

Karotažna mjerenja dielektrične permitivnosti

Ivezić, Marina

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:436531>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-20**



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

KAROTAŽNA MJERENJA DIELEKTRIČNE PERMITIVNOSTI

Završni rad

Marina Ivezić

N4511

Zagreb, 2024

KAROTAŽNA MJERENJA DIELEKTRIČNE PERMITIVNOSTI

Marina Ivezić

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

Sažetak

Dielektrična karotaža je geofizička metoda koja omogućava precizno razlikovanje vode od nafte na temelju dielektrične permitivnosti. Primjenom visokih frekvencija tijekom mjerenja u bušotini, ova metoda može odrediti otpornost i dielektričnu konstantu stijene u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Povećanjem frekvencije odašiljača na sondi smanjuje se opseg mjerenja. Cilj ovog rada je istaknut značaj dielektrične konstante, predstaviti dugačku povijest dielektrične karotaže i na koji način nova generacija dielektričnih sondi može pridonijeti istraživanju naftnih ležišta.

Ključne riječi: dielektrična konstanta, dielektrična sonda, električna polarizacija

Završni rad sadrži: 24 stranice, 1 tablicu, 12 slika, i 10 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentori: Dr. sc. Jasna Orešković, redovita profesorica RGNF-a

Ocjenjivači: Dr. sc. Jasna Orešković, redovita profesorica RGNF-a
Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, izvanredna profesorica RGNF-a
Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF-a

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	III
POPIS KORIŠTENIH KRATICA	IV
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA	V
1. UVOD	1
2. KARAKTERISTIKE DIELEKTRIČNIH MATERIJALA	2
2.1. Permitivnost	2
2.2. Vrste polarizacija	6
2.2.1. Atomska polarizacija	7
2.2.2. Elektronska polarizacija	7
2.2.3. Molekularna polarizacija	7
2.2.4. Površinska polarizacija	8
2.3. Širenje elektromagnetskih valova u dielektričnom materijalu	9
3. DIELEKTRIČNE SONDE I NJIHOVA PRIMJENA	11
3.1. Najstarije dielektrične sonde	11
3.2. Primjer mjerenja EPT- sonde u bazenu Potiguar	12
3.3. Nova tehnologija dielektrične karotaže	14
3.3.1. Sonda CDR	15
3.3.2. Dielektrična sonda s nizom prijemnika	16
3.3.3. Nove visokofrekventne sonde	18
3.4. Primjena visokofrekventne dielektrične sonde u ležištima šejla	19
3.5. Primjena dielektrične karotaže na Espirito Santo bazenu	21
4. ZAKLJUČAK	23
5. LITERATURA	24

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Dielektrik između ploča kondenzatora	3
Slika 2- 2. Dominantnost različitih tipova polarizacije s obzirom na frekvenciju vanjskog električnog polja	6
Slika 2- 3. Odnos saliniteta i permitivnosti pri različitim temperaturama	8
Slika 3- 1. Princip mjerenja dielektrične sonde.....	11
Slika 3- 2. Dijagram dielektrične karotaže dobiven EPT sondom	13
Slika 3- 3. Raspored antena nove generacije dielektričnih sondi	14
Slika 3- 4. Dijelovi Schlumbergerove CDR-sonde	15
Slika 3- 5. Raspored antena simetrične sonde s nizom prijemnika.....	16
Slika 3- 6. Dijagram dielektrične karotaže dobivene sondom s nizom prijemnika.....	17
Slika 3- 7. Nova visokofrekventna sonda.....	18
Slika 3- 8. Dijagram dielektrične karotaže dobiven visokofrekventnom sondom	20
Slika 3- 9. Dijagram dielektrične karotaže u ležištima s niskom otpornosti slojne vode....	22

POPIS TABLICA

Tablica 2- 1. Relativna dielektrična permitivnost za različite tvari.....	5
---	---

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

CDR – sonda dvostruke otpornosti (engl. *Compensated Dual Resistivity Tool*)

EPT - sonda za elektromagnetska mjerenja (engl. *The electromagnetic propagation tool*)

LWD - mjerenje tijekom bušenja (engl. *Logging While Drilling*)

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
AC	$\mu\text{s/m}$	zvučna karotaža
DEN	kg/m^3	karotaža gustoće
CAL	mm	kaliper
GR	GAPI	gama karotaža
D	C/m^2	električni pomak
ϵ	C^2/Nm^2	permitivnost
\bar{E}	V/m	električno polje
C	F	kapacitet
ϵ_0	F/m	dielektrična konstanta vakuuma
A	m^2	površina ploča kondenzatora
Q	C	naboj
U	V	napon
P	C/m^2	inducirana polarizacija
N	$1/\text{m}^3$	ukupan broj atoma u jediničnom volumenu
q	C	ukupan naboj
δ	m	pomak
χ	-	električna susceptibilnost
ϵ'	-	relativna dielektrična permitivnost/dielektrična konstanta
ω	rad/s	kutna frekvencija
k	-	valni broj
t	s	vrijeme
μ	H/m	magnetska permitivnost
σ	S	specifična vodljivost
α	rad	fazni pomak
β	dB	prigušenje

1. UVOD

Bušotinska karotaža omogućuje mjerenja fizikalnih parametara stijena duž cijelog kanala bušotine, te se pomoću njih dobivaju informacije o svojstvima i stanju ležišnih slojeva. Fizikalna svojstva koja se najčešće mjere duž kanala bušotine su: električna otpornost, radioaktivnost, temperatura, prirodni električni potencijal, brzina rasprostiranja elastičnih valova. Metode koje se koriste s obzirom na svojstva koja se određuju su: električne metode, radioaktivne metode, akustične metode, elektromagnetske metode itd. Karotažna mjerenja pružaju bolji uvid u ležište, jer se njihovom primjenom određuju poroznost i propusnost stijene, koji su ujedno najvažniji parametri za definiranje volumena ležišta i proizvodnih mogućnosti bušotine. Mjerenja se obavljaju pomoću sondi koje se spuštaju u bušotinu, najčešće u nezacijevljenom kanalu bušotine.

Dielektrična karotaža se prvi puta pojavila 1970. godine u naftnoj i plinskoj industriji kao alternativna metoda pomoću koje se određuje dielektrična konstanta, ali se rijetko primjenjivala zbog visoke cijene, male preciznosti mjerenja, složenije interpretacije i obrade podataka. Najnovija tehnologija dielektrične karotaže ima sve učestaliju upotrebu zbog točnije i jednostavnije interpretacije podataka.

Karotažna mjerenja dielektričnih svojstava stijena primjenjuju se u ležištima gdje je teško procijeniti svojstva fluida zbog niske propusnosti i poroznosti ili nepoznatog saliniteta slojne vode. Različite tvari poput vode, stijene, plina i nafte značajno se razlikuju u dielektričnoj konstanti, gdje voda ima najveću vrijednost. Osim vode, minerali gline također imaju visoku dielektričnu konstantu, što može dovesti do zanemarivanja signala ugljikovodika. Dielektrična sonda je najosjetljivija na vodu i na temelju izmjerene dielektrične konstante fluida može se razlikovati voda od plina i nafte. Također, prednost ove sonde je mjerenje otpornosti stijene u vertikalnom i horizontalnom smjeru. Mjerenja se provode pri visokim frekvencijama, a što je viša frekvencija manji je opseg mjerenja, koji je u prosjeku deset centimetara.

U radu se prikazuje važnost dielektrične konstante, te kako nova tehnologija dielektričnih sondi može znatno pridonijeti istraživanju naftnih ležišta.

2. KARAKTERISTIKE DIELEKTRIČNIH MATERIJALA

Prema električnoj vodljivosti materijali se dijele na vodiče, poluvodiče i izolatore. Vodič je materijal koji provodi električnu struju, izolator je materijal koji ne provodi dobro električnu struju, a poluvodič je prema najstarijim definicijama materijal koji ima sposobnost provođenja struje manju od vodiča, a veću od izolatora.

Dielektrik (grčki dia (kroz) + elektrik) je materijal koji spada po električnim osobinama u izolatore jer sam ne vodi električnu struju, ali kroz njega prolazi električno polje. Slobodni elektroni i šupljine, slobodni ioni i slobodne nabijene skupine molekula kod dielektričnih materijala su nosioci naboja. Kao što se poluvodiči mogu podijeliti na polarne i ne-polarne materijale, tako se i dielektrični materijali mogu podijeliti na polarne i ne-polarne materijale. Polarne molekule pokazuju karakteristike električnog dipola kao na primjer voda, a ne-polarne molekule su molekule bez trajnih dipola poput metana, dijamanta itd. "Atomi zbog svoje sferne simetrije nemaju stalni električni dipol" (Herlinger, 2019)

2.1. Permitivnost

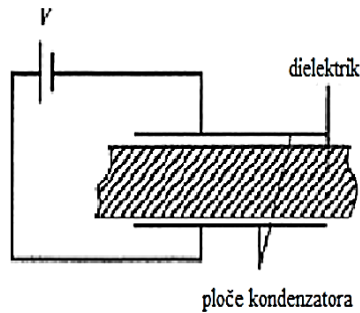
Najvažnije električno svojstvo dielektričnog materijala je permitivnost. Dielektrik povećava kapacitivnost kondenzatora ukoliko je postavljen između ploča kondenzatora (Slika 2-1). Dielektrični pomak je karakteriziran permitivnošću i električnim poljem (Kalfić, 2011):

$$D = \epsilon \bar{E} \quad (2-1.)$$

gdje su: D - električni pomak (C/m^2)

ϵ - permitivnost (C^2/Nm^2)

\bar{E} - vektor električnog polja (V/m).



Slika 2-1. Dielektrik između ploča kondenzatora (Kalfić, 2011)

Ukoliko dielektrični materijal nije postavljen između ploča kondenzatora, kapacitet kondenzatora će se računati prema (Ellis & Singer, 2008):

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2-2.)$$

gdje su: C - kapacitet (F)

ϵ_0 - dielektrična konstanta vakuuma ($8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m)

A - površina ploča kondenzatora (m^2)

d - udaljenost između ploča kondenzatora (m).

Naboj na pločama kondenzatora i napon su povezani preko kapaciteta kondenzatora (Ellis & Singer, 2008):

$$Q = CU \quad (2-3.)$$

gdje su: Q - naboj (C)

U - napon (V)

Ukoliko je dielektrični materijal postavljen između ploča kondenzatora, a naboj je konstantan, dogodit će se opadanje napona. S obzirom da se napon smanjuje, sukladno s time se smanjuje i električno polje. Ova pojava objašnjena je induciranom polarizacijom. Jezgra atoma je pozitivno nabijena, a okružena je negativno nabijenim elektronima gdje će se dogoditi pomak između naboja ukoliko se primjeni električno polje. Zbog razdiobe između naboja molekula i ukupnog naboja, molekula ima inducirani dipolni moment. Ako se zna ukupni broj atoma po kubičnom metru, tada je dipolni moment po jedinici volumena P (inducirana polarizacija) (Ellis & Singer, 2008):

$$P = Nq\delta \quad (2-4.)$$

gdje su: P - inducirana polarizacija (C/m^2)

N - ukupni broj atoma po m^3 ($1/m^3$)

q - ukupni naboj (C)

δ - pomak (m).

Inducirana polarizacija je proporcionalna električnom polju kod većine tvari, dielektričnoj osjetljivosti i dielektričnoj konstanti u vakuumu (Ellis & Singer, 2008):

$$P = \epsilon_o\chi\bar{E} \quad (2-5.)$$

gdje su: \bar{E} - vektor električnog polja (V/m)

χ - električna susceptibilnost (-).

Prema Gaussovom zakonu definiran je pomak električnog polja u materijalu D (Ellis & Singer, 2008):

$$D = \epsilon_o\bar{E} + P \quad (2-6.)$$

gdje je: D - pomak električnog polja (C/m^2)

Odnos između pomaka u električnom polju (D) i električnog polja je definirana (Ellis & Singer, 2008):

$$D = \epsilon_o(1 + \chi)\bar{E} = \epsilon'\epsilon_o\bar{E} \quad (2-7.)$$

gdje je: ϵ' - relativna dielektrična permitivnost ili dielektrična konstanta (-).

Dielektrična permitivnost definira se na sljedeći način (Ellis & Singer, 2008):

$$\epsilon = \epsilon'\epsilon_o = (1 + \chi)\epsilon_o \quad (2-8.)$$

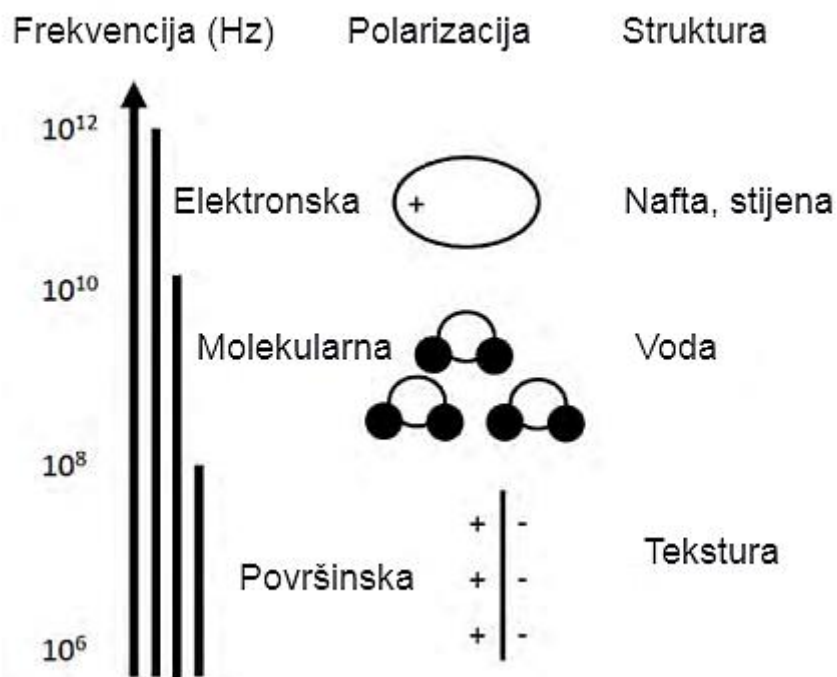
Relativna dielektrična permitivnost je različita za sve tvari. Voda ima najveću vrijednost i znatno odstupa od relativnih permitivnost ostalih tvari. Zbog velike razlike između relativne dielektrične permitivnosti vode i nafte, moguća su dielektrična karotažna mjerenja (Tablica 2-1).

Tablica 2- 1. Relativna dielektrična permitivnost za različite tvari (Ellis & Singer, 2008)

Materijali	Relativna dielektrična permitivnost (relativna za vakuum)
Pješčenjak	4,65
Dolomit	6,8
Vapnenac	7,5-9,2
Anhidrit	6,35
Halit	5,6-6,35
Gips	4,16
Nafta	2,0-2,4
Šećer	5-25
Slatka voda ispod 25 °C i frekvencije električnog polja ispod 10 ¹⁰ Hz	78,3

2.2. Vrste polarizacija

Michael Faraday je zaslužan za otkriće polarizacije dielektrika. Na dielektrična svojstva utječu elektronska, atomska, molekularna i površinska polarizacija. "Ovi procesi ovise o frekvenciji primjenjenog elektromagnetskog polja" (Seleznev et al., 2006; Hizem et al., 2008). Permitivnost će pri niskim frekvencijama, uvelike ovisiti o vodljivosti, geometriji poroznog sredstva, količini vode, dok će permitivnost pri visokim frekvencijama ovisiti o nafti. "Kako se frekvencija povećava, različite vrste polarizacije će biti dominantne" (Garcia & Heidari, 2018). Ukoliko vrijednost frekvencije ne prelazi iznos od 10^{12} Hz tada će elektronska polarizacija utjecati na permitivnost stijene zasićene naftom, na permitivnost vode utječe molekularna polarizacija ako frekvencija ne prelazi 10^{10} Hz, a na permitivnost stijene utječe površinska polarizacija sa frekvencijom u iznosu od 10^8 Hz (Slika 2-2).



Slika 2- 2. Dominantnost različitih tipova polarizacije s obzirom na frekvenciju vanjskog električnog polja (Herlinger, 2019)

2.2.1. Atomska polarizacija

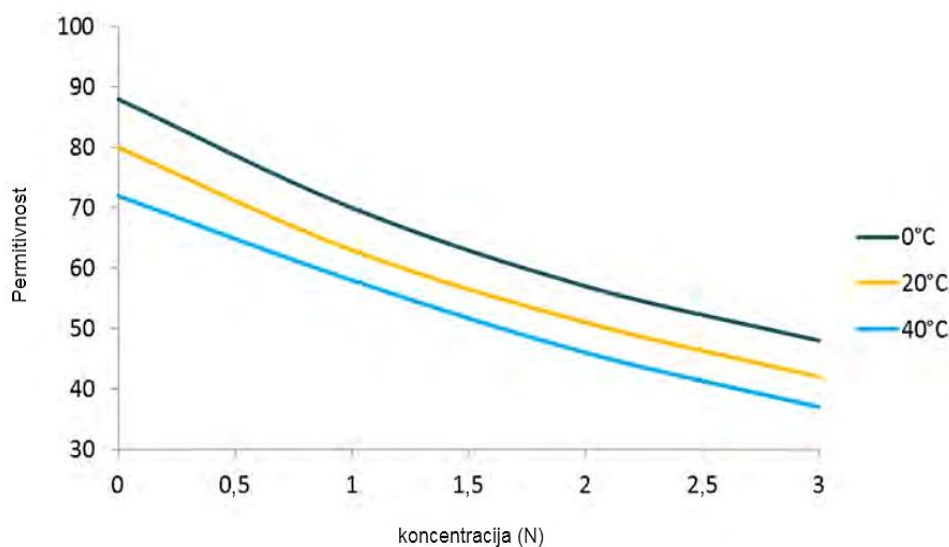
Atomska polarizacija nastaje kada električno polje djeluje na atome pri čemu će se atomi pomaknuti u odnosu na svoj početni položaj.

2.2.2. Elektronska polarizacija

Do nastanka elektronske polarizacija dolazi zbog promijene položaja elektrona u odnosu na jezgru atoma, gdje neće doći do stvaranja gubitaka jer se promjena položaja elektrona događa unutar atoma bez trenja. Dielektrična permitivnost je izazvana elektronskom polarizacijom. Dielektrična permitivnost opada ukoliko dođe do porasta temperature, a nepromijenjena će ostati bez obzira na porast frekvencije vanjskog električnog polja. Ova vrsta polarizacije prevladava prilikom izvođenja karotažnih mjerenja jer će tada frekvencija biti veća od uobičajenih frekvencija pri kojima se ova polarizacija javlja. Atomska i elektronska polarizacija će prevladavati u nafti i mineralima.

2.2.3. Molekularna polarizacija

Molekularna polarizacija se pojavljuje u molekulama poput vode jer one imaju stalni dipolni moment, odnosno ponašaju se kao mali dipoli. Ukoliko nema električnog polja, molekularna polarizacija ne djeluje na molekule, te će one biti nepravilno razmještene. Usmjeravanje molekula se postiže električnim poljem. Promjenom temperature se povećava aktivnost koja utječe na povećanje kinetičke energija čime se smanjuje permitivnost (Akerlof & Oshry, 1950), s druge strane permitivnost se povećava zbog povećanja koncentracije molekula po jedinici volumena što je uzrokovano tlakom (Hizem et al., 2008) (Slika 2-3).



Slika 2- 3. Odnos saliniteta i permitivnosti pri različitim temperaturama (Herlinger, 2019)

2.2.4. Površinska polarizacija

Površinska polarizacija je poznata kao Maxwell-Wagner-ov učinak. Posljedica Maxwell-Wagnerovog učinka je akumulacija naboja na granici između dva materijala. Ovisi o frekvenciji, veličini pora stijene i salinitetu slojne vode. Putem Maxwell-Wagnerovog učinka promatra se ponašanje materijala pri niskim frekvencijama električnog polja od 1 Hz do 1 GHz. Niske frekvencije omogućuju nastanak polarizacije jer ima dovoljno vremena za nakupljanje naboja, dok visoke frekvencije zbog vremenskog ograničenja to onemogućuju, stoga je Maxwell-Wagnerov učinak smanjen. Što su tanji listićavi minerali povećava se polarizacija zbog većeg nakupljanja naboja. Također, polarizacija će biti veća pri određenoj frekvenciji ukoliko je veći salinitet vode, jer tada će naboj lakše pratiti promjene električnog polja.

2.3. Širenje elektromagnetskih valova u dielektričnom materijalu

Val koji putuje kroz sredstvo u smjeru x ovisi o provodljivosti, dielektričnoj permitivnosti i magnetskoj permeabilnosti, a izražava se sljedećom jednačinom (Ellis & Singer, 2008):

$$E(x, t) = e^{i(kx - \omega t)} \quad (2-9.)$$

gdje su: E - elektromagnetski val u ovisnosti x, t

k - valni broj (-)

ω - kutna frekvencija (rad/s)

t - vrijeme (s)

Broj valova tada mora zadovoljiti uvjet (Ellis & Singer, 2008.):

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon + i \omega \sigma \mu \quad (2-10.)$$

gdje su: μ - magnetska permeabilnost (H/m)

ϵ - permitivnost (F/m)

σ - specifična vodljivost (S)

Na temelju prethodne jednačine dolazimo do zaključka da je broj valova kompleksan broj koji se izražava sljedećom jednačinom (Ellis & Singer, 2008):

$$k = \alpha + i\beta \quad (2-11.)$$

gdje su: α - fazni pomak (rad)

β - prigušenje (dB)

Uvrštavanjem kompleksnog broja vala u jednačinu putujućeg vala dobije se izraz (Ellis & Singer, 2008):

$$E = e^{-\beta x} e^{i(\alpha x - \omega t)} \quad (2-12.)$$

gdje su: x - udaljenost (m)

ω - kutna frekvencija (rad/s)

Val koji putuje na udaljenosti x smanjit će se za faktor $e^{-\beta x}$ i imat će fazni pomak. U slučaju ravnih valova možemo izračunati specifičnu vodljivost i dielektričnu permitivnost danom jednačinom (Ellis & Singer, 2008):

$$k^2 = (\alpha + i\beta)^2 = \omega^2 \epsilon \mu + i \omega \mu \sigma \quad (2-13.)$$

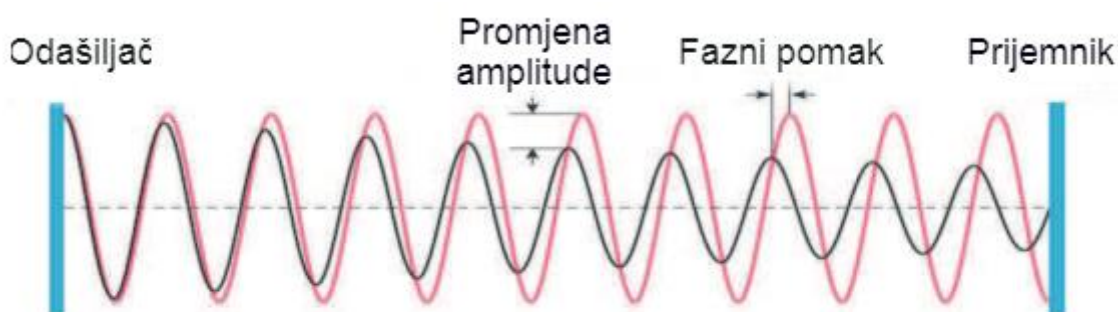
Razdvajanjem ove jednačbe na imaginarni i realni dio dobiju se izrazi za dielektričnu permitivnost i specifičnu vodljivost (Ellis & Singer, 2008):

$$\epsilon = (\alpha^2 - \beta^2)/\omega^2\mu \quad (2-14.)$$

$$\sigma = \frac{2\alpha\beta}{\omega\mu} \quad (2-15.)$$

3. DIELEKTRIČNE SONDE I NJIHOVA PRIMJENA

Dielektrična sonda se sastoji od najmanje jednog prijemnika i odašiljača. Odašiljač odašilje visokofrekventni elektromagnetski val koji se širi kroz sredstvo, a kad dođe u kontakt s mineralima stijene i fluidima mijenja se njegov fazni pomak i amplituda (Slika 3-1). Fazni pomak i amplituda se mogu izmjeriti pomoću prijemnika, a dielektrična permitivnost i provodljivost se dobivaju inverzijom promjene amplitude i faznog pomaka u svrhu određivanja poroznosti zone zasićene vodom.



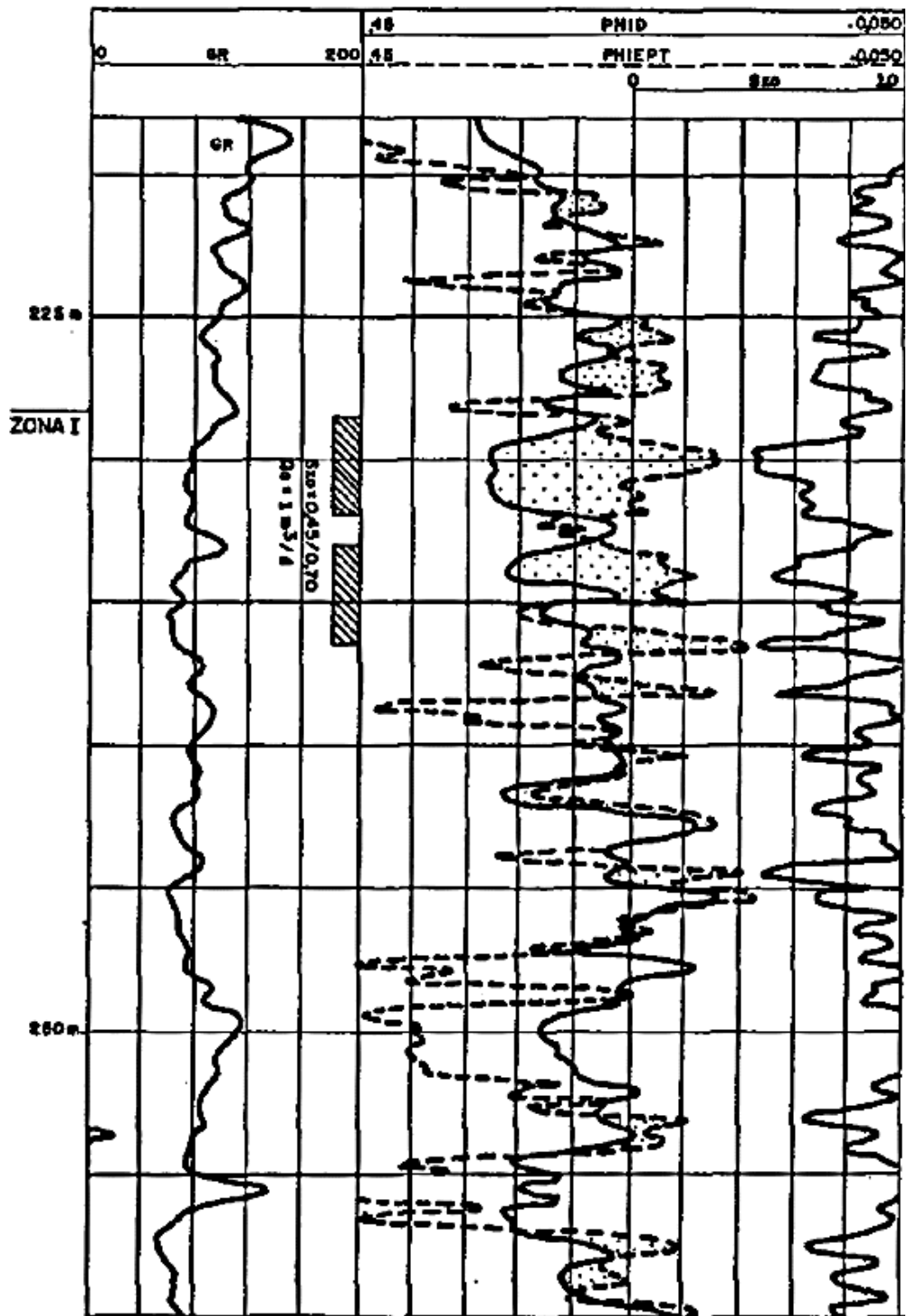
Slika 3- 1. Princip mjerenja dielektrične sonde (Yang et al., 2019)

3.1. Najstarije dielektrične sonde

Najstariji uređaj za mjerenje dielektričnih svojstva je sonda za elektromagnetska mjerenja (engl. *Electromagnetic Propagation Tool*, EPT) koji se po prvi puta pojavljuje 1970-tih godina. EPT sonde izvode mjerenja s malim radijusom, od pet centimetara u stijenama niske otpornosti do trideset centimetara u stijenama visoke otpornosti. Opseg mjerenja je ograničen zbog razmaka između dvije prijemne antene EPT uređaja smještene na poluzi pritisnutoj o stjenku kanala bušotine i zbog dubine prodiranja mikrovalova (engl. *skin depth*) koja ovisi i o otpornosti stijena. Ova metoda se najčešće primjenjivala u slojevima zasićenim slatkom vodom jer se lakše postiže polarizacija, a mjerenja su davala jasniju razliku između zona zasićenih vodom i naftom, nego mjerenja otpornosti. Nažalost, ova metoda se prestala primjenjivati već krajem 1990-tih. godina zbog raznih ograničenja dielektričnih mjerenja poput složenosti mjerenja dielektrične konstante stijene, utjecaja na okoliš itd.

3.2. Primjer mjerenja EPT- sonde u bazenu Potiguar

Tijekom 1980-tih godina provedene su dvije serije dielektričnih karotažnih mjerenja EPT-sondom, gdje je naposljetku utvrđeno da postoji ležište teške i lake nafte. Ležišta ugljikovodika visoke pokretljivosti nisu dala zadovoljavajuće rezultate zbog prisutnosti minerala glina koji su ometali identifikaciju ugljikovodika EPT uređajem. Međutim, ležišta ugljikovodika niske pokretljivosti dala su zadovoljavajuće rezultate (Slika 3-2). Karotažni dijagram u ovom primjeru prikazuje krivulju prirodne gama-karotaže (GR), poroznost dobivenu karotažom gustoće (PHID), a PHIEPT krivulja daje podatke o poroznosti dobivenoj EPT-sondom pri zasićenju vodom.

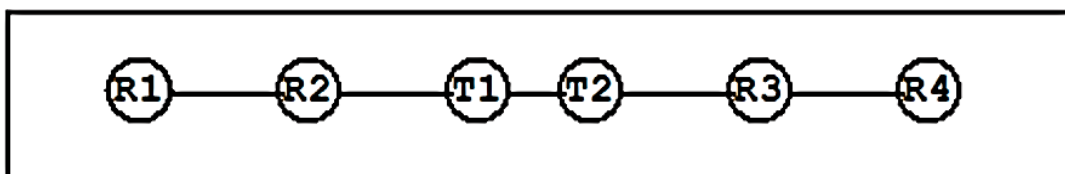


Slika 3- 2. Dijagram dielektrične karotaže dobiven EPT sondom (Herlinger, 2019)

3.3. Nova tehnologija dielektrične karotaže

Nova tehnologija dielektričnog mjerenja omogućuje bolji kontakt sa stijenom. Dielektrični instrumenti nove generacije tj. sonde se sastoje od nekoliko pravilno raspoređenih odašiljačkih antena i antena prijemnika koje smanjuju pogreške i utjecaj bušotinskih uvjeta (Slika 3-3). Sondom s dva odašiljača i četiri prijemnika pri jednom mjerenju se dobije šesnaest signala putem kojih se određuje amplituda i fazni pomak. Na temelju tih mjerenja se dobiju i četiri krivulje otpornosti i dielektrične konstante. Tehnički i interpretacijski problemi dielektrične karotaže su smanjeni zbog omogućenog mjerenja u više smjerova (horizontalnom i vertikalnom). Kako ne bi došlo do problema prilikom uspoređivanja rezultata različitih bušotina, dielektrične sonde nove generacije koriste frekvenciju od 1 GHz, jer tada salinitet slojne vode i građa stijene imaju mali utjecaj na dielektrično mjerenje.

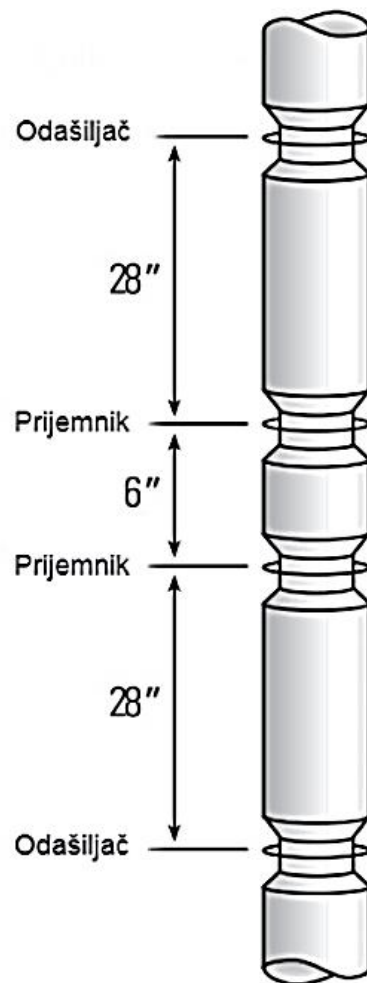
U slojevima zasićenim slatkom vodom, sloj zasićen naftom i vodom imaju visoku otpornost, stoga ih je teško razlikovati. Napredna tehnologija dielektrične karotaže daje rješenje tom problemu. Kao što je već rečeno, dielektrična karotaža mjeri dielektričnu konstantu, pa će se na temelju njene velike razlike odrediti je li u pitanju voda ili nafta. Osim što ova metoda može riješiti problem sloja zasićenog vodom, također može riješiti problem teške nafte koja se kao i slatka voda većinom nalazi u plitkim slojevima. Metode mjerenja otpornosti slatke vode i teške nafte nema smisla primjenjivati jer oba fluida imaju visoku otpornost. Stoga su najučinkovitije karotažne metode za identifikaciju teške nafte one kojima se određuje poroznost poput zvučne karotaže i dielektrična krivulja otpornosti.



Slika 3- 3. Raspored antena nove generacije dielektričnih sondi (Yang et al., 2019)

3.3.1. Sonda CDR

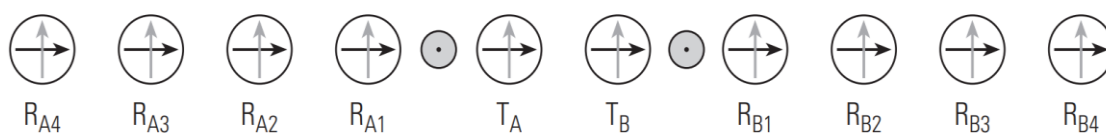
Sonda dvostruke otpornosti je unaprijeđena verzija prvih sonde koje su mogle mjeriti tijekom bušenja. Starija verzija LWD (engl. *Logging While Drilling*, LWD) sonde su mjerile fazni pomak pri visokim frekvencijama. CDR sonda (engl. *Compensated Dual Resistivity Tool*, CDR) osim što mjeri fazni pomak, mjeri i prigušenja između prijemnika i dva odašiljača čija je aktivacija naizmjenična. Dva odašiljača i dva prijemnika su pravilno raspoređeni na sondi, udaljenost između odašiljača i prijemnika iznosi 0,7112 m (28"), prijemnici su smješteni u centru sonde, te je razmak između njih 0,1524 m (6") (Slika 3-4).



Slika 3- 4. Dijelovi Schlumbergerove CDR-sonde (Ellis & Singer, 2008: Clark et al., 1988)

3.3.2. Dielektrična sonda s nizom prijemnika

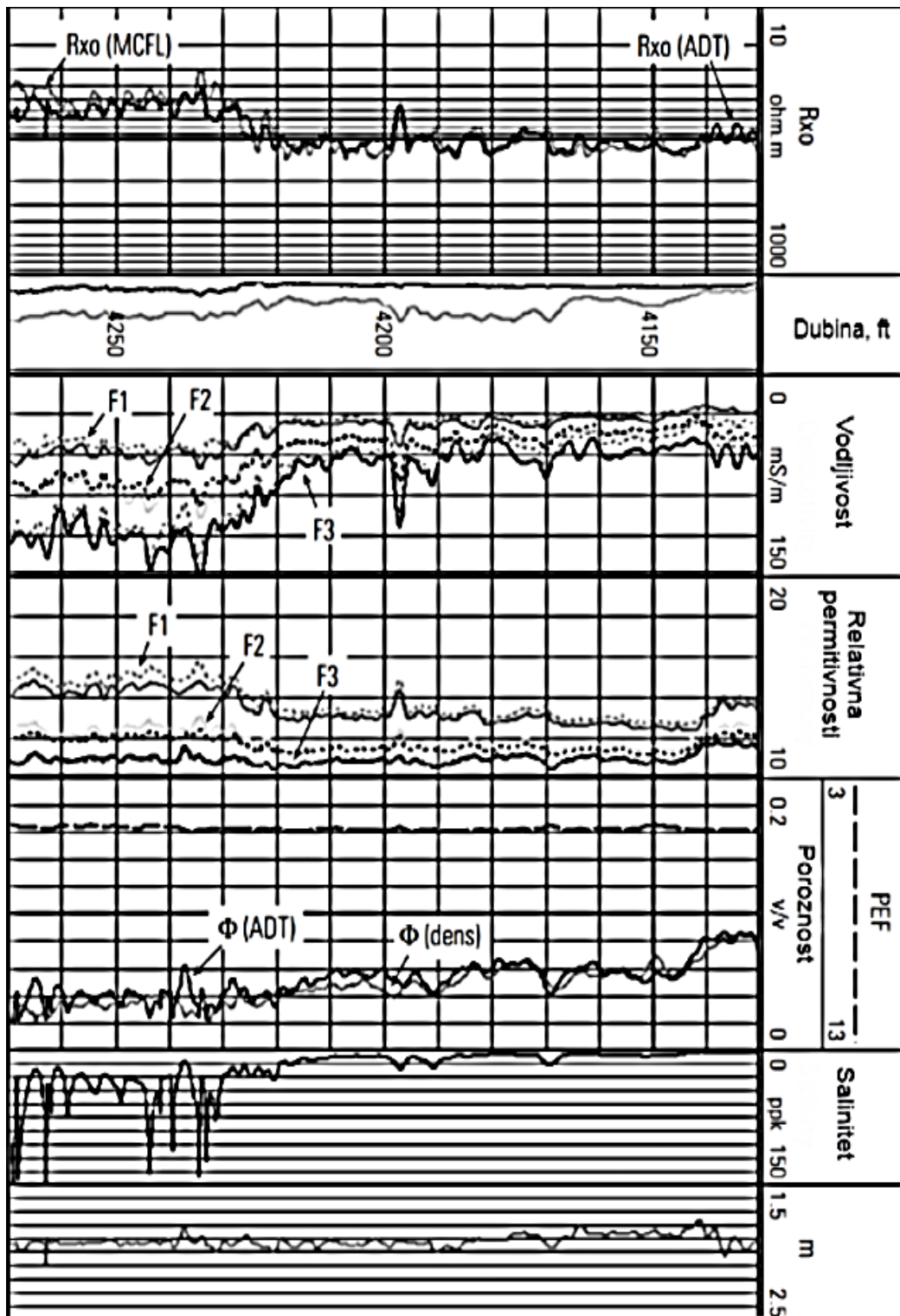
Dielektrična sonda je pričvršćena na papuču, koja se prislanja na stijenku kanala bušotine, i sadrži osam prijemnika (R) i dva odašiljača (T) koji su simetrično raspoređeni (Slika 3-5). Svaki odašiljač i prijemnik sastoji se od dva magnetska dipola koji su međusobno okomiti. Na Slici 3-5 krugovi između odašiljača i prijemnika predstavljaju električne dipole. Inovativan izgled nove dielektrične sonde omogućuje korekciju za uvjete u bušotini, te odvajanje utjecaja isplačnog obloga od utjecaja isprane zone.



Slika 3- 5. Raspored antena simetrične sonde s nizom prijemnika (Ellis & Singer, 2008)

Slika 3-6 prikazuje dijagram izmjeren dielektričnom sondom. Mjerenja su provedena u karbonatnim stijenama zasićenim vodom. Dielektričnom sondom je mjerena provodljivost i relativna permitivnost pomoću tri različite frekvencije u rasponu od 100 MHz do 1 GHz. U ovom slučaju je bio poznat fluid (slojna voda), ali nije bio poznat salinitet u blizini kanala bušotine. Zato je cilj bio odrediti salinitet slojne vode, poroznost pri zasićenju vodom, permitivnost čvrstog dijela stijene i eksponent cementacije (m). Dvije pune linije u središtu grafa predstavljaju relativnu permitivnost i provodljivost, izmjerene pri tri frekvencije (označene s F1, F2 i F3) nakon što je korigiran utjecaj isplačnog obloga.

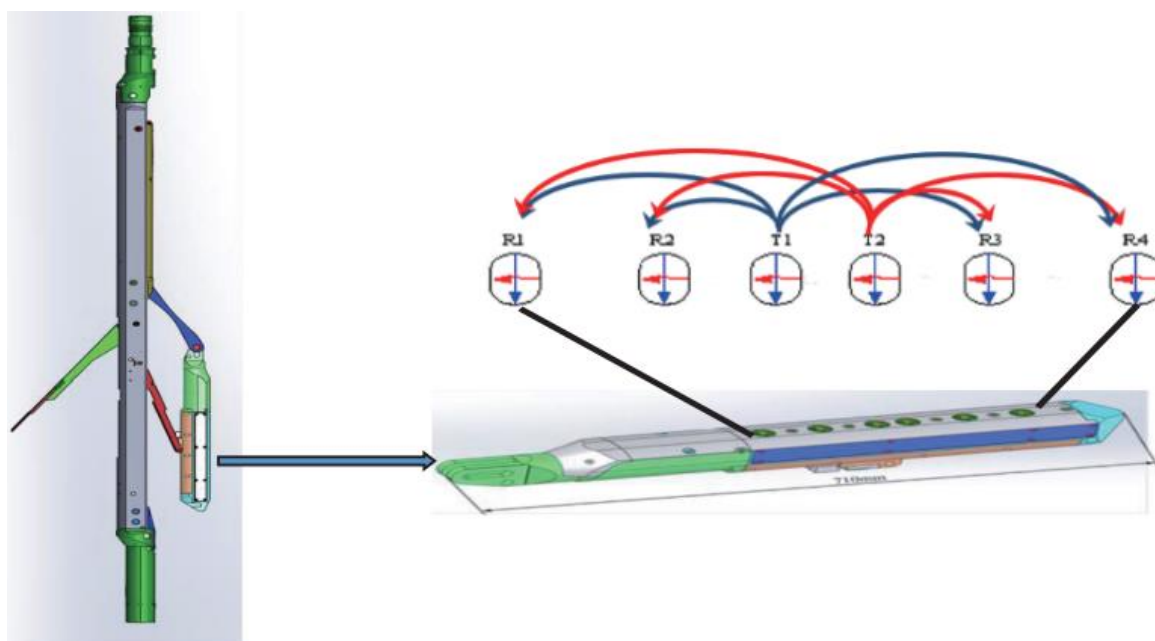
Ovako dobivena poroznost (Φ_{ADT}) vrlo dobro se podudara s poroznosti izračunatom pomoću karotaže gustoće (Φ_{dens}). Također, otpornost isprane zone ($R_{xo}(ADT)$) izračunata pomoću poroznosti, saliniteta i faktora cementacije odgovara vrijednostima izmjerenim drugim metodama (npr. MCFL).



Slika 3- 6. Dijagram dielektrične karotaže dobivene sondom s nizom prijemnika (Ellis & Singer, 2008)

3.3.3. Nove visokofrekventne sonde

22nd Institute of China Electronics Technology Group Corporation (Li et al., 2021) je razvio novu generaciju visokofrekventnih dielektričnih sonde koje se mogu primjenjivati za procjenu i identifikaciju ležišnih fluida. Visokofrekventna sonda nema prijašnjih ograničenja starih dielektričnih sonde jer se sastoji od većeg broja antena i koristi mikrovalove koji postižu frekvenciju od 1 GHz (Slika 3-7). Na Slici 3-7 je prikazana sonda sa šest antena koje su raspoređene na pravilnoj udaljenosti jedna od druge. R1, R2, R3, R4 su antene prijemnici, a T1 i T2 su antene odašiljači. Udaljenost između R1 i R2 iznosi šest centimetara, R2 i T1 također šest centimetara, T1 i T2 četiri centimetara, T2 i R3 šest centimetara i naposljetku udaljenost između R3 i R4 antene je šest centimetara. Pomoću ove sonde dobit ćemo šesnaest krivulja amplitude i fazne krivulje putem čega su smanjene pogreške. R1, R2, R3, R4 u horizontalnom smjeru polarizacije daju informacije o amplitudi i faznom pomaku (HA1, HA2, HA3, HA4, HP1, HP2, HP3, HP4), dok R1, R2, R3, R4 u vertikalnom smjeru polarizacije daju informacije o amplitudi i faznom pomaku (VA1, VA2, VA3, VA4, VP1, VP2, VP3, VP4), naposljetku dobijemo krivulju otpornosti i krivulju dielektrične konstante.



Slika 3- 7. Nova visokofrekventna sonda (Li et al., 2021)

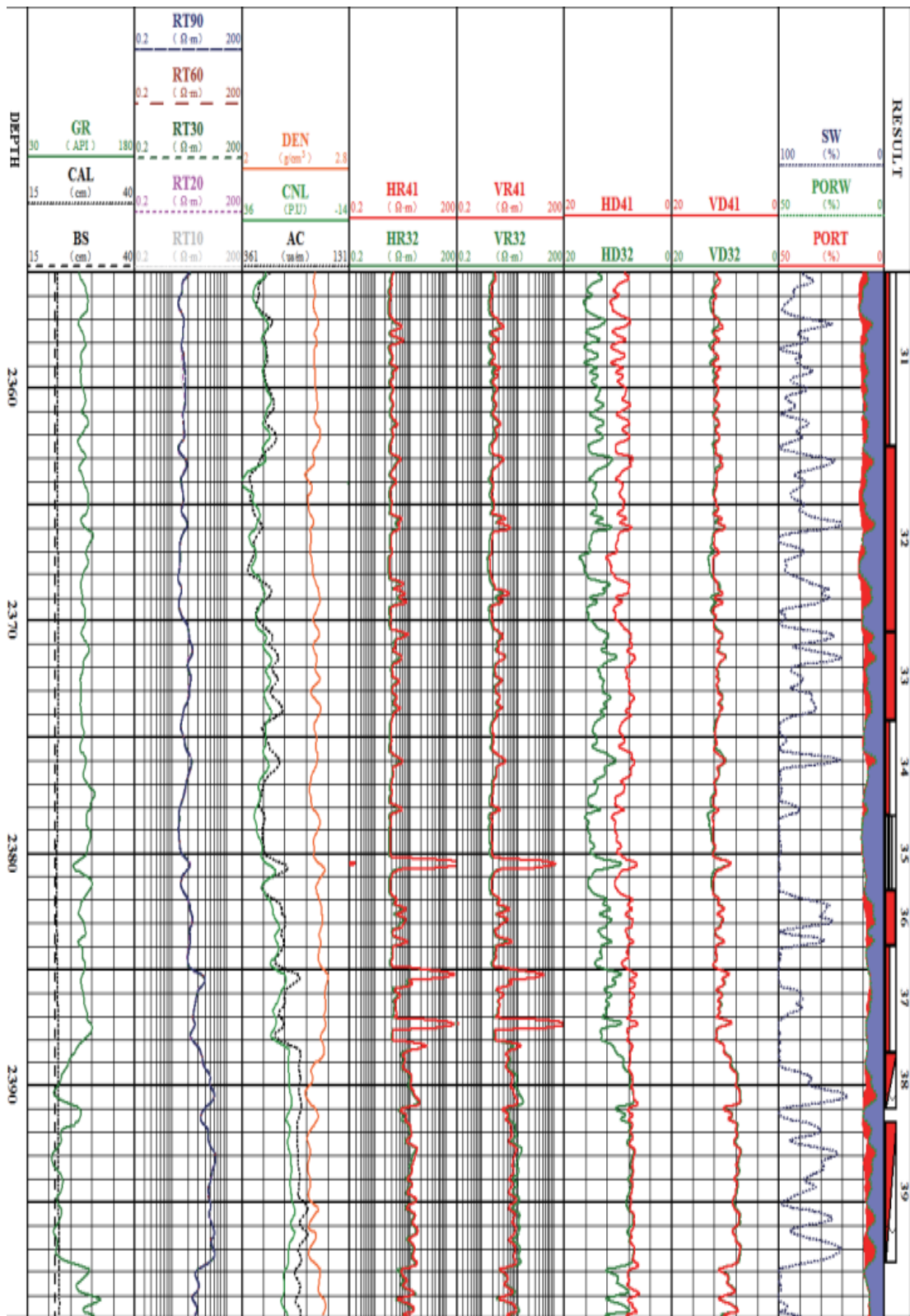
3.4. Primjena visokofrekventne dielektrične sonde u ležištima šejla

Na području sjeveroistočne Kine se nalazi bazen Songliao, koji je veliki sedimentni bazen u kojem ležišne stijene čini šejl zasićen naftom. "Šejl zasićen naftom formacije Qingshankou i formacije Nenjiang čine glavnu seriju ležišnih stijena nafte na jugu bazena Songliao" (Li et al., 2021). Primjena karotažnog mjerenja dielektrične konstante je uvelike pridonijela u istraživanju ovog područja.

Rezultati mjerenja u formaciji Nenjiang su prikazani na Slici 3-8. Na dubini od 2354 do 2389 metara je nekonvencionalno ležište koje čini šejl zasićeno naftom, dok je na dubini od 2389,1 do 2391,4 metara pješčenjačko konvencionalno ležište. Na dijagramu je u prvoj koloni krivulja prirodne gama karotaže (GR), pomoću koje je dobiven volumni udio šejla. CAL je krivulja promjera bušotine, a BS promjer dlijeta. RT10, RT20, RT30, RT60, RT90 su krivulje otpornosti izmjerene klasičnom induktivnom sondom uz različite frekvencije odašiljača, DEN je krivulja karotaže gustoće, CNL je krivulja kompenzirane neutronske karotaže, AC je krivulja akustične karotaže. Krivulje HR41, HR32, VR41, VR32 su krivulje otpornosti dobivene dielektričnim mjerenjem pri čemu H označava horizontalnu polarizaciju, a V vertikalnu. HD41, HD32, VD41, VD32 su krivulje dielektričnih parametara pomoću kojih je izračunata dielektrična konstanta.

Konačni rezultati su prikazani u posljednjoj koloni, pri čemu je PORT ukupna poroznost izračunata pomoću karotaže gustoće i neutronske karotaže, odnosno klasičnim načinom. PORW je poroznost izračunata pomoću indeksa loma, a SW mineralizacija slojne vode dobiveni dielektričnim mjerenjima.

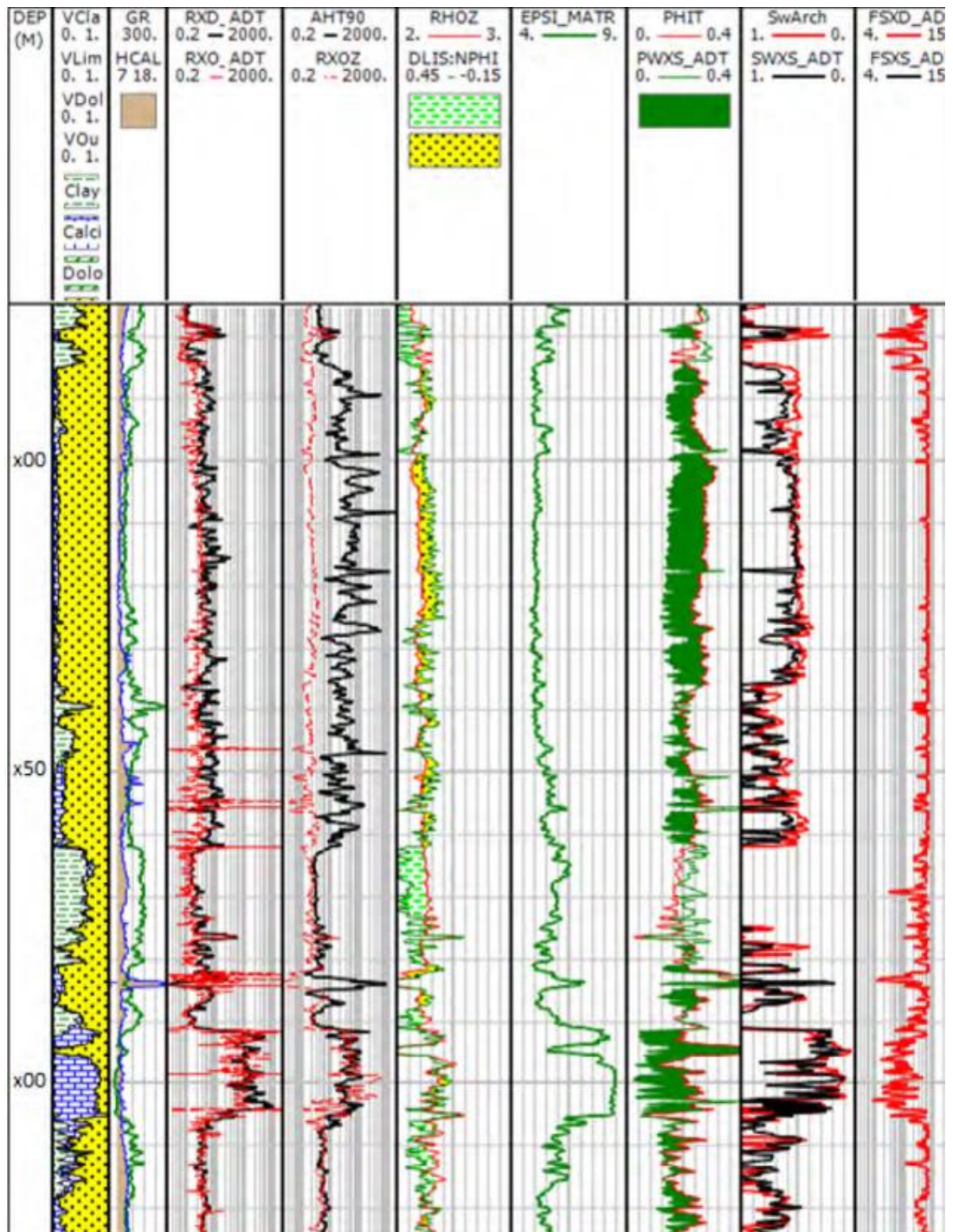
Mjerenja klasičnom induktivnom sondom, iako različitim frekvencijama, pokazuju vrlo male razlike duž cijele dubine intervala. Zbog toga ne omogućavaju razlikovanje intervala zasićenih naftom i vodom. No, presjekom krivulja PORT i PORW dobiven je udio u poroznom prostoru koji je zasićen naftom i prikazan je crveno u zadnjoj koloni (Slika 3-8), odnosno zasićenje vodom koje je prikazano plavo.



Slika 3- 8. Dijagram dielektrične karotaže dobiven visokofrekventnom sondom (Li et al., 2021)

3.5. Primjena dielektrične karotaže na Espirito Santo bazenu

U Espirito Santo bazenu (Brazil) nalaze se brojna ležišta u fazi proizvodnje. Dielektrična mjerenja su ovdje korištena kako bi se procijenilo zasićenje ležišta ugljikovodicima, a korišten je dielektrični skener. Sonda se upotrebljavala u ležištima s niskom otpornosti vode, odnosno velikim salinitetom, za procjenu slojeva koji sadrže teške nafte. Rezultati postignuti dielektričnim mjerenjem bili su argument za postojanje zaliha nafte u ležištu (Slika 3-9). Rezultati dobiveni dielektričnom sondom prikazani su od četvrte kolone, u kojoj su otpornost (netaknute zone - R_{XD} i isprane zone - R_{XO}). U sedmoj koloni je permitivnost matrice tj. čvrstog dijela stijene (EPSI_MATR), a u osmoj koloni ukupna poroznost (PHIT) i poroznost stijene zasićene vodom ($PwXS_ADT$). U pretposljednjoj koloni prikazano je zasićenje vodom dobivenom dielektričnom sondom ($SwXS_ADT$ – crna linija) i pomoću mikrootpornosti ($SwArch$ – crvena linija). Vrijednosti su vrlo slične, a mala odstupanja su u plićim dijelovima gdje zasićenje vodom izračunato pomoću otpornosti pokazuje nešto manje vrijednosti. Salinitet dobiven dielektričnom sondom prikazan je u posljednjoj koloni, a dobivene su očekivane vrijednosti.



Slika 3- 9. Dijagram dielektrične karotaže u ležištima s niskom otpornosti slojne vode (Herlinger, 2019)

4. ZAKLJUČAK

U početnim fazama razvoja, dielektrične sonde nisu bile prihvaćene zbog tehnoloških ograničenja i visoke cijene. Razvoj dielektričnih sondi odvijao se u dva pravca. Prvi pravac uključuje povećanje broja prijemnika i odašiljača na cijeli niz, dok se drugi odnosi na poboljšanje kroz promjenu frekvencije odašiljača od 1 ili 2 GHz sve do cijelog raspona frekvencija. Prednost takvih mjerenja je osjetljivost na vodu u pornom prostoru stijene jer voda ima znatno veću relativnu dielektričnu konstantu od nafte. Također, u slučajevima kada je salinitet vode malen pogodno je primjenjivati dielektričnu karotažu jer je otpornost takve vode velika isto kao i ugljikovodika. Kod slatke vode će klasične elektrokarotažne metode dati slična mjerenja za različite fluide pa ih je teško razlikovati. Međutim, dielektrična karotaža će dati visoke vrijednosti dielektrične konstante za vodu bez obzira na njezin salinitet, a niske vrijednosti za ugljikovodike.

Primjeri dielektričnih karotažnih mjerenja provedenih s novom generacijom visokofrekventnih sondi su utvrdila dielektričnu konstantu stijene i fluida. Kombinirajući rezultate s drugim karotažnim metodama poput gama karotaže, neutronske karotaže, akustične karotaže i kalipera, dielektričnom karotažom je uspješno izračunata poroznost slojeva zasićenih vodom i mineralizacija vode. Dielektrična karotažna mjerenja su omogućila dobre rezultate u istraživanju ležišta nafte iz Songliao bazena. Istraživanje je pokazalo da primjena dielektrične karotaže može biti korisna za otkrivanje nafte u ležištima šejla.

Glavni zadatak dielektrične karotaže je procijeniti sadržaj fluida u stijeni.

5. LITERATURA

1. Akerlof, G., Oshry, H. I. 1950. *The Dielectric Constant of Water at High Temperatures and in Equilibrium with its Vapor*. Journal of the American Chemical Society, 72(7), pp. 2844-2847
2. Clark, B., Luling, M. G., Jundt, J., Ross, M., Best, D. 1988. *A dual depth resistivity measurement for formation evaluation while drilling*. Trans SPWLA 29th Annual Logging Symposium, paper A
3. Ellis, D. V., Singer, J. M. 2008. *Well Logging for Earth Scientists*. Drugo izdanje. Dordrecht: Springer
4. Garcia, A. P., Heidari, Z., 2018. Integrated Characterization of Multi-Frequency Dielectric Dispersion Measurements in Mixed-Wet Rocks, in SPWLA 59th Annual Logging Symposium. London, UK : Society of Petrophysicist and Well-Log Analysts, p.17
5. Herlinger, E., 2019. Dielectric Logging : *Principles, Applications, and Examples from the Brazilian Oilfields*. Offshore Technology Conference, OTC-29882-MS, 1-14
6. Hizem, M., Budan, H., Deville, B., Faivre, O., Mosse, L., Simon, M. 2008. Dielectric Dispersion : A New Wireline Petrophysical Measurement, in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA: Society of Petroleum Engineers, p.21
7. Kalfić, R., 2011. Dielektrični materijal. Osijek: Sveučilište J. J. Strossmayera, Odjel za fiziku
8. Li, C., Deng, S., Li, Z., Fan, Y., Zhang, J., Yang, J. 2021. *Application of High-Frequency Dielectric Logging Technology for Shale Oil Production*. Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol. 100, 53-61
9. Seleznev, N. V et al. 2006. Formation properties derived from a multi-frequency dielectric measurement, in SPWLA 47th Annual Logging Symposium. Veracruz, Mexico: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, p.12.
10. Yang, Z., Zhang, J., Li, C., 2019. *Application od Dielectric Logging in the Oilfield Area*, Photonics & Electromagnetics Research Symposium, Xiamen, China, 2363-2368

IZJAVA

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

M. Ivezić

Marina Ivezić



KLASA: 602-01/24-01/134
URBROJ: 251-70-12-24-2
U Zagrebu, 11. 9. 2024.

Marina Ivezić, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/134, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 01.07.2024. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

KAROTAŽNA MJERENJA DIELEKTRIČNE PERMITIVNOSTI

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

Mentorica:

(potpis)

Prof. dr. sc. Jasna Orešković

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Karolina
Novak Mavar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)