Primjena zvučne karotaže u određivanju poroznosti stijena i snimanju stijenke kanala bušotine

Zahatek, Dario

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:169:757617

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO - GEOLOŠKO - NAFTNI FAKULTET

Preddiplomski studij naftnog rudarstva

Primjena zvučne karotaže u određivanju poroznosti stijena i snimanju stijenke kanala bušotine

Završni rad

Dario Zahatek

N 4321

Zagreb, 2020

Sveučilište u Zagrebu Završni rad

Rudarsko-geološko- naftni fakultet

Primjena zvučne karotaže u određivanju poroznosti stijena i snimanju stijenke kanala bušotine

Dario Zahatek

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

Sažetak

U završnom radu razmatra se primjena zvučne karotaže u određivanju poroznosti stijena i snimanju stijenke kanala bušotine. Osnovni princip mjerenja zvučnom karotažom je mjerenje vremena prolaska elastičnog vala između odašiljača i prijemnika na sondi. Najčešći parametri koji se mjere su amplituda i brzina odnosno intervalno vrijeme rasprostiranja vala između odašiljača i prijemnika pri kojem val prolazi kroz različite sredine (isplaka, zaštitne cijevi, cementi kamen, sloj) te se djelomično odbija (reflektira), a djelomično lomi (refraktira). Proces mjerenja počinje kada odašiljač emitira kratak akustični signal. Nakon toga, on se registrira na bližem, a zatim na daljem prijemniku. Na bližem prijemniku registrira se amplituda vala, a na daljem prijemniku cijeli valni oblik. Interpretacija podataka za zvučnu karotažu kojom se određuje poroznost stijena temelji se na mjerenju brzine ili intervalnog vremena refraktiranog vala od odašiljača do prijemnika dok mjerenjem amplitude i intervalnog vremena reflektiranog vala može dobiti slika visoke rezolucije stijena koje okružuju bušotinu.

Ključne riječi: zvučna karotaža, refleksija i refrakcija vala, poroznost stijena, snimanje stijenke kanala bušotine

Završni rad sadrži: 24 stranice, 1 tablicu, 17 slika i 14 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Završni rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: 1. Izv prof. dr. sc. Jasna Orešković, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Ocjenjivači: 1. Izv prof. dr. sc. Jasna Orešković, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu
2. Doc. dr.sc. Sonja Košćak Kolin, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu
3. Doc. dr. sc. Borivoje Pašić, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Datum obrane: 28. Rujna 2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagreb

SADRŽAJ:

1. UVOD.....1

2. RASPROSTIRANJE ELASTIČNIH VALOVA U BUŠOTINI.....2

2.1. Refleksija i refrakcija elastičnog vala 5

2.1.1. Kritični kut i glavni val.....6

2.2. Izvori i prijemnici elastičnih valova u bušotini.....8

3. ODREĐIVANJE INTERVALNOG VREMENA I BRZINE.....11

3.1. Interpretacija intervalnog vremena.....13

4. ODREĐIVANJE POROZNOTI ZVUČNOM KAROTAŽOM.....14

4.1. Wyllieva jednadžba.....15

4.2. Korekcije Wyllieve jednadžbe.....18

4.3. Interpretacija poroznosti stijene 19

5. SNIMANJE STIJENKE KANALA BUŠOTINE ZVUČNOM KAROTAŽOM.....20

5.1. Zvučni skener.....20

5.2. Interpretacija snimljene slike 22

6. ZAKLJUČAK.....23

7. LITERATURA.....24

POPIS SLIKA:

Slika 2-1. Širenje longitudinalnog vala ….....2

Slika 2-2. Širenje transverzalnog vala.....3

Slika 2-3. Ovisnost brzine P-vala o poroznosti.....4

Slika 2-4. Reflektirani i refraktirani val u bušotini.....6

Slika 2-5. Rasprostiranje glavnog vala u bušotini.....7

Slika 2-6. Dipolni izvor elastičnih valova ….....9

Slika 2-7. Registrirani zapis zvučnih signala na prijemniku ….....10

Slika 3-1. Sonda za zvučnu karotažu s jednim odašiljačem i dva prijemnika.....11

Slika 3-2. Sonda za kompenziranu zvučnu karotažu ….....12

Slika 3-3. Sonda za zvučnu karotažu s velikim razmakom ….....12

Slika 3-4. Dijagram zvučne karotaže prikazan zajedno s dijagramom kalipera.....13

Slika 4-1. Put vala kroz poroznu stijenu zasićenu fluidom.….....14

Slika 4-2. Rasprostiranje P- vala kroz čisti pješčenjak….....15

Slika 4-3. Interpretacija izmjerene poroznosti.....19

Slika 5-1. Zvučni skener….....20

Slika 5-2.Spiralna slika formacije kao rezultat reflektiranog signala ….....21

Slika 5-3. Slika izrađena praćenjem amplitude reflektiranog vala 22

POPIS TABLICA:

Tablica 4-1. Intervalna vremena i brzine za neke monomineralne stijene.....17

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I PRIPADAJUĆIH SI JEDINICA:

Vp – brzina rasprostiranja P- vala (m/s)

Vs – brzina rasprostiranja S-vala (m/s)

μ - modul smicanja (N/m^2)

K – volumni modul elastičnosti (N/m^2)

ρ – gustoća sredstva (kg/m^3)

V_1 - brzina rasprostiranja zvučnih valova kroz isplaku u bušotini (m/s)

V_2 – brzina rasprostiranja zvučnih valova kroz formaciju (m/s)

f – frekvencija (Hz)

λ- valna duljina (m)

D – dubinski (radijalni) zahvat sonde (m)

Vma – brzina rasprostiranja longitudinalnih valova kroz čvrsti dio stijene (m/s)

Vf – brzina raprostiranja longitudinalnih valova kroz fluid u pornom prostoru (m/s)

Φ - poroznost

Cp – korekcijski faktor

Δtsh – vrijeme prolaska vala kroz susjedne slojeve šejla (μs/m)

Δt- intervalno vrijeme (μs/m)

Δt_{ma} – vrijeme prolaska vala kroz čvrsti dio stijene (μs/m)

Δtf – vrijeme prolaska vala kroz fluid u pornom prostoru (μs/m)

L – duljina prijeđenog puta longitudinalnog vala kroz stijenu (m)

θ_1 - upadni kut valne zrake (°)

θ_2- kut loma valne zrake (°)

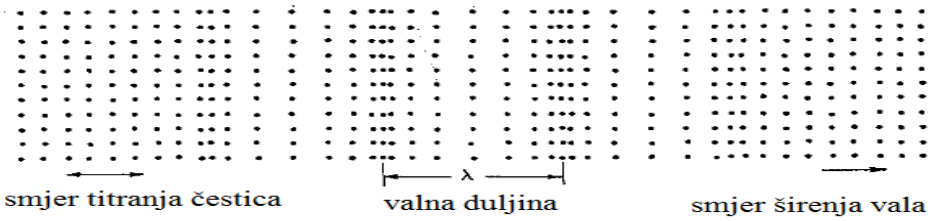
1. UVOD

Sa različitim potrebama u istraživanju i utvrđivanju ugljikovodika, razvijale su se i različite metode mjerenja u bušotini koje omogućavaju dobivanje različitih petrofizikalnih parametara probušenih stijena. Uz električna i radioaktivna karotažna mjerenja, zvučna karotaža predstavlja važnu kategoriju geofizičkih mjerenja u bušotini. Zvučnom karotažom mjeri se vrijeme prolaska elastičnog vala kroz stijenu. Iako se u početku zvučna karotaža uglavnom koristila u seizmičkim istraživanjima, napreci u elektronici i dizajnu bušotinskog alata omogućili su i njenu vrlo široku primjenu i u naftnim bušotinama. Mjerenje zvučnom karotažom temelji se na tri principa: mjerenju brzine elastičnih valova, mjerenju prigušenja odnosno smanjenja amplitude elastičnih valova i mjerenju refleksije elastičnih valova. U skladu s ta tri principa definirani su i zahvati koji se upotrebom zvučne karotaže mogu obaviti. Mjerenje se može izvoditi i u zacijevljenim i u nezacijevljenim bušotinama. Najčešće se koristi za procjenu kvalitete cementacije, korelaciju s površinskim seizmičkim podacima, izračunavanje akustičnih impedancija, identificiranje zona povišenog tlaka, određivanje nagiba slojeva i dr. Također se često primjenjuje za proračun poroznosti stijene i snimanje stijenke kanala bušotine kako je prikazano u ovom radu.

Upravo se mjerenje potrebnog vremena tzv. intervalnog vremena koje je potrebno refraktiranom P-valu od odašiljača do prijemnika koristi za određivanje poroznosti stijena, dok mjerenje intervalnog vremena ili brzine reflektriranog vala od odašiljača do prijemnika omogućuje snimanje stijenke kanala bušotine kako će bit opisano u nastavku ovog rada.

2. RASPROSTIRANJE ELASTIČNIH VALOVA U BUŠOTINI

Osnovni princip mjerenja zvučnom karotažom je mjerenje vremena prolaska elastičnog vala između odašiljača i prijemnika na sondi. Rasprostiranje elastičnih valova od odašiljača do prijemnika omogućavaju elastična svojstva medija kroz koje se valovi šire. Postoje dvije vrste elastičnih valova koji se različitim brzinama i amplitudama šire, najprije kroz isplaku u bušotini, a zatim kroz formaciju. Longitudinalni ili P-valovi se rasprostiru većom brzinom od ostalih vrsta valova, a čestice sredstva kroz koje se val širi osciliraju u smjeru prostiranja vala (slika 2-1).



Slika 2-1. Širenje longitudinalnog vala (Bassiouni, 1994)

Brzina P- vala ovisi o modulu elastičnosti i gustoći sredstva kroz koje se rasprostiru, pa slijedi:

$$Vp = \sqrt{\frac{K+\frac{4}{3}\mu}{\rho}} \tag{2-1}$$

gdje su:

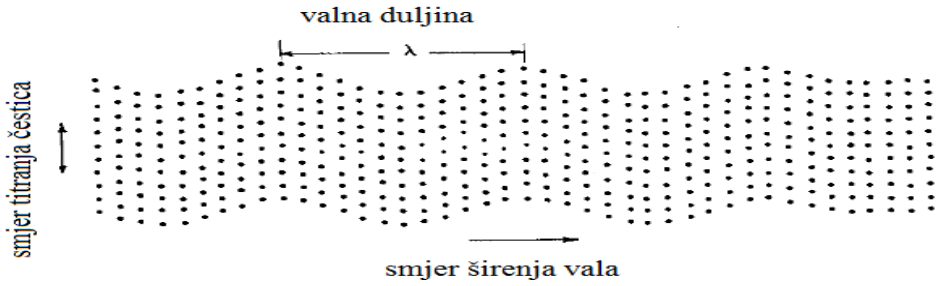
Vp – brzina rasprostiranja P- vala (m/s),

K – volumni modul elastičnosti (N/m^2),

μ - modul smicanja (N/m^2),

ρ – gustoća sredstva (kg/m^3).

Transverzalni ili S-valovi su sekundarni valovi jer se rasprostiru sporije od P-valova, a čestice sredstva kroz koje se val širi osciliraju okomito na pravac rasprostiranja vala (slika 2-2).



Slika 2-2. Širenje transverzalnog vala (Bassiouni,1994)

Brzina S-vala ovisi o modulu smicanja i gustoći sredstva kroz koje rasprostiru, pa slijedi:

$$Vs = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{2-2}$$

gdje su:

Vs – brzina S-vala (m/s),

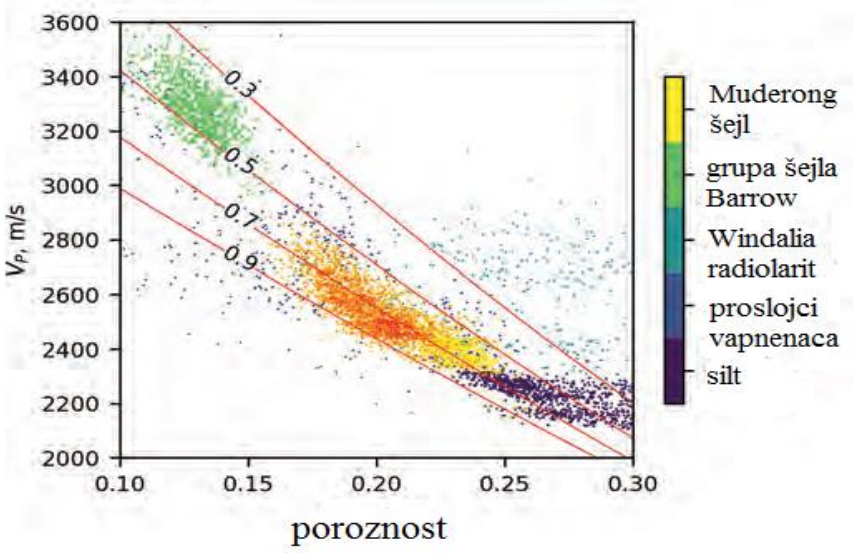
μ – modul smicanja (N/m^2),

ρ – gustoća sredstva (kg/m^3).

Modul smicanja tekućina i plinova jednak je nuli te se transverzalni valovi njima ne šire.

Volumni modul *K* je uvijek pozitivan pa je brzina P-valova veća od brzine S-valova.

Također, brzina rasprostiranja vala kroz stijenu ovisi i o njenom mineralnom sastavu i poroznosti. Pri tome se s povećanjem poroznosti brzina smanjuje (slika 2-3).



Slika 2-3. Ovisnost brzine P-vala o poroznosti (https://doi.org/10.1190/tle38050385, 2020)

Određivanje brzine širenja elastičnih valova u sloju, vrlo je značajno za postupak interpretacije seizmičkih podataka, procjenu litološkog sastava sloja, modula elastičnosti stijene te mnogih drugih petrofizikalnih svojstava.

Ipak, mjerenje brzine elastičnih valova od odašiljača do prijemnika primarno se koristi za procjenu poroznosti nabušenih stijena kako će bit opisano u nastavku ovog rada.

2.1. Refleksija i refrakcija elastičnog vala

Elastični val se, iz odašiljača na sondi u bušotini, najprije rasprostire malom brzinom kroz isplaku u bušotini, a zatim kroz stijenu većom brzinom zbog veće gustoće. Pri rasprostiranju elastični val prolazi nekoliko promjena, a koje nastaju uslijed refrakcije i refleksije. Upadni val koji dolazi do granice dvaju slojeva s različitom brzinom i gustoćom, djelomično se odbija (reflektira), a djelomično se lomi (refraktira). Pri tome, za upadne valne zrake vrijedi Snellov zakon:

$$\frac{\sin\theta 1}{V1} = \frac{\sin\theta 2}{V2} \tag{2-3}$$

gdje su:

V_1 - brzina rasprostiranja zvučnih valova kroz isplaku u bušotini (m/s),

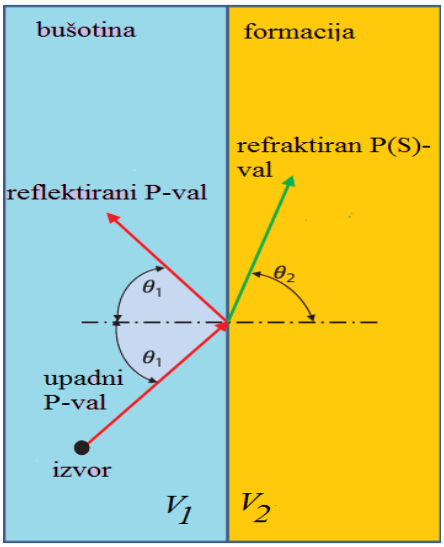
V_2 – brzina rasprostiranja zvučnih valova kroz stijenu (m/s),

θ_1 - upadni kut valne zrake,

θ_2- kut loma valne zrake.

Prema Snellovom zakonu valna zraka, u trenutku nailaska na površinu različite gustoće (stijena i isplaka), reflektira se natrag u bušotinu (isplaku) pod kutom koji je jednak upadnom kutu θ_1. Za val koji se širi kroz drugi sloj pod kutom θ_2, refraktirani val, vrijedi da se lomi u stijenu pod kutom koji ovisi o vrijednostima brzine dvaju slojeva. Tako se lomi od okomice kada je brzina u drugom sloju veća od brzine u prvom sloju ($V_2 > V_1$), odnosno k okomici kada je brzina u drugom sloju manja od one u prvom (slika 2-4).

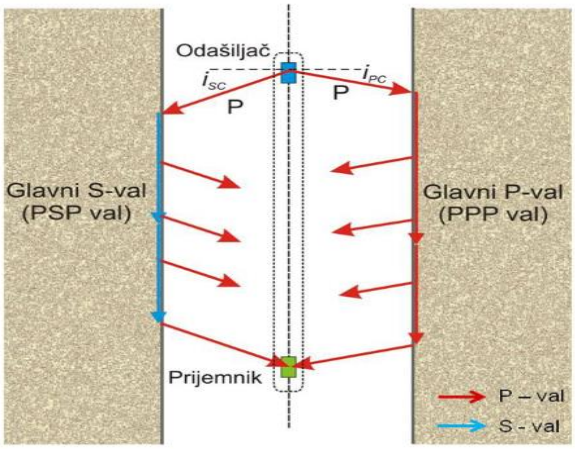
Budući da je u bušotini brzina prostiranja vala kroz isplaku uvijek manja od brzine kroz stijenu, valna zraka će se lomiti od okomice tj. kut loma θ_2 je veći od upadnog kuta θ_1.



Slika 2-4. Reflektirani i refraktirani val u bušotini (Louwerens, 2014)

2.1.1. Kritični kut i glavni val

Kada se upadna valna zraka vala lomi pod pravim kutom (θ_2 = 90°), sinus upadnog kuta jednak je omjeru brzina vala u isplaci (V_1) i stijeni (V_2) budući da je sinus kuta 90° jednak jedan. Takav upadni kut naziva se kritični kut, a nastali refraktirani val naziva se glavni val (eng. head wave). Glavni val se neće rasprostirati dalje u stijenu već će putovat međugraničnom površinom isplake i stijene, ali pritom će se širit brzinom V_2, tj. brzinom kroz stijenu (Louwerens, 2014). Postoje dvije vrijednosti kritičnog kuta za koje nastaju dva tipa glavnog vala: glavni P-val i glavni S-val. Budući da je brzina kretanja P-vala veća od brzine kretanja S-vala, iz Snellovog zakona proizlazi da je vrijednost kritičnog kuta za koji će nastati glavni S-val (i_{sc}) veća od vrijednosti kritičnog kuta za koji će nastati glavni P-val (i_{pc}), slika 2-5.



Slika 2-5. Rasprostiranje glavnog vala u bušotini (Bassiouni,1994)

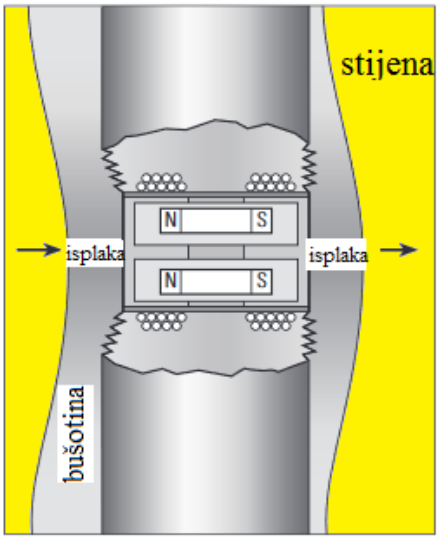
Glavni val se veći dio puta rasprostire kroz stijenu većom brzinom i zbog toga će nakon određene udaljenosti stići do prijemnika prije direktnog vala koji se prostire kroz isplaku manjom brzinom.

Pri tome, međusobna udaljenost između odašiljača i prijemnika zvučnog vala ne smije biti premala kako bi se refraktirani glavni val registrirao na prijemniku prije direktnog vala. Takva udaljenost naziva se kritična udaljenost (Bassiouni,1994).

Upravo se mjerenje potrebnog vremena tzv. intervalnog vremena koje je potrebno refraktiranom P- valu od odašiljača do prijemnika koristi za određivanje poroznosti stijena dok mjerenje intervalnog vremena ili brzine reflektriranog vala od odašiljača do prijemnika omogućuje snimanje stijenke kanala bušotine kako će bit opisano u nastavku ovog rada.

2.2. Izvori i prijemnici zvučnih valova u bušotini

Za mjerenje brzine longitudinalnih elastičnih valova u isplaci i stijeni koriste se sonde za zvučnu karotažu koje se smještaju centralno u bušotinu u kojoj se nalazi isplaka. Upotrebljavaju se i sonde koje mogu mjeriti cijeli valni paket, pa se osim P-valova koriste i transverzalni (S) valovi (Ellis i Singer, 2008). Glavni dijelovi sonde za zvučnu karotažu su odašiljač zvučnih valova i prijemnici. Odašiljač je uređaj koji generira longitudinalne valove u bušotini (budući da se transvezalni valovi ne šire kroz isplaku jer tekućine nisu podložne smičnom naprezanju), a prijemnik je uređaj koji registrira zvučne valove. I odašiljač i prijemnik elastičnih valova, pri generiranju odnosno registriranju zvučnih valova, mogu koristiti dvije vrste materijala: jedna vrsta su materijali koji pokazuju piezoelektrični efekt, a druga vrsta su magnetski materijali kod kojih dolazi do periodičnih promjena u njihovoj duljini u trenutku kad su takvi materijali izloženi oscilirajućem magnetskom polju (Bassiouni, 1994). Kao posljedica periodičnih promjena u duljini takvih materijala, emitiraju se zvučni valovi visokih frekvencija. Piezoelektrični materijali, poput kristala kvarca ili barijevog titanita, s jedne strane svoje površine imaju pozitivne naboje, a s druge strane površine negativno izražene naboje. Prilikom promjene tlaka dolazi do odvajanja pozitivnih i negativnih naboja tj. dolazi do polarizacije i induciranja električnog napona, a vrijedi i obrnuto (Bassiouni, 1994).

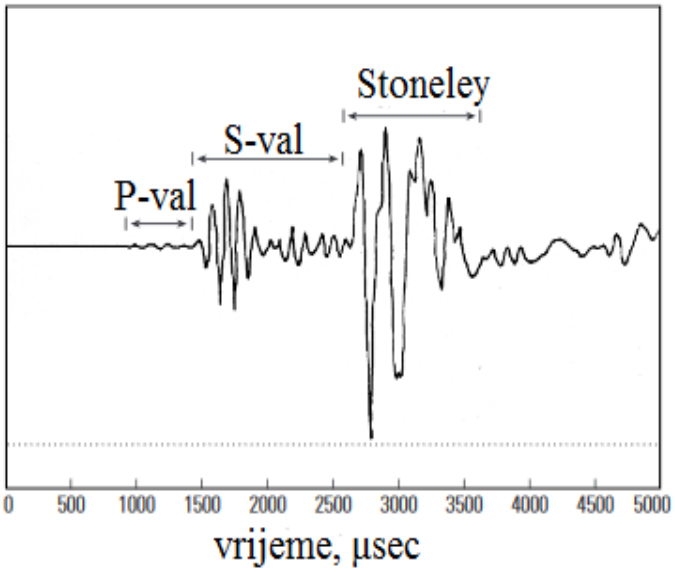


Slika 2-6. Dipolni izvor elastičnih valova (Ellis i Singer, 2008)

Odašiljač pretvara električni napon koji je nastao deformiranjem piezoelementa (i na taj način preraspodjele naboja na njegovoj površini) u ultrazvučnu vibraciju. Pritom su frekvencije ultrazvučnog vala od 15 do 30 kHz. Obzirom na stranu u koju odašilju zvučni val , razlikuju se monopolni, dipolni (slika 2-6) i višepolni izvori odašiljača (Ellis i Singer, 2008).

Piezoelektrični prijemnik pretvara promjenu tlaka uslijed nailaska ultrazvučnog vala, emitiranog iz odašiljača, u električni napon. U slučaju da je prijemnik izveden na magnetskom principu, uslijed nailaska ultrazvučnog vala doći će do promjene u volumenu materijala što će izazvat pojavu magnetskog polja odnosno napona koji će se kabelom prenijeti do površine i registrirati u obliku signala. Zapis takvih signala na prijemniku prikazan je na slici 2-7. Registrirani valovi imaju različita intervalna vremena jer se rasprostiru različitim putanjama i brzinama u elastičnom mediju. Prvi val koji će biti registriran je P - val koji se rasprostire najvećom brzinom i ima malu amplitudu. Nakon P - vala, prijemnik će zabilježiti dolazak S - vala koji se šire sporije od P - vala i ima veću

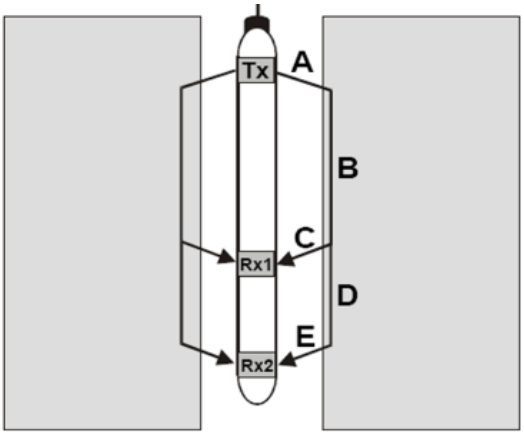
amplitudu. Na kraju, prijemnik će registrirati Stoneleyeve valove i direktni val koji se širi kroz isplaku, a koji se najsporije rasprostiru (Glover, 2012).



Slika 2-7. Registrirani zapis zvučnih valova na prijemniku (Ellis i Singer, 2008)

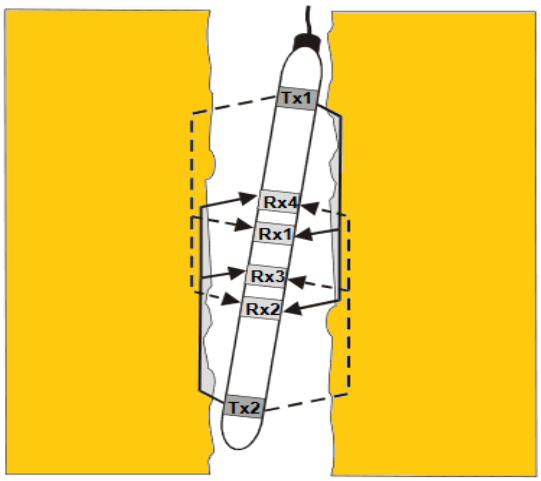
3. ODREĐIVANJE INTERVALNOG VREMENA I BRZINE

Osnovni princip mjerenja zvučnom karotažom je mjerenje vremena prolaska P - vala između odašiljača i prijemnika na sondi, tzv. intervalno vrijeme. Mjerenje intervalnog vremena započinje u trenutku kad odašiljač generira ultrazvučni val, a zaustavlja se kad ultrazvučni val dođe do prvog prijemnika. Pri tome, prag osjetljivosti prijemnika ne smije biti premali kako se ne bi registrirali neki drugi signali poput buke. Kako bismo intervalno vrijeme što preciznije odredili pri različitim uvjetima u bušotini, kroz povijest su se razvijale različite izvedbe sondi. Osnovna sonda za zvučnu karotažu sastoji se od odašiljača zvučnih valova i dva prijemnika. Mjeri se intervalno vrijeme tj. vrijeme putovanja vala duž udaljenosti D između dvaju prijemnika. Intervalno vrijeme (Δt) je razlika vremena putovanja vala do daljeg prijemnika (A+B+D+E) i vremena putovanja vala do bližeg prijemnika (A+B+C) (Glover, 2012).



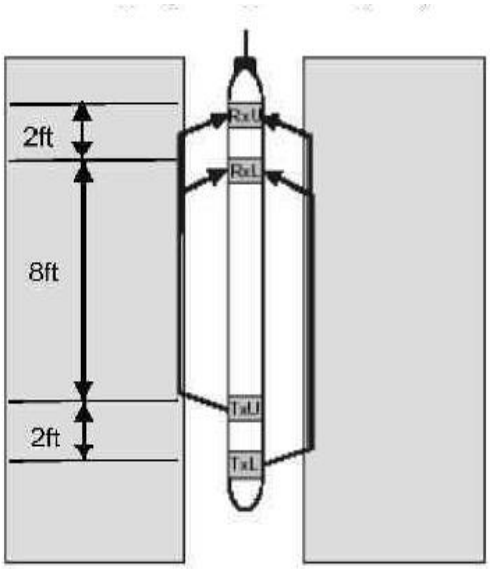
Slika 3-1. Sonda za zvučnu karotažu s jednim odašiljačem i dva prijemnika (Glover, 2012)

Nedostatak ove sonde pojavljuje se kad sonda nije u osi bušotine ili kad se promjer bušotine mijenja. Tada putevi C i E nisu jednaki i razlika vremena putovanja vala do daljeg i bližeg prijemnika više ne odgovara vremenu duž puta D. Stoga je uvedena sonda za kompenziranu zvučnu karotažu.



Slika 3-2. Sonda za kompenziranu zvučnu karotažu (Glover, 2012).

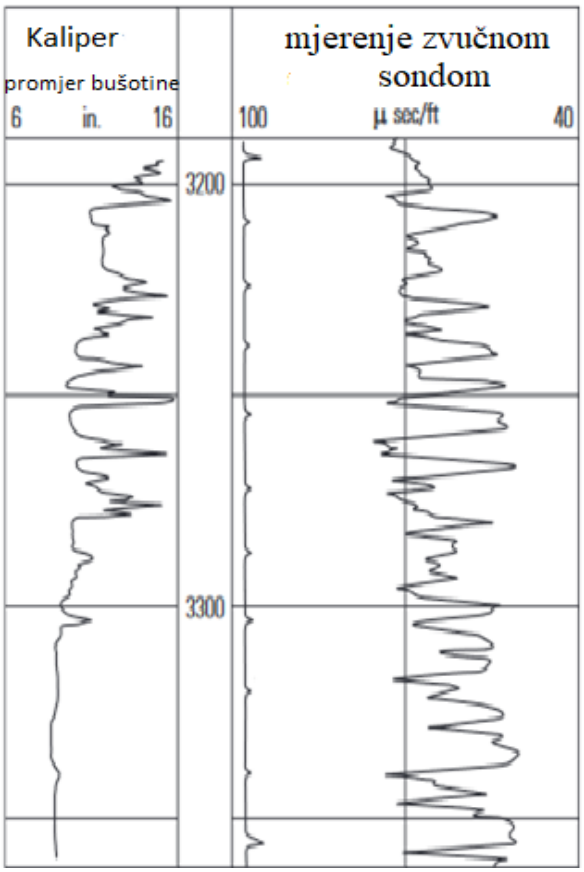
U nekim uvjetima se pokazalo da je potreban veći razmak odašiljača i prijemnika, kako bi se povećao radijus mjerenja. Tada se koristi sonda s velikim razmakom koja se sastoji od dva odašiljača smještena na jednoj strani sonde i dva prijemnika na drugom kraju sonde.



Slika 3-3. Sonda za zvučnu karotažu s velikim razmakom (Glover, 2012)

3.2. Interpretacija intervalnog vremena

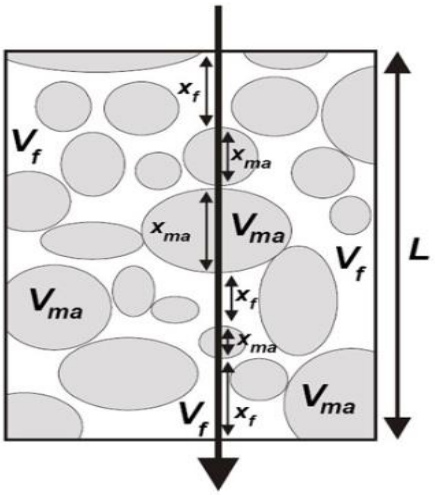
Dijagram zvučne karotaže prikazuje intervalno vrijeme prolaska vala (*Δt)*. To je inverzna vrijednost brzine *(v*), a naziva se sporost (engl. Slowness). Izražena je u mjernim jedinicama mikrosekunda po metru (μs/m). Za većinu stijena utvrđeno je da su vrijednosti intervalnih vremena između 12,2 μs/m (40 μs/ft) i 30,5 μs/m (100 μs/ft) te su stoga te vrijednosti prikazane na skali kao referentne.Često se različita mjerenja zvučnom karotažom međusobno koreliraju te se prikazuju zajedno. Na slici 3-4 prikazan je dijagram zvučne karotaže s dijagramom kalipera koji prikazuje vrijednost promjera bušotine na svakoj dubini. Porastom promjera bušotine raste i intervalno vrijeme vala između odašiljača i prijemnika, a time i poroznost.



Slika 3-4. Dijagram zvučne karotaže prikazan zajedno s dijagramom kalipera (Ellis i Singer, 2008)

4. ODREĐIVANJE POROZNOSTI ZVUČNOM KAROTAŽOM

Mjerenjem intervalnog vremena ili brzine P- vala može se odrediti poroznost stijene čiju je vrijednost prijeko potrebno poznavati u istraživanju ležišta i aktivnostima proizvodnje nafte i plina. U kvantitativnoj interpretaciji mjerenja u bušotini, vrijednosti poroznosti procjenjuju se najčešće pomoću tri različite metode: karotažom gustoće, neutronskom karotažom te zvučnom karotažom. Budući da se kod primjene karotaže gustoće i neutronske karotaže koriste radioaktivni izvori, primjena zvučne karotaže pokazala se ekološki najprihvatljivijom metodom. Izmjereno intervalno vrijeme duž nekog puta *L* kroz stijenu ovisi o brzini rasprostiranja vala kroz čvrsti dio stijene (*Vma*) i brzini kroz fluid koji ispunjava pore (*Vf*) (Glover, 2012).

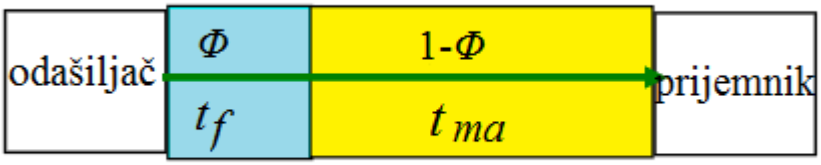


Slika 4-1. Put vala kroz poroznu stijenu zasićenu fluidom (Glover, 2012)

Njihov odnos opisuju brojne jednadžbe od kojih je najpoznatija Wyllieva formula (Wyllie et al., 1956).

4.1. Wyllieva jednadžba

Wyllieva formula prikazuje ovisnost brzine ili intervalnog vremena P- vala, kada se on rasprostire od odašiljača do prijemnika, o poroznosti stijene. Wyllie je istraživanje provodio na čistim pješčenjacima (kvarc) kao dvokomponentnim sustavima građenim od 100 % čvrstog (mineralnog) dijela stijene i pornog prostora koji je 100% ispunjen fluidom (vodom).



Slika 4-2. Rasprostiranje P- vala kroz čisti pješčenjak (Tenchov,2016)

Zaključio je da ukupno intervalno vrijeme jednako zbroju intervalnog vremena P- vala kad se on rasprostire kroz čvrsti dio stijene i intervalnog vremena P- vala kad se rasprostire kroz fluid u pornom prostoru (slika 4-2):

$$\Delta t = \Phi \Delta tf + (1 - \Phi)\Delta tma \qquad (4\text{-}1)$$

gdje je:

Δt - intervalno vrijeme (μs/m),

Δt_f - vrijeme prolaska vala kroz fluid u pornom prostoru (μs/m),

Δt_{ma} - vrijeme prolaska vala kroz čvrsti dio stijene (matriks) (μs/m),

Φ - poroznost.

Sređivanjem gornje jednadžbe za intervalno vrijeme (4-1) može se dobit jednadžba za izračunavanje poroznosti:

$$\Phi = \frac{\Delta t - \Delta tma}{\Delta tf - \Delta tma} \tag{4-2}$$

Pored mjerenog intervalnog vremena (Δt) očitanog iz dijagrama, potrebno je poznavati intervalna vremena kroz fluid i čvrsti dio stijene (Δt_f i Δt_{ma}). Sonde za zvučnu karotažu imaju relativno mali promjer mjerenja i on ovisi o valnoj duljini (λ), a valna duljina ovisi o brzini rasprostiranja valova (v) i frekvenciji odašiljača (f) te je dana izrazom:

.

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{4-3}$$

gdje su:

v - brzina rasprostriranja valova (m/s)

λ - valna duljina (m)

f - frekvencija odašiljača (Hz)

Uzima se da je radijalni dubinski zahvat (D) približno jednak tri valne duljine ($D \sim 3\ \lambda$) (Glover,2012). Budući da je radijus prodiranja zvučne karotaže mali, mjerenja se odnose na ispranu zonu. Dakle, fluid u porama je filtrat isplake i Δt_f je intervalno vrijeme za filtrat isplake.

Intervalno vrijeme ili brzina kroz čvrsti dio stijene (Δt_{ma}) određuju se laboratorijskim mjerenjima na jezgrama ili se uzimaju vrijednosti iz literature.

Tablica 4-1. Intervalna vremena i brzine za neke monomineralne stijene (Glover,2012)

Vrsta stijene	**Δt_{ma} (µs/ft)**	***V* (ft/s)**	***V* (m/s)**
Pješčenjak	55,6 – 51,3	18 000 – 19 500	5 490 – 5 950
Vapnenac	47,6 – 43,5	21 000 – 23 000	6 400 – 7 010
Dolomit	43,5 – 38,5	23 000 – 26 000	7 010 – 7 920
Anhidrit	50	20 000	6 096
Halit	66,7	15 000	4 572
Šejl	170 - 60	5 880 – 16 660	1 790 – 5 805

Pojedine zvučne sonde podrazumijevaju različit razmak između odašiljača i prijemnika pa je u nekim situacijama prikladnije poroznost prikazat kao funckiju brzine rasprostiranja P-valova. Budući da je brzina (sporost) P- valova recipročna vrijednost intervalnog vremena, slijedi:

$$\frac{1}{V} = \frac{\Phi}{Vf} + \frac{(1-\Phi)}{Vma} \tag{4-3}$$

gdje je:

V - brzina longitudinalnog vala (m/s),

Vf - brzina vala kroz filtrat isplake (m/s),

Vma - brzina vala kroz čvrsti dio stijene (m/s).

4.2. Korekcije Wyllieve jednadžbe

Wyllieva jednadžba daje dobre rezultate poroznosti u čistim i kompaktnim stijenama. Stijene u prirodi najčešće nisu monomineralne, nego se sastoje od više različitih minerala. U slabo kompaktnim pješčenjacima je vrijeme prolaska vala (Δt) najčešće veće i ovisno je o udjelu gline. Općenito, *Δt* u glini je veće od *Δtma* u pješčenjacima (tablica 4-1). Zbog toga u slabo kompaktnim stijenama formula daje veće vrijednosti pa je potrebno uvesti dodatnu korekciju tj. korekcijski faktor (*Cp*):

$$Cp = \frac{\Delta tsh}{100} \tag{4-4}$$

gdje je:

Cp – korekcijski faktor,

Δtsh – vrijeme prolaska vala kroz susjedne slojeve šejla (μs/m),

100 – karakteristično vrijeme prolaska vala za kompaktni šejl (μs/m).

Tada je:

$$\Phi = \left(\frac{\Delta t - \Delta tma}{\Delta tf - \Delta tma}\right) \times \frac{1}{Cp} \tag{4-5}$$

Za procjenu poroznosti se koriste i jednadžbe izvedene na temelju empirijskih podataka, kao što je Raymer-Huntova jednadžba:

$$\frac{1}{\Delta t} = \frac{\Phi}{\Delta tf} + \frac{(1-\Phi)}{\Delta tma} \tag{4-6}$$

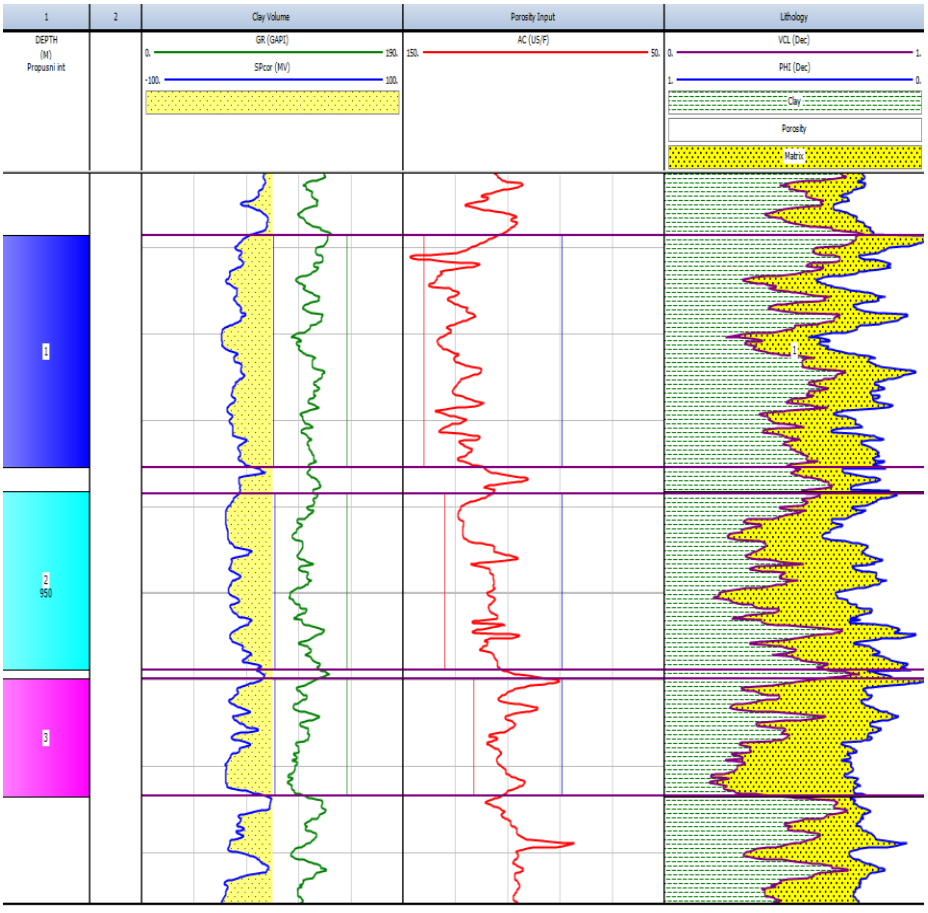
Odnosno Raymer-Hunt-Gardnerova jednadžba (Raymer et al., 1980):

$$\Phi = \frac{\Delta t - \Delta tma}{\Delta t} \times \frac{5}{8} \quad (4\text{-}7)$$

pri čemu izračunatu poroznost nije potrebno korigirati u slučaju slabe kompakcije.

4.3. Interpretacija poroznosti stijene

Interpretacija podataka uređaja za zvučnu karotažu kojom se određuje poroznost stijena temelji se na promatranju intervalnog vremena vala između odašiljača i prijemnika koje je u linernom odnosu sa poroznošću. Na slici 4-3 izračunata poroznost korelirana je s litološkim sastavom stijene (veći udio matriksa,manja poroznost) i volumnim udjelom gline. Što je veći volumni udio gline u stijeni, poroznost je manja i obrnuto.



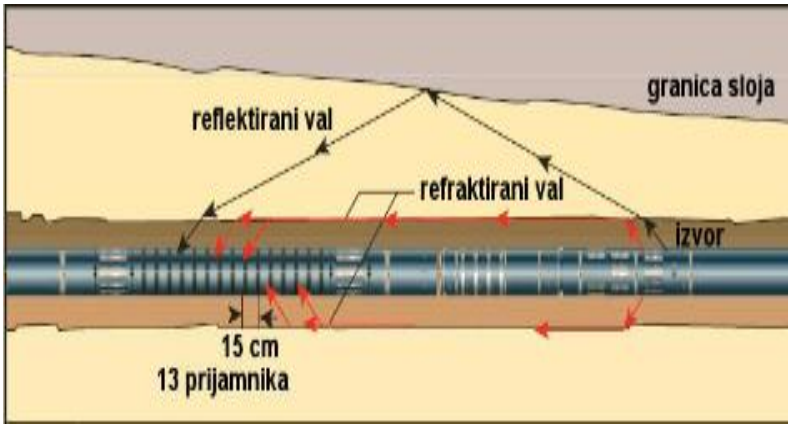
Slika 4-3. Interpretacija izmjerene poroznosti (Interactive Petrophysics)

5. SNIMANJE STIJENKE KANALA BUŠOTINE ZVUČNOM KAROTAŽOM

Upadni val koji dolazi do granice dvaju sredstava različitih brzina širenja vala, djelomično se odbija (reflektira), a djelomično se lomi (refraktira). Za razliku od klasičnih sondi pomoću kojih se određuje poroznost stijene mjereći brzinu ili intervalno vrijeme refraktiranog vala pri čemu su frekvencije odašiljača ispod 30 kHz, za mjerenje brzine ili amplitude reflektiranog vala koriste se ultrazvučni odašiljači s frekvencijama do nekoliko stotina kHz ili čak do 1 MHz. Pri tako visokim frekvencijama odaslanog vala njegova valna duljina je jako kratka i može biti i do nekoliko milimetara. Tako niske vrijednosti valnih duljina omogućavaju brojne zahvate koji se mogu obavljati u bušotini, a najčešći je svakako snimanje stijenke kanala bušotine. Snimanjem stijenke kanala dobivaju se brojni litološki i petrofizikalni podaci: poboljšani opis ležišta, točnija procjena proizvodnog sloja, procjenu kvalitete vezanja cementa za zaštitne cijevi, identifikacije i procjene sedimentnih oblika (nagibi slojeva, rasjedi) i dr. Jedan od najkorisnijih podataka dobiven snimanjem stijenke je identificiranje pukotina (fraktura) u kanalu bušotine.

5.1. Zvučni skener

Osnovni cilj snimanja stijenke kanala je stvaranje slike visoke rezolucije stijene koja okružuje kanal bušotine. Slika se stvara snimanjem i obradom energije reflektiranog vala od dodirne površine stijene i isplake. Snimanje stijenke obavlja se novijim uređajem za zvučnu karotažu u kojem su smješteni i odašiljač i prijemnik, a naziva se zvučni skener.

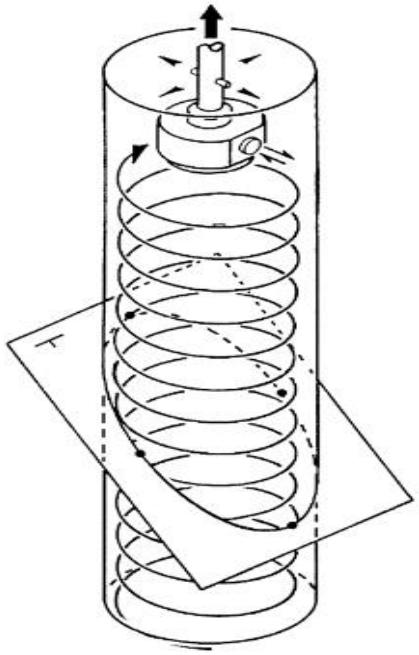


Slika 5-1. Zvučni skener (Haldorsen, 2007)

Slikom 5-1 prikazan je zvučni skener koji se sastoji od 3 monopolna odašiljača i 13 prijemnih stanica međusobno udaljenih 15 cm. Svaka prijemna stanica sadrži 8 prijemnika koji su razmješteni po cijelom opsegu skenera što ukupno daje 104 prijemnika. Ako se koriste sva 3 monopolna odašiljača dobije se ukupno 312 valnih oblika na svakoj dubini bušotine (Haldorsen, 2007).

Drugi način snimanja stijenke kanala je sondom čiji odašiljač i prijemnik rotiraju velikom brzinom tako da se dobiva spiralna slika koja je rezultat reflektiranog signala (slika 5-2).

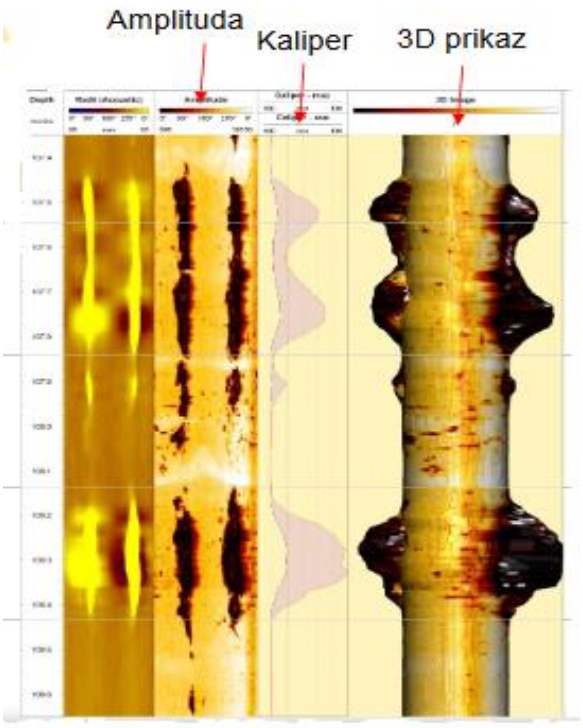
Slojevi koji presijecaju bušotinu pod nekim kutom prikazani su sinusoidom. U slučaju „odmotavanja“ spiralne slike u ravan položaj, sinusoide pokazuju prisutnost pukotina u kanalu bušotine.



Slika 5-2. Spiralno snimanje stijenke bušotine kao rezultat reflektiranog signala (Ellis i Singer,2008)

5.2. Interpretacija snimljene slike

Slika može biti izrađena ili praćenjem amplitude ili mjerenjem intervalnog vremena reflektiranog vala. Mjerenjem intervalnog vremena može se dobiti prikaz poprečnog presjeka bušotine te se mogu uočiti promjene u promjeru bušotine (Haldorsen,2007). U slučaju postojanja nabora, brazdi ili pukotina, reflektiranom valu bit će potrebno više vremena da dođe od odašiljača do prijemnika. Primjer slike izrađene praćenjem amplitude reflektiranog signala prikazan je na slici 5-3. Porastom amplitude reflektiranog vala uočavaju se odstupanja u promjeru kanala bušotine što potvrđuje i dijagram kalipera. Na krajnje desnoj slici, nastala odstupanja u promjeru bušotine dana su i u 3 D prikazu.



Slika 5-3. Slika izrađena praćenjem amplitude reflektiranog vala (https://docplayer.net/docs-images/63/49713441/images/6-7.jpg, 2020)

6. ZAKLJUČAK

Uz električna i radioaktivna karotažna mjerenja, zvučna karotaža predstavlja važnu kategoriju geofizičkih mjerenja u bušotini. Zvučnom karotažom mjeri se vrijeme prolaska elastičnog vala kroz stijenu. Mjerenje potrebnog vremena tzv. intervalnog vremena koje je potrebno refraktiranom P - valu od odašiljača do prijemnika koristi za određivanje poroznosti stijena, dok mjerenje intervalnog vremena ili brzine reflektriranog vala od odašiljača do prijemnika omogućuje snimanje stijenke kanala bušotine.

Poroznost stijene potrebno je poznavati za dobivanje kompletnijih podataka u interpretaciji ležišta i aktivnostima proizvodnje nafte i plina. Za čiste pješčenjake i kompaktne stijene poroznost se može odrediti korištenjem Wyllieve jednadžbe koja prikazuje linearan odnos između intervalnog vremena i poroznosti, a za određivanje poroznosti zaglinjenih i nekompaktnih stijena koriste se Raymer-Huntova i Raymer-Hunt-Gardnerova jednadžba.

Snimanjem stijenke kanala dobivaju se brojni litološki i petrofizikalni podaci od kojih je jedan od najvažnijih identificiranje fraktura u kanalu bušotine. Snimanje stijenke obavlja se novijim uređajem za zvučnu karotažu u kojem su smješteni odašiljač valova visokih frekvencija i prijemnik, a naziva se zvučni skener. Slika može biti izrađena ili praćenjem amplitude reflektiranog vala ili mjerenjem intervalnog vremena.

7. LITERATURA

BASSIOUNI, Z.,1994. Theory, Measurement, and Interpretation of Well Logs. SPE Textbook Series Vol. 4. Richardson

ELLIS, V.D., SINGER, J. M., 2008.Well Logging for Earth Scientists, Springer, 2nd Edition

GLOVER, P.W.J., 2012. Petrophysics. Department of Geology and Petroleum Geology University of Aberdeen, UK

HALDORSEN, J.B.U., VISSAPRAGADA, B., BORLAND, W.H. 2007. High resolution imaging from full- wavefrom sonic data. SPWLA India Regional Symposium, 19-20.4. 2007, 1-6.

RAYMER, L.L., HUNT, E.R., GARDNER J.S., 1980. An Improved Sonic Transit Time-to-Porosity Transform. Transactions of the SPWL4 21st Annual Logging Symposium, 8-11.7.1980, 1-12.

WYLLIE, M.R.J., GREGORY, A.R., GARDNER, L.W., 1956. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, 21, 41-70.

Internet izvori:

https://docplayer.net/docs-images/63/49713441/images/6-7.jpg (13.9.2020.)

https://doi.org/10.1190/tle38050385.1 (10.9.2020.)

LOUWERENS G.B., 2014. Identification of Subseismic Faults in Front of the Drillbit using Acoustic Measurements. URL: http://repository.tudelft.nl/ (9.9.2020.)

TENCHOV, G.G., 2016. Porosity evaluation from acoustic log using the theory of mixtures. URL: https://www.researchgate.net/publication/303881201/ (8.9.2020.)

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno temeljem znanja stečenog na Rudarsko - geološko - naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.

Dario Zahatek

KLASA: 602-04/20-01/129
URBROJ: 251-70-12-20-2
U Zagrebu, 18.09.2020.

Dario Zahatek, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM: 602-04/20-01/129, UR.BR. 251-70-12-20-2 od 30.04.2020. godine priopćujemo temu završnog rada koja glasi:

PRIMJENA ZVUČNE KAROTAŽE U ODREĐIVANJU POROZNOSTI STIJENA I SNIMANJU STIJENKE KANALA BUŠOTINE

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o završnom ispitu Izv. prof. dr. sc. Jasna Orešković izvanredna profesorica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Jasna Orešković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Vladislav Brkić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)