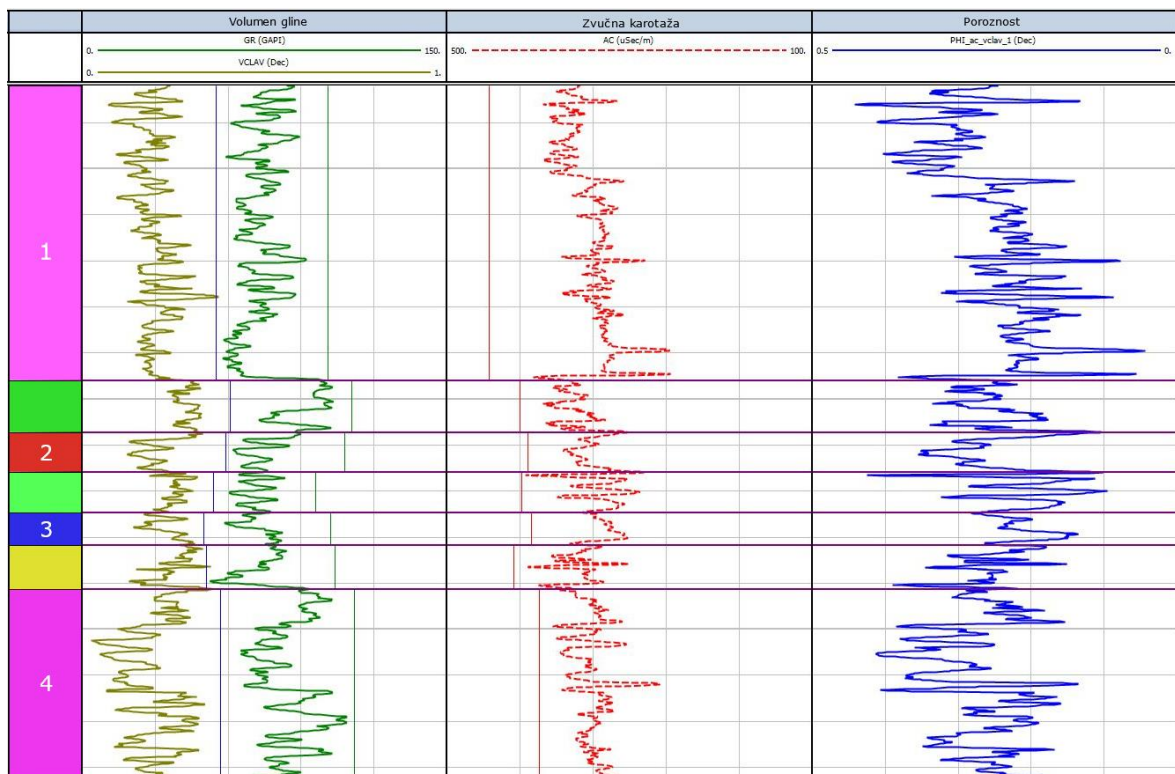


Slika 4-4 Prikaz krivulje volumena gline (VCLAV) dobivenog iz krivulje prirodne gama karotaže (GR) za bušotinu B

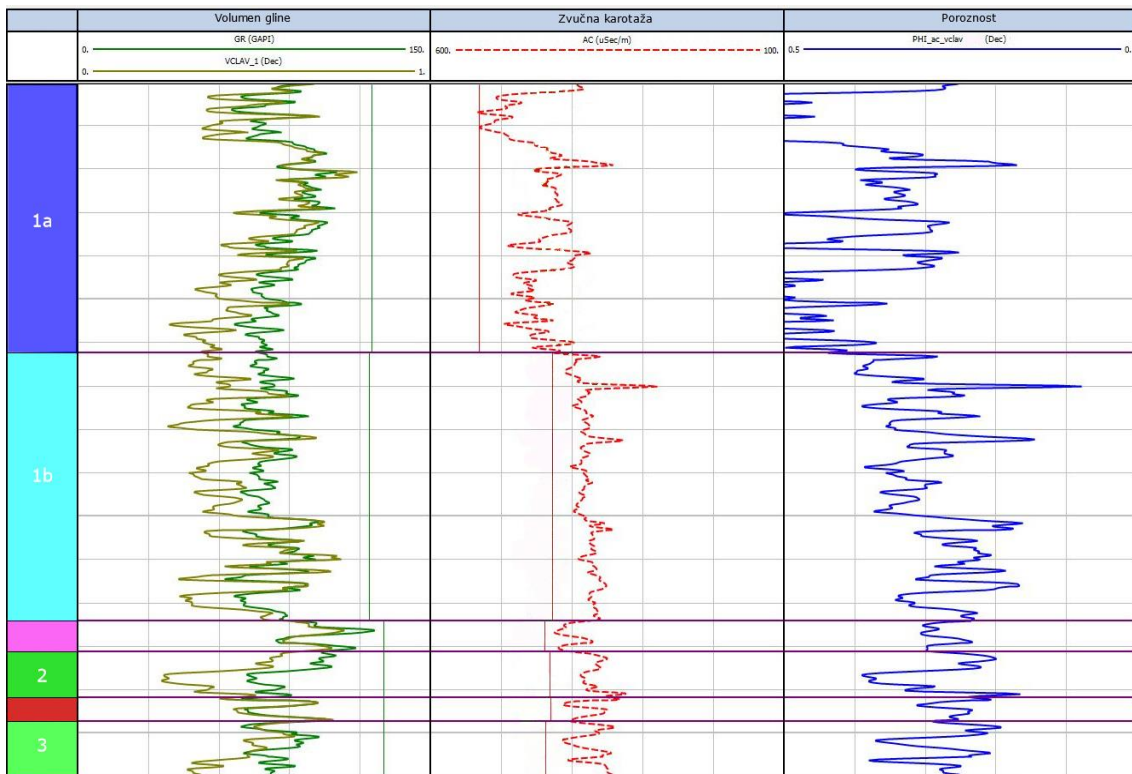
Prilikom izrade krivulje za volumen gline, softver IP generira krivulje koje predstavljaju minimalni udio gline, maksimalni udio gline i prosječan udio gline (VCLAV) koji je korišten za potrebe izrade ovog rada. Na Slici 4-3 sa obje strane krivulje gama karotaže vidljive su okomite linije koje predstavljaju maksimalne i minimalne vrijednosti gama karotaže, dok je na Slici 4-4 je prisutna samo linija maksimalne vrijednosti. Njihovim se podešavanjem omogućava točnija procjena volumena gline u pojedinoj zoni. Za bušotinu B je prvi propusni sloj u ovom slučaju ipak podijeljen na dva dijela kako bi se podešavanjem maksimalne vrijednosti mjerenja gama karotaže omogućila nešto točnija procjena volumena gline. Očekivano su u nepropusnim slojevima prosječne vrijednosti gline ipak nešto veće nego što su to u propusnim intervalima, s iznimkom da se i u sloju 1a javlja blagi porast u volumenu gline, što je svakako moguća indikacija prisutnosti gline, odnosno lapora, i u tom sloju.

4.4. Izračun poroznosti

Nakon izračunatog volumnog udjela gline, može se prijeći na postupak određivanja poroznosti. Prilikom određivanja poroznosti stijene mogu se koristiti karotaža gustoće, zvučna karotaža ili neutronska karotaža. Ono što valja uzeti u obzir kod ovakve analize je da postoji niz faktora koji mogu utjecati na točnost mjerenja pa tako i procjene poroznosti, a to mogu biti: vrsta fluida u porama, litološki sastav i prisutnost gline (lapora) u naslagama. Iz tog razloga se i koristi kombinacija nekoliko vrsta mjerenja, kako bi se povećala točnost procjene. Svojstva stijene koja je u neposrednoj blizini kanala bušotine određuje mjerenje. Najbliži zahvat od navedenih mjerenja ima upravo zvučna karotaža, dok radioaktivne metode imaju nešto dublji zahvat.



Slika 4-5 Redom prikazane krivulje su krivulja gama-karotaže, krivulja volumena gline, krivulja zvučne karotaže i krivulja izračunate poroznosti za bušotinu A



Slika 4-6 Redom prikazane krivulje s lijeva na desno su krivulja gama-karotaže, krivulja volumena gline, krivulja zvučne karotaže i krivulja poroznosti za bušotinu B

Formule koje opisuju određivanje poroznosti u *Interactive Petrophysics*-u putem karotaže gustoće i zvučne karotaže i izračunatog volumena gline, temelje se na formulama 3-3 i 3-4, a glase:

$$\varnothing = \frac{\rho_{ma} - \rho_b - (\rho_{ma} - \rho_{cl}) \cdot V_{cl}}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (4-2)$$

gdje je:

ρ_{cl} – gustoća mokre gline

V_{cl} – udio gline

i

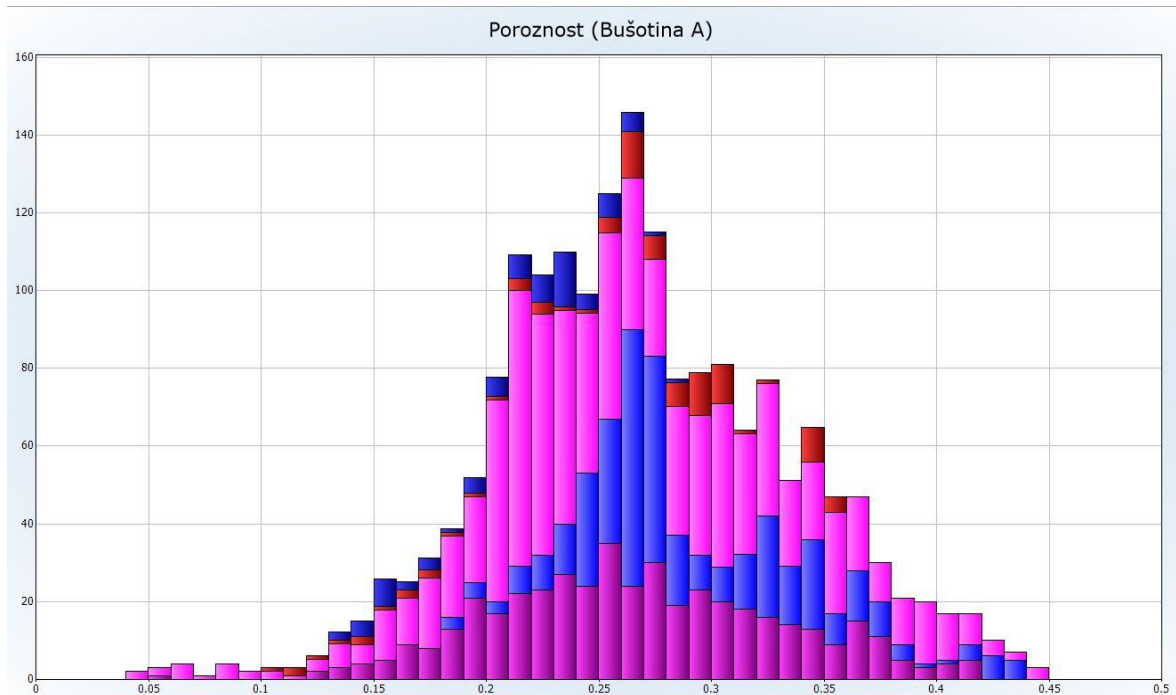
$$\varnothing = \frac{\Delta t - \Delta t_m - (\Delta t_{cl} - \Delta t_{ma}) \cdot V_{cl}}{(\Delta t_f - \Delta t_m) \cdot C_p} \quad (4-3)$$

gdje je:

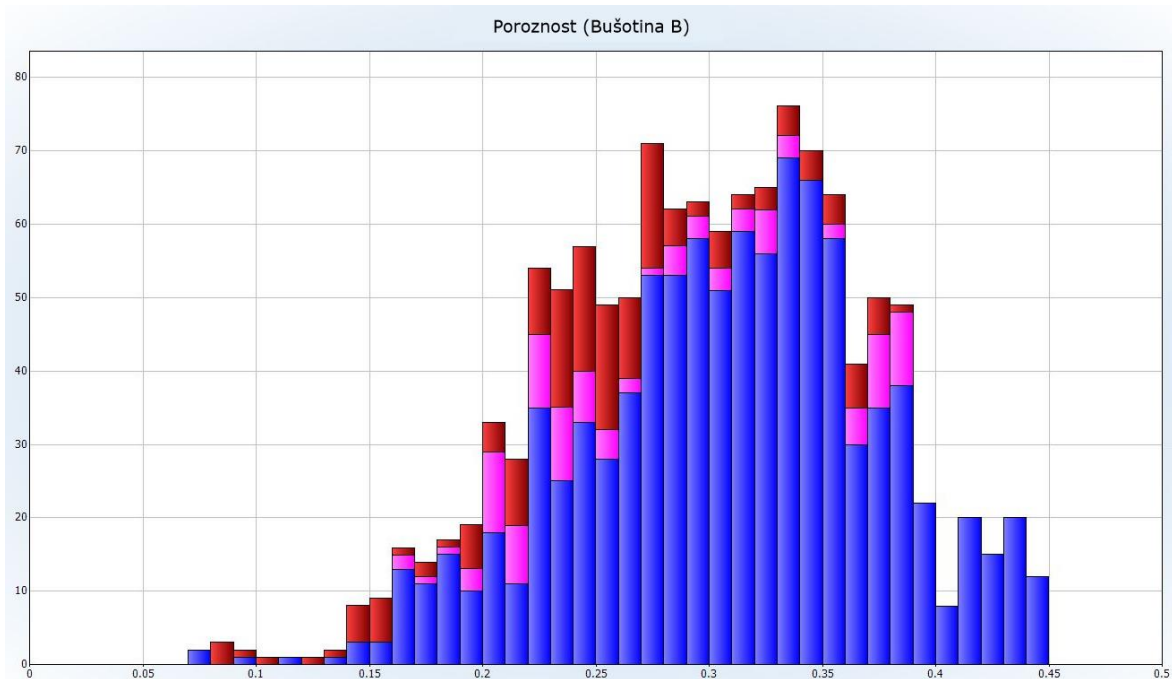
C_p – korekcijski faktor.

Pri tome korekcijski faktor, C_p , služi kako bi se korigirao utjecaj slabo kompaktnih pješčenjaka, odnosno slabo kompaktnih stijena, u kojima formula 3-6 daje puno veće vrijednosti nego što je to u čistim, kompaktnim stijenama.

Nakon što softver izračuna poroznosti korištenjem formula 4-2 i 4-3, a zbog jednostavnijeg očitavanja tih vrijednosti, u *Interactive Petrophysics*-u postoji i opcija prikaza dobivenih poroznosti u obliku histograma, što je vidljivo na slikama 4-7 i 4-8.



Slika 4-7 Histogram poroznosti za bušotinu A. Boje stupaca odgovaraju bojama propusnih slojeva 1-4 na Slici 4-5.



Slika 4-8 Histogram poroznosti za bušotinu B. Boje stupaca odgovaraju bojama propusnih slojeva 1-4 na Slici 4-6.

Podaci iz histograma o vrijednostima poroznosti za pojedini sloj navedeni su u Tablicama 4-2 i 4-3.

Tablica 4-2 Vrijednosti poroznosti iz histograma za bušotinu A.

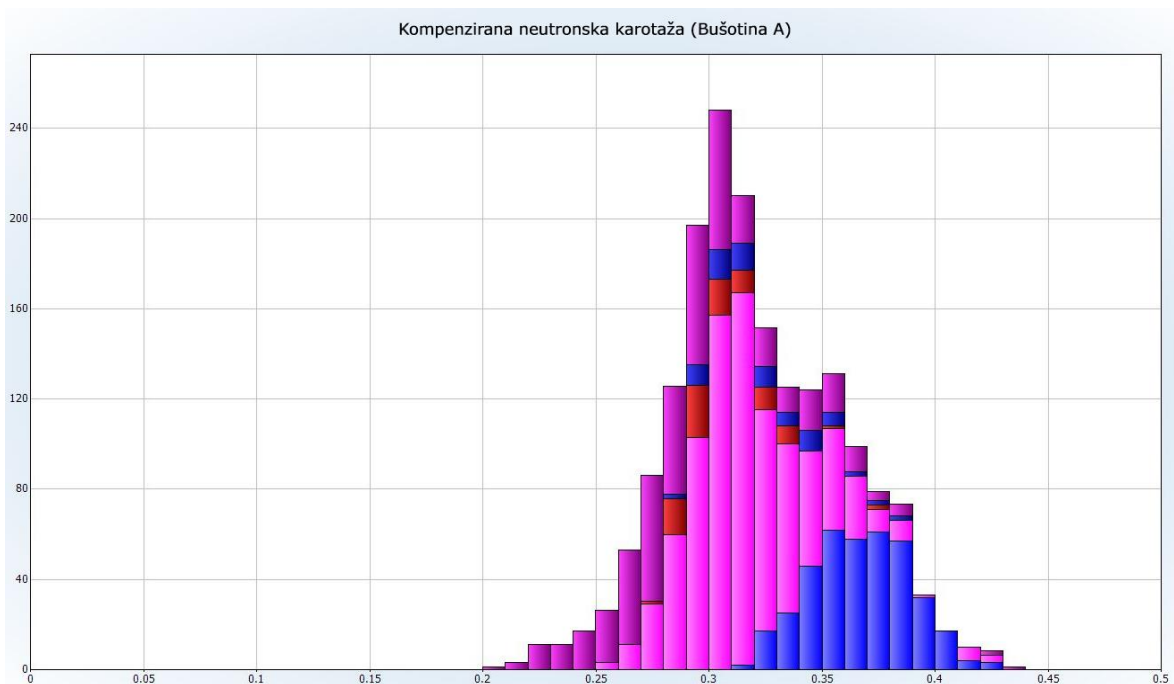
Propusni sloj	Minimalna vrijednost (%)	Maksimalna vrijednost (%)	Srednja vrijednost (%)
1.	5,6	44,7	26,4
2.	10,5	35,5	26,6
3.	13,5	28,3	21,3
4.	12,9	41,3	26,8

Tablica 4-3 Vrijednosti poroznosti iz histograma za bušotinu B.

Propusni sloj	Minimalna vrijednost (%)	Maksimalna vrijednost (%)	Srednja vrijednost (%)
1.	7,8	44,9	30,9
2.	16,5	39	27,9
3.	8,1	38	25,2

Ako se usporede vrijednosti srednjih poroznosti iz Tablica 4-2 i 4-3 sa očekivanim srednjim vrijednostima poroznosti iz Tablice 4-1, vidljivo je da postoje određena odstupanja. Na sva odstupanja mogu utjecati brojni faktori, kao na primjer već spomenuta činjenica da se prilikom kvalitativne analize pojedini sloj nije podijelio na svaki propusni proslojak, nego je razmatran kao serija slojeva. Također, još jedna bitna napomena je da se prilikom određivanja poroznosti u *Interactive Petrophysics-u* koristila jednostavna metoda određivanja poroznosti na temelju karotaže gustoće i zvučne karotaže koja ne uzima u obzir korekcije zbog prisutnosti ugljikovodika ili loših uvjeta u bušotini koje mogu utjecati na mjerenje. Ipak, čak i korištenjem takve metode se mogu dobiti zadovoljavajući rezultati, što je vidljivo ako se usporede podaci iz Tablice 4-1 sa Tablicama 4-2 i 4-3. Najveće odstupanje poroznosti od one očekivane je u sloju pod brojem 3, u bušotini A, gdje je srednja poroznost otprilike 21%, a očekivali bi 26%. Razlog tomu može biti to da je u sloju prisutan lapor ili promjena zasićenjem fluida, kao na primjer prisutnost ugljikovodika, a u prilog tomu idu vrijednosti karotaže gustoće i zvučne karotaže navedenih mjerenja za taj sloj na slikama 4-1 i 4-5 koje pokazuju da se vrijednost karotaže gustoće i zvučne karotaže smanjila. Vrijednost neutronske karotaže je u porastu, što je vidljivo na Slici 4-9, odnosno u Tablici 4-4 za taj sloj, a to u većini slučajeva odgovara činjenici da je u tom sloju prisutan lapor.

Drugo značajnije odstupanje je u istoj bušotini, u prvom sloju, gdje srednja vrijednost poroznosti iznosi oko 26%. U tom intervalu imamo više izmjena trendova rasta i smanjenja vrijednosti za pojedino mjerenje jer je interval dulji nego što je to u slučaju intervala pod brojem 3. U prvom dijelu sloja je intervalno vrijeme prolaska vala nešto veće nego u ostatku sloja, a i vrijednosti karotaže gustoće su također u porastu. Smanjenje brzine rasprostiranja vala može biti indikacija prisutnosti plina u sloju, ali s obzirom da je vrijednost karotaže gustoće u porastu kao i vrijednost neutronske karotaže (Slika 4-1 i Tablica 4-4) moguća je i prisutnost nafte i lapora.



Slika 4-9 Histogram vrijednosti kompenzirane neutronske karotaže za bušotinu A.

Tablica 4-4 Vrijednosti kompenzirane neutronske karotaže za pojedini sloj

Propusni sloj	Minimalna vrijednost (%)	Maksimalna vrijednost (%)	Srednja vrijednost (%)
1	25,6	42,4	31,8
2	27,8	37,8	30,8
3	28,9	38,9	32,5
4	20,7	43	29,4

U bušotini B manja su ukupna odstupanja od onih očekivanih, uzimajući u obzir i to da se analizirao jedan sloj manje nego u bušotini A. U prvom sloju poroznost je najveća te iznosi oko 31%. Najmanja vrijednost poroznosti je u sloju pod brojem 3, te iznosi oko 25%. U prvom sloju koji prilikom kvalitativne analize nije podijeljen na dva dijela, vidljivo je da se u prvoj polovici intervala vrijednosti zvučne karotaže razlikuju od karotaže gustoće, dok u drugoj polovici imaju približno jednak trend što može biti indicacija toga da je litologija u drugom dijelu intervala ujednačenija nego što je to u prvom dijelu. Također može značiti i

prisutnost plina s obzirom da je brzina rasprostiranja zvučnog vala u prvom dijelu manja, kao i gustoća. Prosječni volumen gline s druge strane može indicirati prisutnost veće količine lapora u prvoj polovici sloja u odnosu na drugi dio, baš kao i povećane vrijednosti gama karotaže. U drugom dijelu sloja je brzina rasprostiranja zvučnog vala veća pa je time i poroznost manja. S obzirom da je sloj podijeljen na dva dijela prilikom određivanja volumena gline, odstupanje od očekivane poroznosti je manje nego što bi bilo da je sloj ostavljen kao jedna cjelina.

5. ZAKLJUČAK

Na primjeru dviju bušotina koje su nabušile pješčenjačka ležišta u Savskoj depresiji, određena je poroznost pješčenjaka korištenjem osnovnih karotažnih mjerenja i relativno jednostavne metode proračuna u programu Interactive Petrophysics. Dobiveni su zadovoljavajući rezultati, odnosno rezultati koji ne odstupaju previše od onih očekivanih. Postoje brojni faktori koji mogu utjecati na interpretaciju podataka, od uvjeta koji vladaju u bušotini pa sve do uvjeta u samim stijenama kao što je udio gline te vrsta fluida u porama stijene. Usporedbom ovako izračunatih poroznosti i dostupnih laboratorijskih podataka može se zaključiti da je dobiveno vrlo dobro podudaranje srednjih vrijednosti poroznosti, a nešto manje vrijednosti od očekivanih su dobivene u intervalima 1 i 3, bušotine A. U prvom intervalu se radi o seriji pješčenjačkih slojeva, pa je niža poroznost dobivena vjerojatno pod utjecajem tankih proslojaka lapora. U trećem intervalu se niže vrijednosti mogu objasniti zasićenjem fluidima, a u prilog tomu idu smanjena vrijednost gustoće i povećanje intervalnog vremena u gornjoj polovici intervala. Svakako vrijedi naglasiti da bi se dobile još točnije procjene poroznosti uz više podataka koji su se mogli koristiti u softveru i brojnih korekcija za svaku vrstu tih podataka, ali svrha ovog rada nije ni bilo korištenje tako opsežnih i detaljnih mjerenja, već pokazati da se i jednostavnijim postupcima mogu dobiti realni podaci ukoliko se pravilno interpretiraju.

LITERATURA

1. ELLIS, D.V., SINGER J.M., 2008. Well Logging for Earth Scientists. 2nd Edition. Springer
2. JOHNSON, D.E., PILE, K.E. 1988. Well Logging for the Nontechnical Person. Westport, CT (USA): Quorum Books
3. LINARIĆ, P., PEČAR K., ŠKRLEC, M., CAZIN, V., MUDRIĆ, D., MARKULIN-GRGIĆ, N., ŠKRNJUG, M. 2000. Elaborat o rezervama ugljikovodika eksploatacijskog polja Stružec. Zagreb: INA – Industrija nafte
4. RIDER, M.H., 2002. The Geological Interpretation of Well Logs. 2nd Edition. Scotland, United Kingdom: Whittles Publishing

WEB IZVORI:

5. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2016.
URL:https://archive.epa.gov/esd/archivegeophysics/web/html/nuclear_logging.html#Neutron_Logging (29.8.2023.)
URL:https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/acoustic_logging.html (29.8.2023.)
6. WISCONSIN GEOLOGICAL AND NATURAL HISTORY SURVEY, 2023.
URL:<https://home.wgnhs.wisc.edu/water/wisconsin-aquifers/understanding-porosity-density/> (24.8.2023.)

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.

Petra Matešković

Petra Matešković



KLASA: 602-01/23-01/41
URBROJ: 251-70-12-23-2
U Zagrebu, 11.09.2023.

Petra Matešković, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/41, URBROJ: 251-70-12-23-1 od 03.04.2023. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

PROCJENA POROZNOSTI KORIŠTENJEM KAROTAŽE GUSTOĆE, NEUTRONSKE I ZVUČNE KAROTAŽE – PRIMJER PJEŠČENJAČKIH LEŽIŠTA U SAVSKOJ DEPRESIJI

Za mentoricu ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada izv. prof. dr. sc. Jasna Orešković nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentorica:

(potpis)

izv. prof. dr. sc. Jasna Orešković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)