

# Primjena NMR-karotaže za procjenu poroznosti i identifikaciju ležišnih fluida

---

Jelušić, Marin

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:706398>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-26**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Prijediplomski studij naftnog rudarstva

**PRIMJENA NMR-KAROTAŽE ZA PROCJENU POROZNOSTI I  
IDENTIFIKACIJU LEŽIŠNIH FLUIDA**

Završni rad

Marin Jelušić

N4402

Zagreb, 2024.

## PRIMJENA NMR-KAROTAŽE ZA PROCJENU POROZNOSTI I IDENTIFIKACIJU LEŽIŠNIH FLUIDA

Marin Jelušić

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

### Sažetak

Jedna od metoda koja se koristi u industriji nafte i plina za procjenu rezervi ugljikovodika je metoda nuklearne magnetske rezonancije (NMR) koja omogućuje analizu poroznosti i propusnosti stijena, kao i identifikaciju fluida unutar njih. Prednost NMR metode u odnosu na druge metode karotažnih mjerenja je da utjecaj na mjerenje ima samo fluid u porama bez potrebe za kalibracijom sonde prema vrsti stijena. NMR metoda temelji se na primjeni magnetskog polja koje uzrokuje polarizaciju i magnetizaciju protona vodika u ugljikovodicima i vodi, te dobiveni signal rezultira ključnim podacima kao što su longitudinalno i transverzalno vrijeme relaksacije. Distribucija dobivenih vremena relaksacije odražava veličinu pora i karakteristike fluida u ležištu. Analiza NMR podataka omogućuje procjenu svojstava stijena kao što su poroznost i propusnost te identifikaciju vrsta fluida i procjenu zasićenosti fluida u ležištu. Metoda se može koristiti samostalno ili u kombinaciji s drugim metodama karotaže, što rezultira detaljnijim informacijama o ležištu.

Ključne riječi: nuklearna magnetska rezonancija, polarizacija, magnetizacija, longitudinalno vrijeme relaksacije, transverzalno vrijeme relaksacije, poroznost, propusnost

Završni rad sadrži: 19 stranica, 16 slika i 8 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentor: Prof. dr. sc. Jasna Orešković

Ocjenjivači: Prof. dr. sc. Jasna Orešković  
Izv. prof. dr. sc. Sonja Koščak Kolin  
Izv. prof. dr. sc. Borivoje Pašić

## SADRŽAJ

<b>POPIS SLIKA</b> .....	<b>II</b>
<b>POPIS KORIŠTENIH KRATICA</b> .....	<b>III</b>
<b>POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNIH JEDINICA</b> .....	<b>IV</b>
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. METODA NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE (NMR)</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1. Princip mjerenja</b> .....	<b>3</b>
<b>3. PRIKAZ PODATAKA I OSNOVNA INTERPRETACIJA</b> .....	<b>8</b>
<b>3.1. Analiza u vremenskom području (TDA)</b> .....	<b>8</b>
<b>3.2. Analiza difuzije (DIFAN)</b> .....	<b>11</b>
3.2.1. Metoda poboljšane difuzije (EDM) .....	14
<b>3.3. MRIAN metoda</b> .....	<b>15</b>
<b>4. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>18</b>
<b>5. LITERATURA</b> .....	<b>19</b>

## POPIS SLIKA

Slika 1-1. Prikaz sonde u kanalu bušotine .....	1
Slika 2-1. Sonda za mjerenje NMR-metodom.....	2
Slika 2-2. Nasumična orijentacija magnetnih osi protona.....	3
Slika 2-3. Precesija protona oko $B_o$ te porast magnetizacije.....	4
Slika 2-4. Magnetizacija ležišnih fluida za vrijeme polarizacije ( $T_p$ ).....	4
Slika 2-5. Primjena radio-valova, odnosno polja $B_1$ .....	5
Slika 2-6. Signali odjeka jezgre vodika - protona .....	5
Slika 2-7. Prikaz pretvorbe NMR signala u $T_2$ distribuciju putem inverzije.....	6
Slika 2-8. Tipične vrijednosti vremena $T_1$ i $T_2$ te brzina difuzije ( $D$ ) za različite vrste fluida .....	7
Slika 3-1. Analiza u vremenskom području (TDA) dvojnomo- $TW$ karotažom .....	9
Slika 3-2. Grafički prikaz rezultata mjerenja primjenom modela analize u vremenskom području.....	10
Slika 3-3. Analiza difuzije (DIFAN) dvojnomo- $TE$ karotažom .....	12
Slika 3-4. Grafički prikaz rezultata primjenom modela analize difuzije.....	13
Slika 3-5. Grafički prikaz podataka dobivenih metodom poboljšane difuzije .....	15
Slika 3-6. Ukupna poroznost dobivena različitim polarizacijama.....	16
Slika 3-7. Grafički prikaz kombinacije konvencionalnih metoda i NMR-karotaže .....	17

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

NMR – nuklearna magnetska rezonancija

TDA – analiza vremenskog područja (engl. *Time Domain Analysis* )

DIFAN – analiza difuzije (engl. *Diffusion Analysis* )

EDM – metoda poboljšane difuzije ( engl. *Enhanced Diffusion Method* )

MRIAN – interpretacijska metoda koja kombinira NMR podatke, podatke o otpornosti i model dvojne vode (engl. *Magnetic Resonance Imaging Analysis*)

MRIL PERM - propusnost određena na temelju podataka dobivenih NMR mjerenjem

BVI – udio vezane vode (engl. *Bulk Volume Irreducible*)

DSM – metoda diferencijalnog spektra (engl. *Differential Spectrum Method*)

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

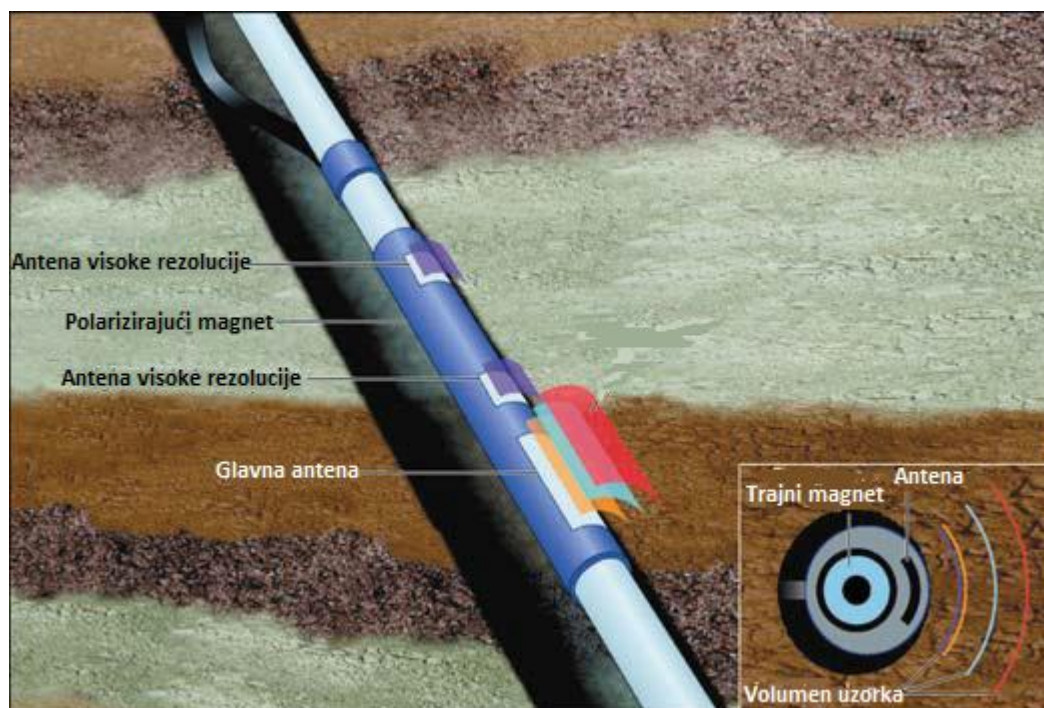
Oznaka	Jedinica	Opis
$B_o$	G	vanjsko statičko magnetsko polje, gaus ; $1 \text{ G}=10^{-4} \text{ T}$
$B_1$	G	oscilirajuće magnetsko polje, gaus
$T_p$	s	vrijeme polarizacije, sekunda
$M_o$	G	ravnotežno stanje koje postiže proton za vrijeme polarizacije, gaus
$f$	Hz	frekvencija, herc
$T_1$	ms	longitudinalno vrijeme relaksacije, milisekunda ; $1 \text{ ms}=0,001 \text{ s}$
$T_2$	ms	transverzalno vrijeme relaksacije, milisekunda
$T_{2b}$	ms	glavno vrijeme relaksacije, milisekunda
$T_{2s}$	ms	površinsko vrijeme relaksacije, milisekunda
$T_{2d}$	ms	difuzijsko vrijeme relaksacije, milisekunda
$A(T_2)$	-	amplituda u distribuciji vremena $T_2$ koja odgovara vremenu $T_2$
$TE$	ms	vrijeme razmaka između parova radio-valova pod kutem $180^\circ$
$TW$	ms	vrijeme između prvog i zadnjeg radio-vala pod kutem $180^\circ$
$D_a$	$\text{cm}^2/\text{s}$	koeficijent difuzije, kvadratni centimetar po sekundi
MPHI	-	efektivna poroznost
RES/R	$\Omega\text{m}$	otpornost, ohmmetar
SP	mV	spontani potencijal, milivolt
-	ft	stopa, mjerna jedinica za dužinu/dubinu ; $1 \text{ ft}=0,3048 \text{ m}$
-	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	paskal-sekunda, mjerna jedinica za viskoznost

## 1. UVOD

U industriji nafte i plina koriste se razne metode za procjenu rezervi ugljikovodika u ležištu kako bi se dobile ključne informacije za donošenje odluka o razradi ležišta i izradi bušotina te osigurala učinkovitija proizvodnja ugljikovodika. Njihov proizvodni potencijal mora biti ekonomski isplativ te opravdavati izradu bušotina za proizvodnju ugljikovodika. Karotažna mjerenja izvode se većinom pomoću sonde spuštenih u kanal bušotine (Slika 1-1.), a mjerena fizikalna veličina se prikazuje pomoću dijagrama iz kojeg se procjenjuju svojstva stijena i fluida u porama stijene.

Pored ostalih, nuklearna magnetska rezonancija (NMR) jedna je od novijih metoda karotažnih mjerenja koja se koristi u procjeni rezervi ugljikovodika, pri kojoj sondu nije potrebno kalibrirati s obzirom na litologiju jer na mjerenje utjecaj imaju samo fluidi u pornom prostoru. To je glavna karakteristika po kojoj se NMR-karotaža razlikuje u odnosu na konvencionalne metode kao što su: karotaža električne otpornosti, akustična karotaža, neutronska karotaža i karotaža gustoće. NMR nam daje uvid u podatke o porama i fluidima u njima. To su informacije o veličini pora te svojstvima i količini fluida u pornom prostoru.

U radu će se objasniti mjerenje, prikazati rezultati te interpretirati ključni parametri dobiveni NMR-karotažom.



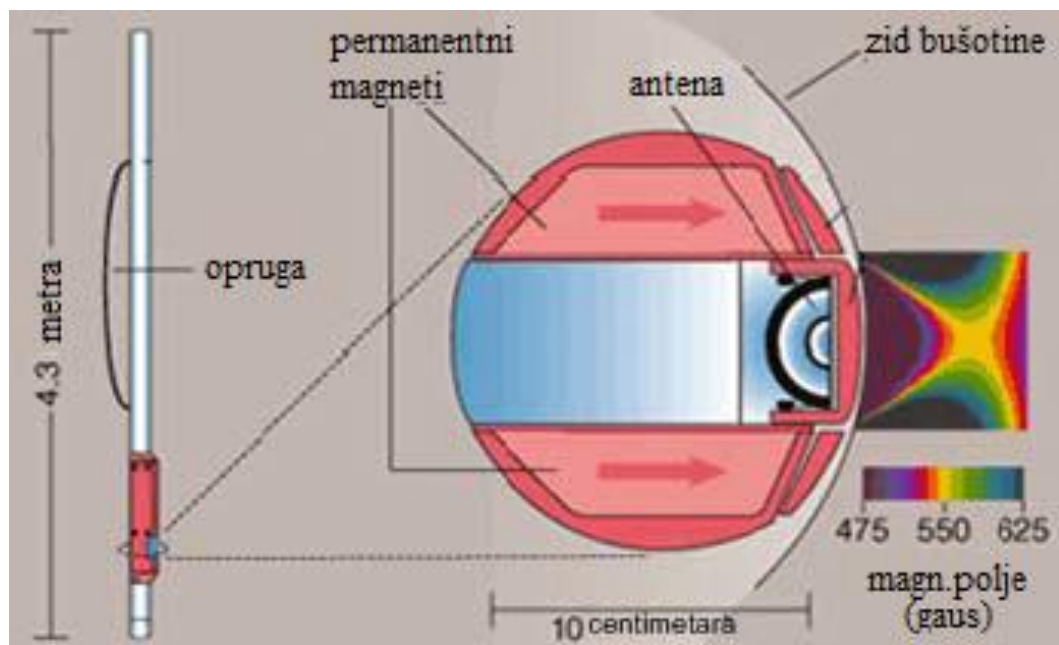
**Slika 1-1.** Prikaz sonde u kanalu bušotine (Freedman, 2005)



## 2. METODA NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE (NMR)

Jedna od metoda za procjenu količine ugljikovodika u ležištima je metoda nuklearne magnetske rezonancije koja se temelji na djelovanju vanjskog magnetskog polja na magnetski moment jezgre vodika. Korištenjem sonde za mjerenje NMR-metodom koja je podešena na magnetnu rezonantnu frekvenciju vodika koji je prisutan u vodi i ugljikovodicima, amplituda signala može biti mjerena i ona je proporcionalna broju jezgri vodika. Sonde su opremljene snažnim samarij kobaltnim trajnim magnetima koji su otporni na promjene u temperaturi, te se koriste za polarizaciju jezgri vodika u ugljikovodicima i vodi (Freedman, 2005). Osim magneta, sonde se još sastoje i od antene koja odašilje magnetno-rezonantne frekvencijske impulse, te prijemnika koji mjeri odziv na poslone impulse.

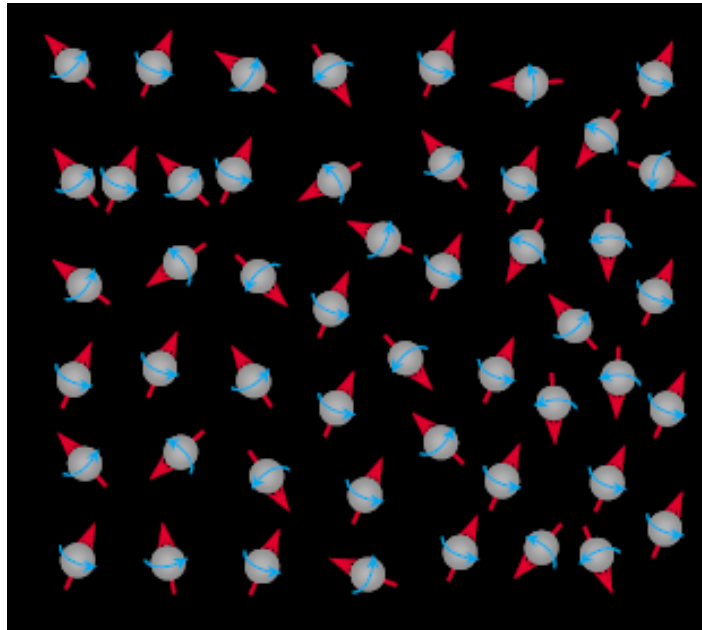
Na Slici 2-1 mogu se vidjeti dva magneta koja stvaraju vanjsko magnetsko polje u sloju oko bušotine te antenu koja emitira radio-valove u stijenu u preciznim vremenskim intervalima (oscilirajuće magnetsko polje). Antena služi i kao prijemnik jer između vremenskih intervala prima povratni signal atoma vodika koji su u rezonanciji s magnetskim poljem magneta.



Slika 2-1. Sonda za mjerenje NMR-metodom (Chandra & Surya, 2008)

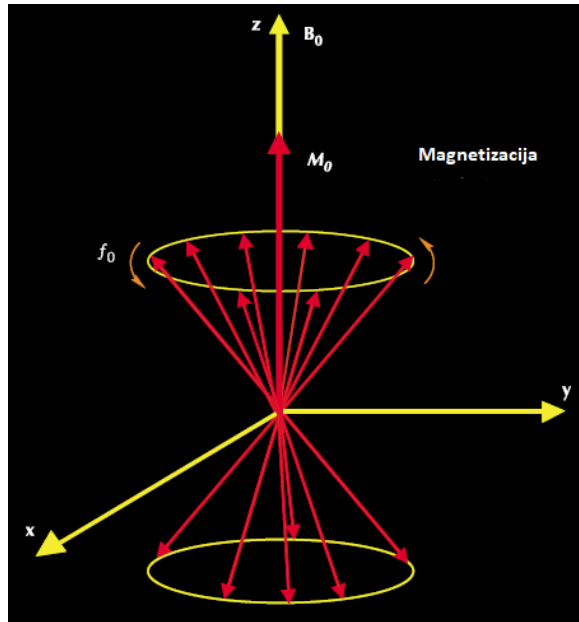
## 2.1. Princip mjerenja

Jezgra vodika se zbog vlastitog magnetskog momenta može promatrati kao dipol čije ja os u pravcu osi rotacije (spina) protona. Bez djelovanja vanjskog magnetskog polja magnetne osi su nasumično orijentirane kao što se može vidjeti na Slici 2-2.



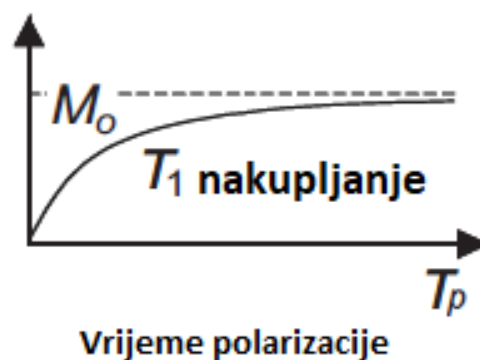
**Slika 2-2.** Nasumična orijentacija magnetnih osi protona (Coates et al., 1999)

Djelovanjem magneta jezgre protona se usmjeravaju (orijentira se magnetski moment) u smjeru vanjskog statičkog magnetnog polja ( $\mathbf{B}_0$ ) tj. polariziraju se. Primjena vanjskog statičkog magnetnog polja ( $\mathbf{B}_0$ ) na protone uzrokuje precesiju protona oko istog (Slika 2-2.). Precesija se javlja kada tijelo koje rotira oko jedne osi polako rotira precesijskom frekvencijom ( $f$ ) (naziva se i Larmorova frekvencija) oko druge osi, što je u ovom slučaju statičko magnetsko polje ( $\mathbf{B}_0$ ).



**Slika 2-3.** Precesija protona oko  $B_0$  te porast magnetizacije (Coates et al., 1999)

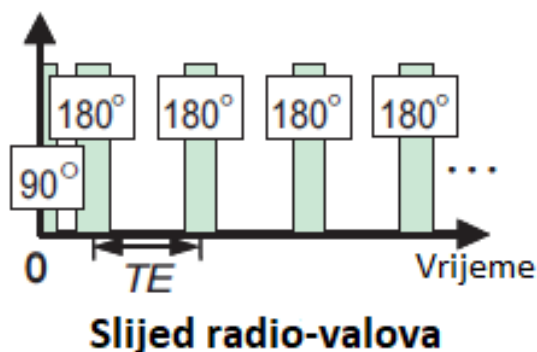
Vrijeme potrebno da se jezgre magnetiziraju je longitudinalno vrijeme relaksacije i označeno je kao  $T_1$ . Tijekom vremena polarizacije ( $T_p$ ), nuklearna magnetizacija raste eksponencijalno prema svom ravnotežnom stanju ( $M_0$ ) (Slika 2-4.). Korišteno vrijeme polarizacije mora biti najmanje tri puta duže od vremena  $T_1$  da bi se osigurala dovoljna magnetizacija, jer ako je vrijeme polarizacije prekratko ukupna poroznost dobivena NMR mjerenjem neće prikazati stvarnu poroznost ležišta (Freedman, 2005).



**Slika 2-4.** Magnetizacija ležišnih fluida za vrijeme polarizacije ( $T_p$ ) (Freedman, 2005)

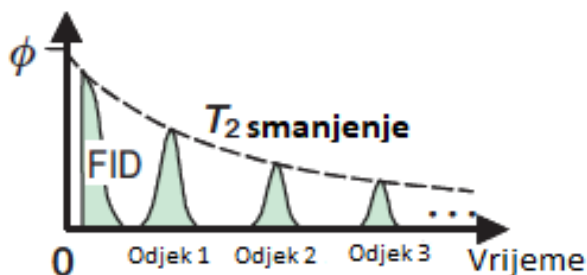
Distribucija vremena  $T_1$  potrebna je za opisivanje procesa magnetizacije te odražava sastav ugljikovodika i raspodjelu veličina pora u sedimentnim stijinama (Freedman & Heaton, 2004).

Nakon polarizacije protona, kreće pokretanje rotacije protona emitiranjem oscilirajućeg magnetnog polja ( $B_I$ ), odnosno radio-valova emitiranih antenom. Između tih radio-valova NMR signal se bilježi istom antenom koja je te radio-valove i emitirala. Prvi radio-val je pod kutom od  $90^\circ$  i rotira vektor magnetizacije koji je u početku paralelan sa  $B_o$ , u transverzalnu ravninu koja je okomita na  $B_o$ , te se pokreće rotacija protona pod kutom od  $90^\circ$ . Nakon toga slijedi serija radio-valova pod kutom od  $180^\circ$  (Slika 2-5.), a NMR signal promatran između svakog radio-vala se bilježi, te se naziva odjekom (engl. *echo*) jer doseže maksimalnu amplitudu u središnjoj točki između svakog para valova, a zatim mu vrijednost pada na nulu prije idućeg vala (Freedman, 2005). Važna karakteristika NMR sonde je minimalni razmak odjeka ( $TE$ ) jer određuje granicu osjetljivosti sonde, tj. najkraće vrijeme  $T_2$  koju može mjeriti.



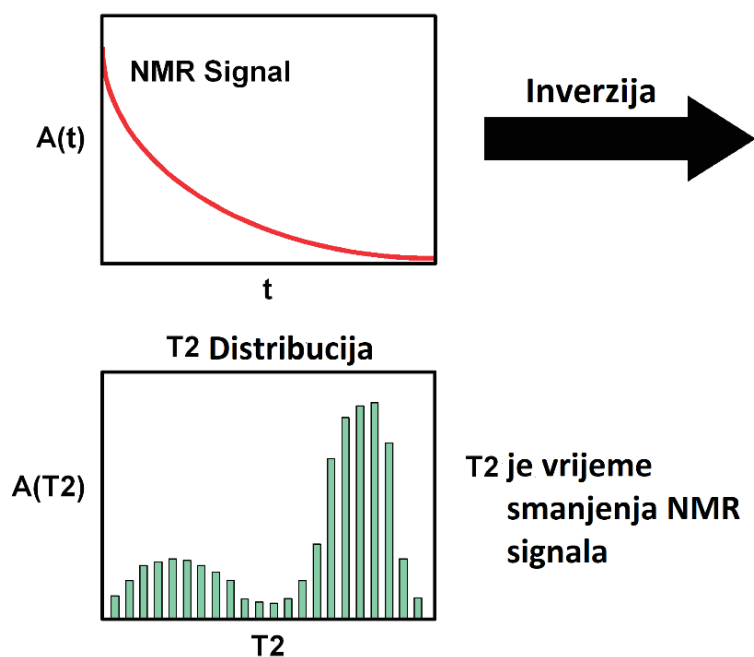
**Slika 2-5.** Primjena radio-valova, odnosno polja  $B_I$  (Freedman, 2005)

Kada se isključi oscilirajuće polje, protoni se vraćaju u početni smjer u koji ih je usmjerilo statičko polje. Amplituda NMR signala opada eksponencijalno, a krivulju opisuje karakteristično transverzalno vrijeme relaksacije označeno s  $T_2$ . Za vrijeme opadanja signala dolazi do smanjenja magnetizacije, kao što je prikazano na Slici 2-6.



**Slika 2-6.** Signali odjeka jezgre vodika - protona (Freedman, 2005)

Uobičajeno je u praksi da se mjereni NMR signali zbroje u cjelinu od oko 30-ak pojedinačnih eksponencijalno opadajućih signala od kojih svaki ima amplitudu  $A(T_2)$  i pridruženo vrijeme relaksacije  $T_2$ . Zbrajanje u cjelinu je postignuto matematičkim putem koji se naziva inverzija (Freedman & Heaton, 2004). Amplitude  $A(T_2)$  su rezultati inverzije, te se grafičkim prikazom može prikazati  $T_2$  distribucija kao što je prikazano na Slici 2-7. Područje ispod krivulje distribucije transversalnog vremena relaksacije ( $T_2$ ) je proporcionalno ukupnoj poroznosti.



**Slika 2-7.** Prikaz pretvorbe NMR signala u  $T_2$  distribuciju putem inverzije (Freedman & Heaton, 2004)

Raspodjela vremena  $T_2$  pruža korisne informacije o ležišnim stijenama i fluidima jer se izdvajanjem grupa vrijednosti  $T_2$  matematičkim putem dobiva raspodjela  $T_2$  tj. krivulja koja predstavlja raspodjelu veličine pora. Budući da su vrijednosti  $T_2$  proporcionalne veličini pora, određuje se granična vrijednost  $T_2$  (engl. *Cutoff*) ispod koje se očekuje da će odgovarajući fluidi biti prisutni u malim porama, a iznad koje će odgovarajući fluidi biti prisutni u većim porama. Tako se može odrediti ukupnu i efektivnu poroznost bez utjecaja mineralnog sastava stijene, propusnost, raspodjelu veličina pora, viskoznost te vrstu i količine ugljikovodika.

Vrijednosti  $T_2$  se određuju iz laboratorijskih NMR-mjerenja na jezgrama ili se koriste poznate vrijednosti ovisne o litološkom sastavu:

- za gline oko 3 ms
- za siltove od 3 ms do 33 ms
- za pješčenjake oko 33 ms
- za karbonatne stijene oko 100 ms.

Iz NMR mjerenja se stoga može odrediti granulometrijski sastav stijene jer se voda nalazi u porama različite veličine.

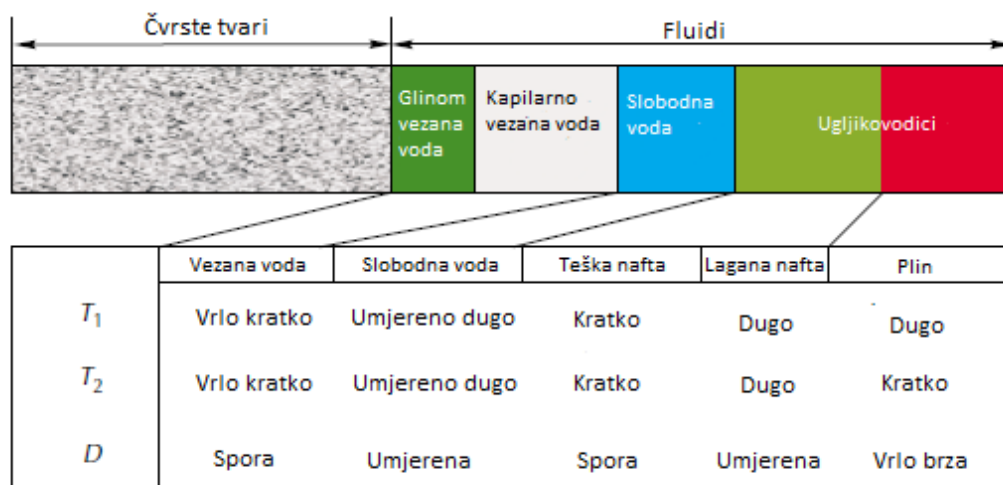
Transverzalno vrijeme relaksacije ( $T_2$ ) ovisi o nekoliko parametara

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2b}} + \frac{1}{T_{2s}} + \frac{1}{T_{2d}} \quad (2-1)$$

gdje su:

- $T_2$  – transverzalno vrijeme relaksacije
- $T_{2b}$  – glavno vrijeme relaksacije (engl. *Bulk relaxation*) koje je svojstveno pojedinom fluidu
- $T_{2s}$  – površinsko vrijeme relaksacije (engl. *Surface relaxation*) koje ovisi o mineralogiji stijena i omjeru površine pore i volumena u njoj
- $T_{2d}$  – difuzijsko vrijeme relaksacije koje ovisi o gradijentu magnetskog polja i vrsti fluida

Slika 2-8 prikazuje varijabilnost vremena relaksacije  $T_1$  i  $T_2$  te brzinu difuzije ( $D$ ) s obzirom na fluide u pornom prostoru.



**Slika 2-8.** Tipične vrijednosti vremena  $T_1$  i  $T_2$  te brzina difuzije ( $D$ ) za različite vrste fluida (Coates et al., 1999)

### 3. PRIKAZ PODATAKA I OSNOVNA INTERPRETACIJA

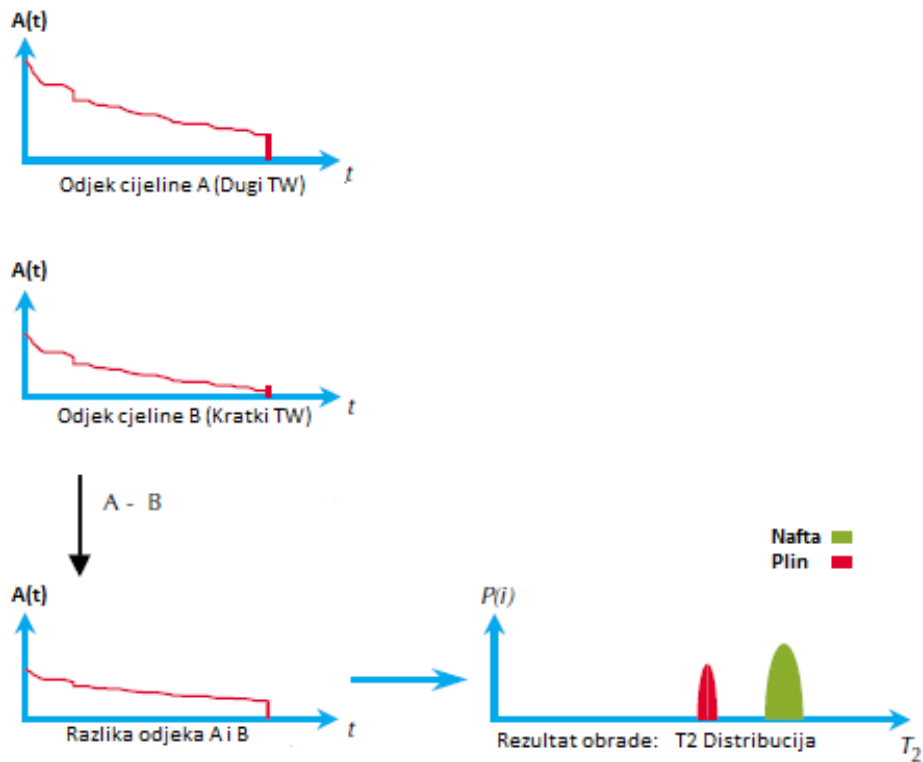
NMR podaci mogu se analizirati samostalno ili u kombinaciji sa podacima dobivenim konvencionalnim metodama (npr. električna otpornost, gustoća i dr.). Kada se podaci interpretiraju samostalno mogu prikazati poroznost i propusnost (koja je izračunata matematičkim putem iz odnosa NMR-poroznosti i srednje vrijednosti vremena relaksacije  $T_2$ ), kao i informacije o vrstama i količini fluida u ležištu. Dva računalna modela dostupna su za samostalnu analizu NMR podataka, model analize u vremenskom području (engl. *Time Domain Analysis*, TDA) i model analize difuzije (engl. *Diffusion Analysis*, DIFAN) (Coates et al., 1999). Još jedan model može se koristiti u prikupljanju podataka i pruža vrijedne informacije za otkrivanje viskozne nafte, a naziva se poboljšana metoda difuzije (engl. *Enhanced Diffusion Method*, EDM).

Ako se NMR podaci prikazuju u kombinaciji sa ostalim metodama (karotaža električne otpornosti, akustična karotaža, neutronska karotaža i karotaža gustoće) može se doći do ključnih informacija za razradu ležišta. Interpretacijski model koji koristi tu kombinaciju podataka naziva se MRIAN (engl. *Magnetic Resonance Imaging Analysis*).

#### 3.1. Analiza u vremenskom području (TDA)

Analiza u vremenskom području (TDA) se temelji na činjenici da različiti fluidi imaju različite brzine polarizacije ili različita vremena relaksacije  $T_1$ . Longitudinalno vrijeme relaksacije ( $T_1$ ) plina i lagane nafte je u pravilu dulje od vremena  $T_1$  za vodu (Coates et al. 1999).

TDA podaci prikupljaju se dvojnomo- $TW$  aktivacijom, gdje  $TW$  predstavlja vrijeme između prvog i zadnjeg radio-vala pod kutom  $180^\circ$  prilikom rotacije protona. Dvojna- $TW$  karotaža prikuplja dva NMR signala koristeći se dugim- $TW$  i kratkim- $TW$  s jednim zajedničkim  $TE$ , koji je ranije opisan kao minimalni razmak odjeka. U dvojnomo- $TW$  karotaži, za vrijeme kratkog- $TW$  samo se voda, odnosno jezgre vodika u vodi, može potpuno polarizirati, dok se za vrijeme dugog- $TW$  mogu polarizirati i voda i ugljikovodici. Dobiveni signali, tj. dugi i kratki- $TW$  odjeci su zbrojeni u cjeline koje se zatim oduzimaju, a dobivena razlika se pretvara u distribuciju vremena relaksacije  $T_2$  (Slika 3-1.) iz koje možemo odrediti poroznost. Ovakva obrada podataka naziva se analiza u vremenskom području jer se razlike signala računaju u običnoj vremenskoj domeni ( $t$ ), a ne u domeni vremena relaksacije. Tek u zadnjem koraku se razlika transformira u vrijeme  $T_2$ .

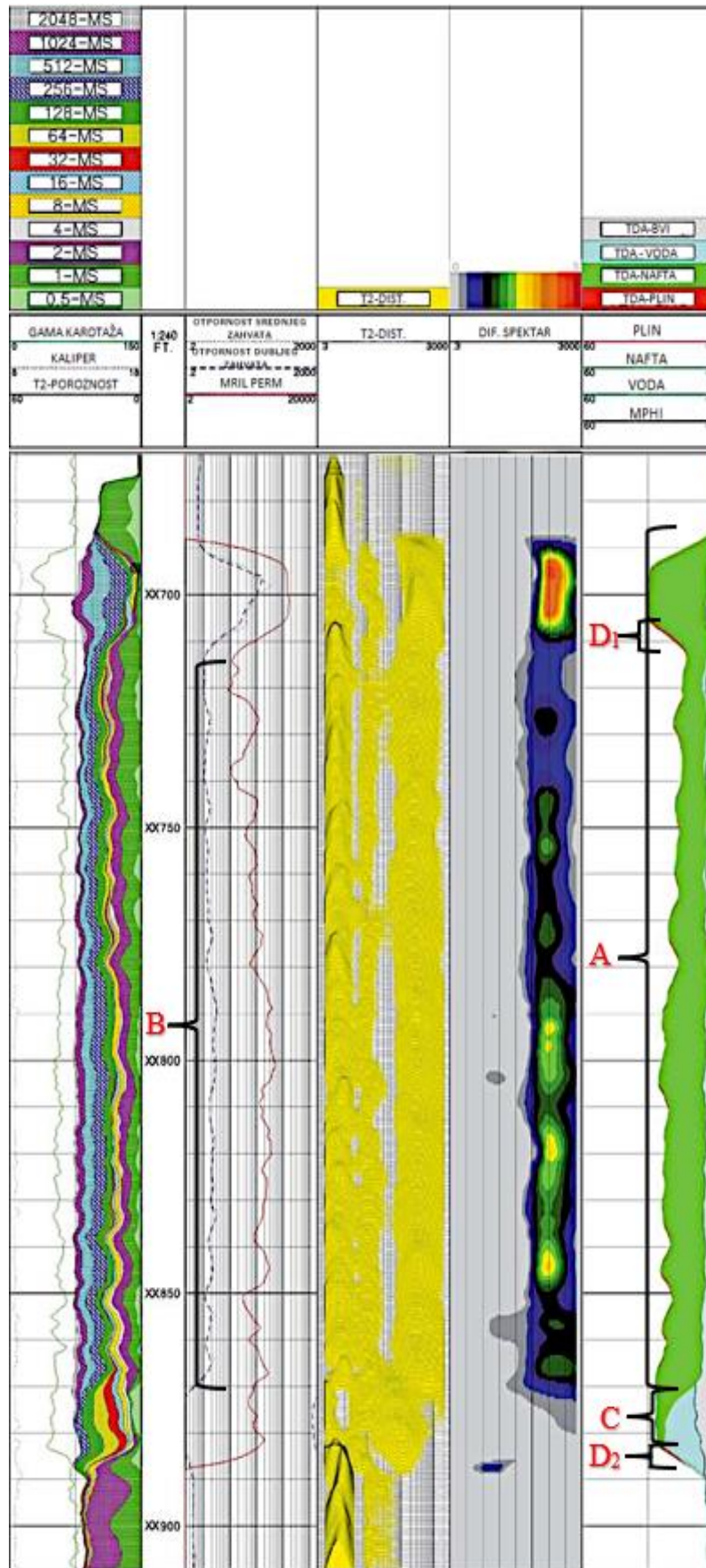


**Slika 3-1.** Analiza u vremenskom području (TDA) dvojnog-*TW* karotažom (Coates et al., 1999)

Kao što je ranije rečeno, koristeći taj model, samostalna analiza podataka u potpunosti prikazuje poroznost, propusnost i zasićenje fluidom što se može vidjeti u sljedećem primjeru (Slika 3-2.). Kolona 1 prikazuje krivulju dobivenom konvencionalnom gama-karotažom i podatke dugog-*TW*, pri čemu je  $T_2$  podijeljen u intervale (binove). Kolona 2 prikazuje podatke o propusnosti (*MRIL PERM*) i dvije krivulje otpornosti (*RES*). *MRIL PERM* je propusnost određena na temelju podataka dobivenih NMR mjerenjem korištenjem formula kao što je Coates-ova formula za propusnost. Kolona 3 prikazuje krivulje distribucije vremena relaksacije  $T_2$  dugog-*TW*. Kolona 4 prikazuje diferencijalni spektar (DSM) koji je razvijen kao ranija metoda korištenja dvojne-*TW* karotaže gdje su se signali odjeka prvo pretvarali u distribuciju  $T_2$ , a tek onda oduzimali. Kolona 5 sadrži podatke analize u vremenskom području te prikazuje efektivnu poroznost (*MPHI*), udio vezane vode (*BVI*), kao i zasićenje naftom, plinom te vodom.

Prema rezultatima analize u vremenskom području, na dubini označeno intervalom **A** vidljivo je da se nalazi vrlo dobra proizvodna zona bez vode, iako je otpornost označena intervalom **B** niska. Zona s vodom uočava se na dubini označenoj intervalom **C**. Na dubinama označenim sa **D<sub>1</sub>** i **D<sub>2</sub>** vidljive su jako male količine plina.





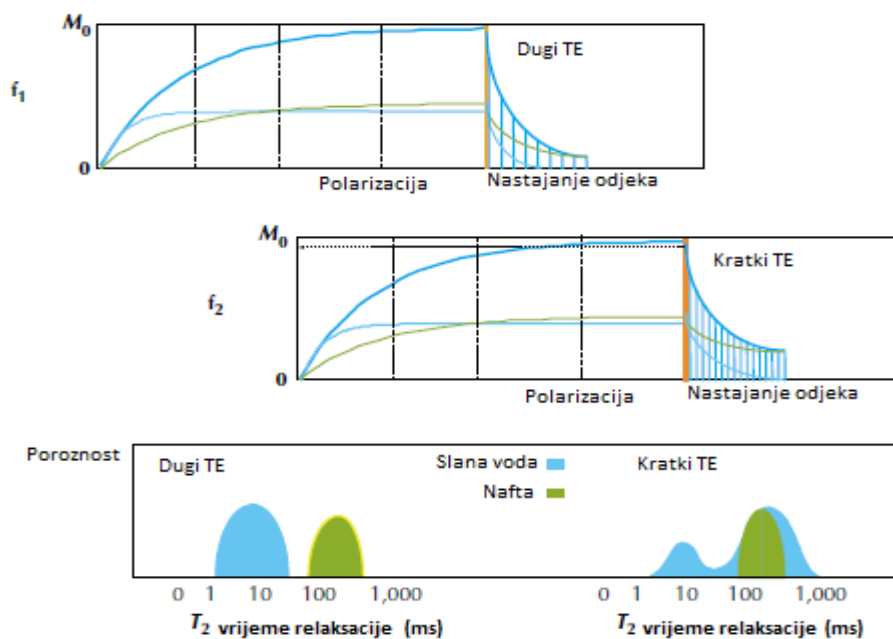
**Slika 3-2.** Grafički prikaz rezultata mjerenja primjenom modela analize u vremenskom području (Coates et al, 1999)

### 3.2. Analiza difuzije (DIFAN)

Analiza difuzije temelji se na kontrastu difuzije između fluida kako bi se odredila zasićenja naftom, plinom ili vodom. Difuzija je proces u tekućinama, plinovima ili krutim tvarima pri kojem molekule nasumično migriraju zbog svog toplinskog gibanja.

Prilikom mjerenja NMR karotažom difuzijsko vrijeme relaksacije  $T_{2d}$  ovisi o gradijentu magnetskog polja, žiromagnetnom omjeru jezgre vodika ( $\gamma$ ), koeficijentu difuzije ( $D_a$ ) i vremenu  $TE$  tj. vremenskom intervalu između uzastopnih radio-signala (Slika 2-5). Za analizu difuzije podaci NMR signala prikupljaju se putem dvojne- $TE$  aktivacije (Mardon et al., 1996). Dvojna- $TE$  karotaža snima dva NMR signala koristeći se dugim- $TE$  i kratkim- $TE$  intervalom sa jednim zajedničkim  $TW$  (vrijeme između prvog i zadnjeg radio-vala). Za potpunu polarizaciju protona, vrijeme  $TW$  mora biti barem 3 puta veće od maksimalnog longitudinalnog vremena relaksacije  $T_1$  svih fluida u porama. Tipični par vremenskih intervala  $TE$  je 1,2 i 4,8 ms. Dvojna- $TE$  aktivacija omogućuje primjenu principa mjerenja s obzirom na difuziju kako bi se voda razlikovala od nafte srednje viskoznosti. Nafta mora imati manji koeficijent difuzije ( $D_a$ ) od vode, a u praksi bi viskoznost nafte morala biti u rasponu od 0,0005 do 0,035 Pa·s. Usporedbom NMR signala odjeka dobivenih kratkim- $TE$  i dugim- $TE$ , signal nafte se razlikuje od signala vode.

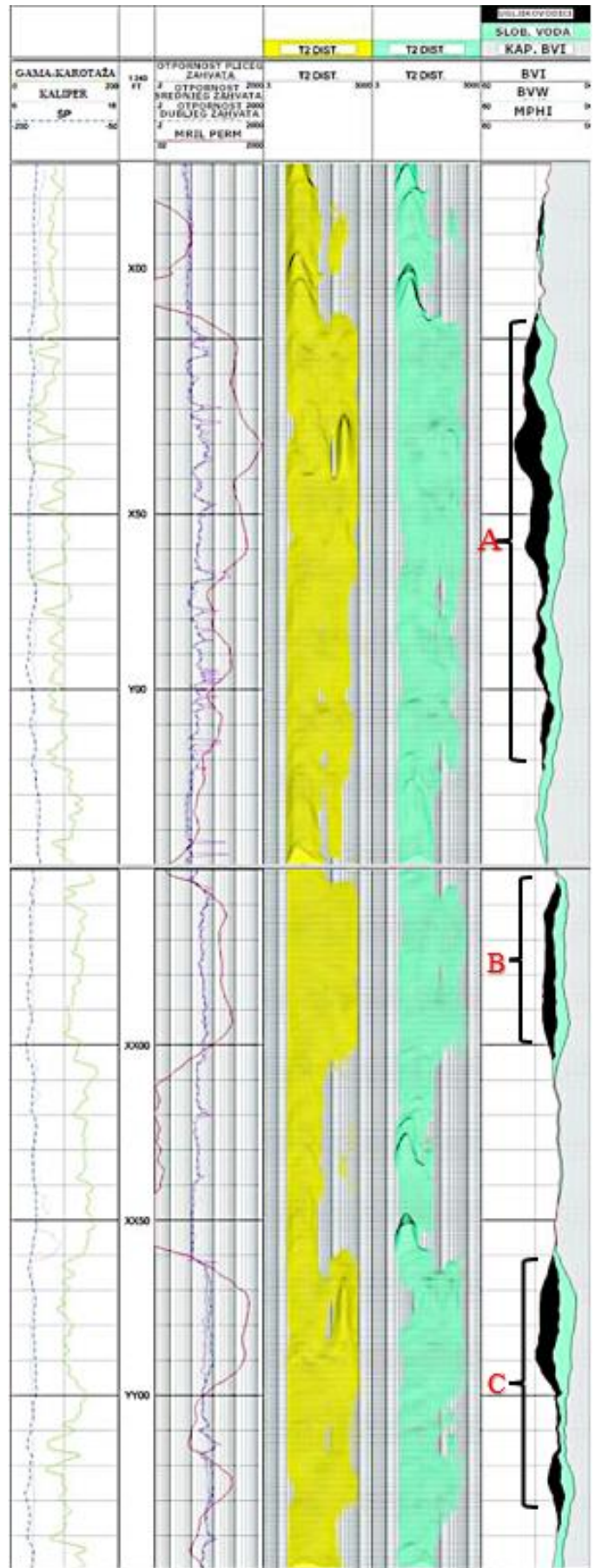
Slika 3-3 prikazuje model dvojne- $TE$  karotaže u kojem gornji i srednji odsječci prikazuju polarizaciju i nastajanje odjeka koristeći se modulom dvojne frekvencije ( $f_1$  i  $f_2$ ), jedna sa dugim- $TE$  i druga sa kratkim- $TE$  intervalom. Za dugi- $TE$  interval, smanjenje amplitude signala pri zasićenju vodom je puno brže od smanjenja signala amplitude srednje-viskozne nafte, te se signali mogu odvojiti. Za kratko- $TE$  mjerenje, krivulja distribucije transverzalnog vremena relaksacije  $T_2$  vode preklapa se dobrim dijelom  $T_2$  distribucije nafte. Donji odsječak prikazuje krivulje distribucije vremena relaksacije  $T_2$  i vode i nafte po kojima ih se može razlikovati.



**Slika 3-3.** Analiza difuzije (DIFAN) dvojnomo-*TE* karotažom (Coates et al., 1999)

U sljedećem primjeru (Slika 3-4.) može se primijetiti da podaci dobiveni dvojnomo-*TE* karotažom uključuju dva tipa distribucije vremena relaksacije  $T_2$  (prikazane žutom i plavom bojom). Ovo mjerenje sadrži rezultate dobivene primjenom modela analize difuzije. Pored toga efektivnu poroznost (*MPHI*) te udio vezane vode dobiveni pomoću oba NMR signala, kratkog-*TE* i dugog-*TE*, kao i propusnost (*MRIL PERM*). Kolona 1 prikazuje krivulju konvencionalne gama-karotaže, spontanog potencijala (*SP*) i kalipera. Kolona 2 prikazuje podatke električne otpornosti dobivene s tri lateralna zahvata (dubokim, srednjim i plitkim) te propusnost (*MRIL PERM*). Kolona 3 prikazuje distribuciju vremena  $T_2$  za dugi-*TE* interval, dok kolona 4 prikazuje distribuciju vremena  $T_2$  za kratki-*TE*. Posljednja kolona (5) prikazuje ključne podatke o raspodjeli fluida dobivene analizom difuzije.

Prema podacima korištenjem dvojne-*TE* aktivacije vidljivo je da su intervali dubina označeni sa **A**, **B** i **C** zone zasićenja ugljikovodicima, ali sa značajnim udjelom slobodne vode.



Slika 3-4. Grafički prikaz rezultata primjenom modela analize difuzije (Coates et al., 1999)

### 3.2.1. Metoda poboljšane difuzije (EDM)

Metodom poboljšane difuzije može se odrediti vrstu i količina nafte s viskoznostima u rasponu od 0,001 do 0,05 Pa·s. Koristeći razlike u difuziji određuju se različite vrste fluida (Akkurt et al., 1998). Korištenjem ispravno odabranih dugih- $TE$  vremena poboljšava se efekt difuzije prilikom prikupljanja podataka dobivenih iz signala odjeka, te se omogućuje razdvajanje vode i nafte na krivulji distribucije vremena relaksacije  $T_2$ .

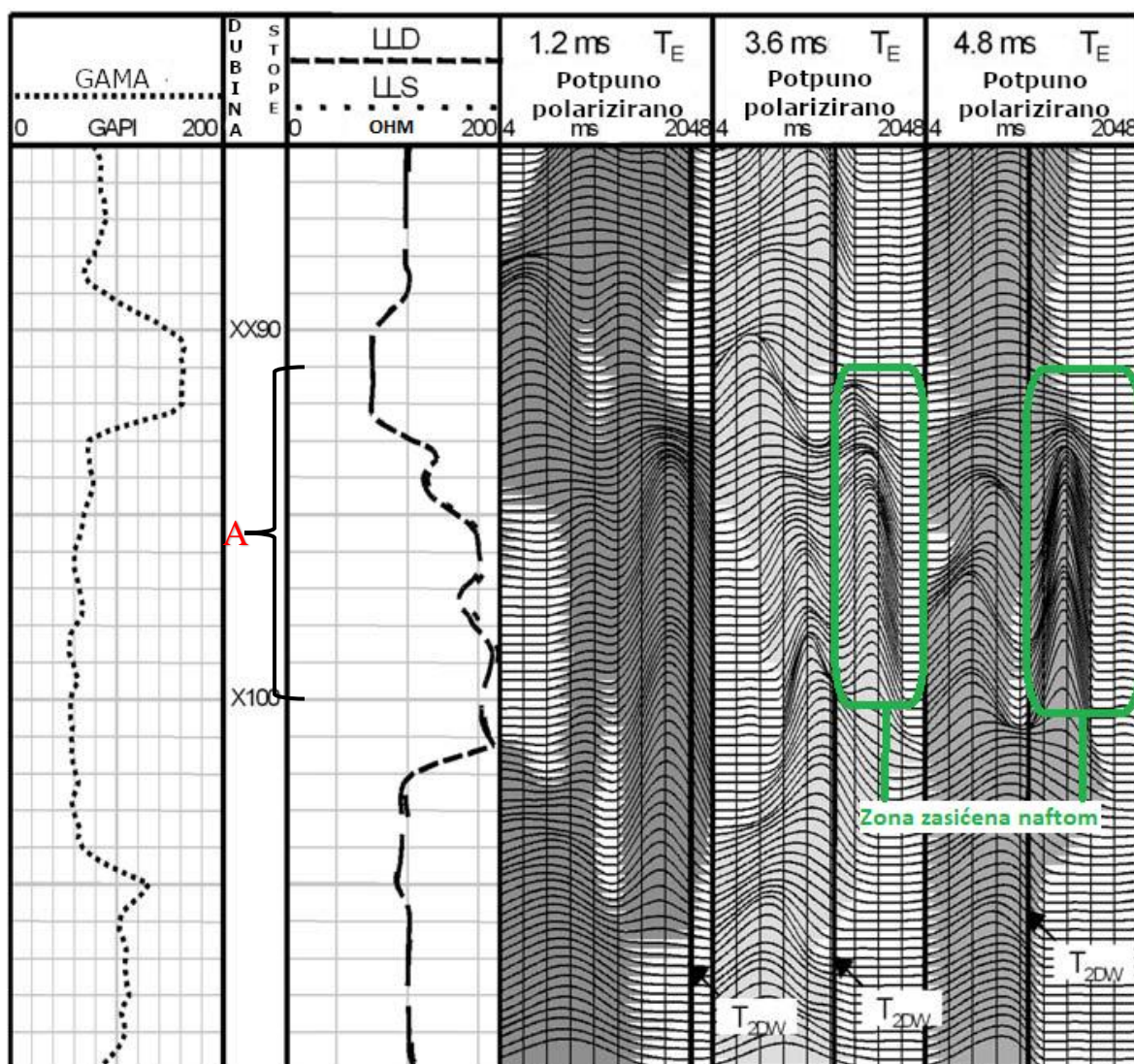
Metoda ovisi o NMR podacima nafte, a može koristiti NMR podatke dobivene sljedećim aktivacijama:

- standardna- $T_2$  karotaža sa dugim- $TE$
- dvojna- $TE$  karotaža sa jednim dugim- $TW$
- dvojna- $TW$  karotaža sa jednim dugim- $TE$ .

Ako je cilj EDM-a razlikovati proizvodnu zonu od neproizvodne koristi se jedno NMR mjerenje s dugim- $TW$  intervalom za potpunu polarizaciju i dugo- $TE$  vrijeme za poboljšanje difuzije, pa je dovoljno koristiti standardnu- $T_2$  karotažu s dugim- $TE$ . Ako je cilj EDM-a procijeniti količine fluida u proizvodnoj zoni, koristi se dvojna- $TE$  karotaža. Ako se očekuje da distribucija vremena relaksacije  $T_2$  neće biti dovoljno velika za razlikovanje vrijednosti vode i nafte, koristi se dvojna- $TW$  karotaža s jednim dugim  $TE$ , te se dobivaju podaci za analizu u vremenskom području (TDA).

Slika 3-5 prikazuje grafički prikaz podataka dobivenih metodom EDM. U kolonama 3, 4 i 5 prikazani su rezultati, odnosno krivulje distribucije vremena relaksacije  $T_2$  s vremenskim intervalima  $TE_3=1,2$  ms,  $TE_4=3,6$  ms i  $TE_5=4,8$  ms. U koloni 1 je krivulja prirodne gama-karotaže koja ukazuje na propusni interval (niske vrijednosti GR), a u koloni 2 su krivulje otpornosti izmjerene dvojnim laterologom (LLS i LLD; plitki i duboki zahvat). Povećane otpornosti ukazuju na zasićenje ugljikovodicima. U kolonama 3, 4 i 5 vertikalnom crnom linijom označene su granične vrijednosti  $T_{2DW}$ , odnosno granična vrijednost za vodu. To znači da se svaki signal s vremenom  $T_2$  većim od  $T_{2DW}$  može pripisati nafti. U kolonama 4 i 5 jasno je vidljiva zona zasićena naftom, koja se nalazi na dubini označenoj intervalom **A**. On odgovara velikim amplitudama na krivulji distribucije, desno od granične vrijednosti. U koloni 5 se može primijetiti naglašeniji kontakt vode i nafte zbog povećanog vremena  $TE$ .



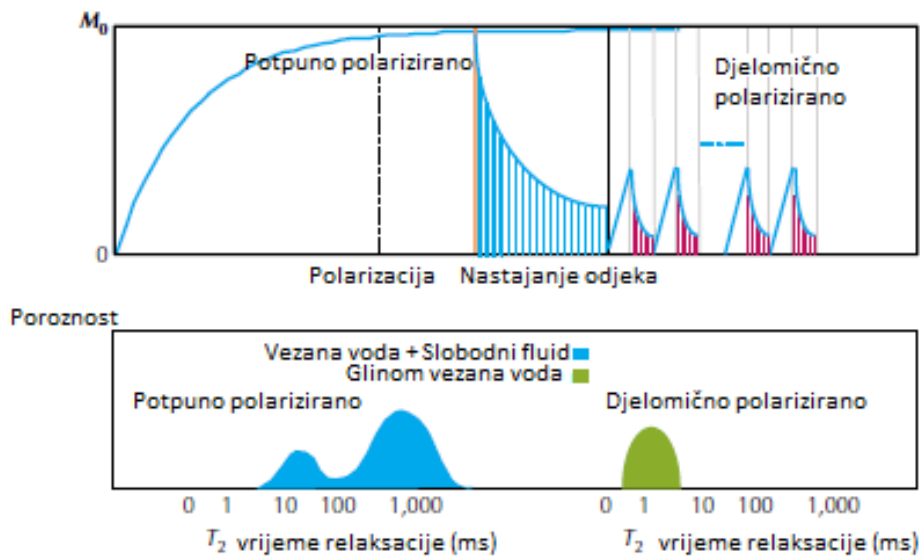


**Slika 3-5.** Grafički prikaz podataka dobivenih metodom poboljšane difuzije (Coates et al., 1999)

### 3.3. MRIAN metoda

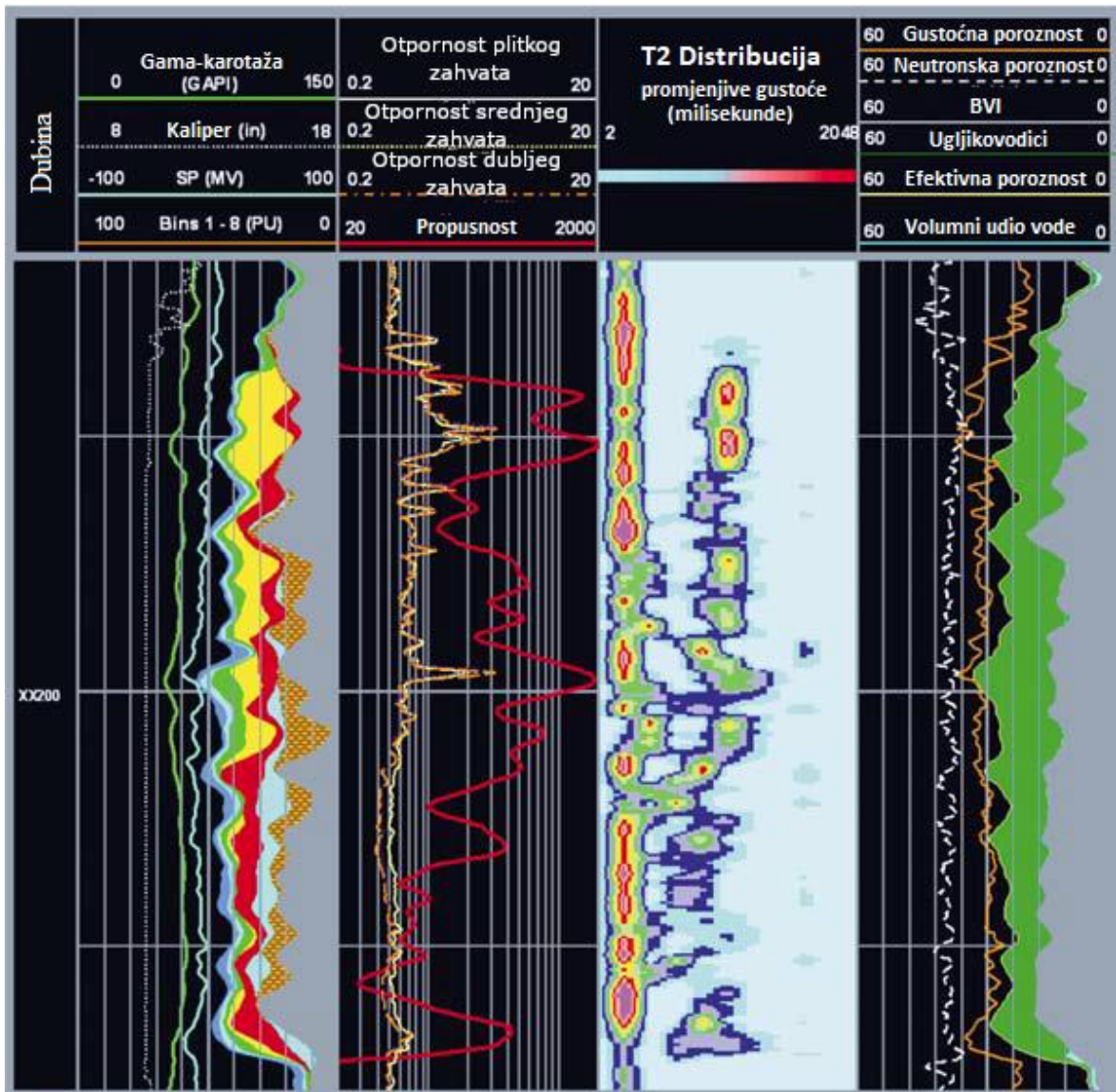
MRIAN (engl. *Magnetic Resonance Imaging Analysis*) je metoda koja kombinira podatke dobivene NMR mjerenjima i podatke karotaže otpornosti (Coates et al., 1994). MRIAN koristi *dual-water* model kako bi odredio volumen ležišnih fluida u netaknutoj zoni. Glavni parametri potrebni za obradu podataka MRIAN metodom su otpornost netaknute zone ( $R_t$ ), ukupna poroznost i zasićenje vezanom vodom. NMR podaci koriste se za dobivanje dva parametra potrebna u *dual-water* modelu, a to su poroznost glinovitih naslaga s vezanom vodom ( $MCWB$ ) i efektivna poroznost ( $MPHI$ ). Pri tome se NMR podaci dobivaju korištenjem karotaže za ukupnu poroznost, koja snima dvije skupine odjeka: potpuno polarizirane i djelomično polarizirane. Odjek u slučaju potpune polarizacije dobiva se

korištenjem dugih vremenskih intervala  $TW$  i  $TE$ . Odjek u slučaju djelomične polarizacije dobiva se korištenjem kratkih intervala  $TW$  (20 ms) i  $TE$  (0,6 ms). Pri tome se pretpostavlja da djelomično polarizirani odjek predstavlja signal vezane vode u glini. Kombiniranjem dvije distribucije vremena relaksacije  $T_2$  dobivene različitim polarizacijama, dobiva se kontinuirana raspodjela vremena  $T_2$  od 0,5 ms pa do 1 s, koja daje dobru procjenu ukupne poroznosti (Slika 3-6.).



**Slika 3-6.** Ukupna poroznost dobivena različitim polarizacijama (Coates et al., 1999)

Sljedeći primjer (Slika 3-7.) sadrži MRIAN interpretaciju kombiniranjem NMR podataka i podataka električne otpornosti u sloju pješčenjaka. Kolona 1 prikazuje krivulje prirodne gama-karotaže, promjera bušotine (kalipera), spontanog potencijala ( $SP$ ) i ukupnu poroznost dobivenu pomoću raspodjele  $T_2$  podijeljenu u osam grupa (binova). Kolona 2 prikazuje otpornost i propusnost izračunatu iz NMR mjerenja, pri čemu se otpornost smanjuje prema donjem dijelu intervala. Kolona 3 sadrži prikaz distribucije vremena relaksacije  $T_2$  u intervalu od 2 ms do 2048 ms, gdje crvena boja predstavlja najveću amplitudu. Kolona 4 prikazuje MRIAN analizu fluida u kojoj je kapilarno vezana voda ( $BVI$ ) označena sivom bojom, slobodna voda plavom te ugljikovodici zelenom bojom. Na grafičkom prikazu se jasno vidi da cijeli interval ne sadrži slobodnu vodu i proizvodit će samo naftu, što je kasnije i potvrđeno testiranjem.



**Slika 3-7.** Grafički prikaz kombinacije konvencionalnih metoda i NMR-karotaže (Coates et al., 1999)



#### 4. ZAKLJUČAK

NMR-karotaža predstavlja napredniju tehniku mjerenja svojstava i fluida kako bi se procijenile rezerve ugljikovodika. NMR-podaci dobivaju se mjerenjima koja se obavljaju sondama podešenim na magnetnu rezonantnu frekvenciju vodika kojeg ležišni fluidi sadrže. S obzirom na to kako je sonda podešena, postoje različiti principi mjerenja koji rezultiraju ključnim podatkom za daljnju interpretaciju mjerenja, a to je transverzalno vrijeme relaksacije  $T_2$ . Analiza podataka NMR-karotaže omogućava razlikovanje vrsta ležišnih fluida (nafta, voda i plin) na temelju njihovih različitih vremena relaksacije  $T_2$ . Iz dobivenih NMR podataka moguće je odrediti i poroznost ležišta neovisno o litologiji jer NMR-karotaža prepoznaje samo fluide u pornom prostoru, predvidjeti propusnost i proizvodne zone na temelju veličine pora, viskoznost te vrstu i količinu fluida u ležištu.

Interpretacijom NMR podataka dobivaju se osnovna ležišna svojstva za projektiranje i izradu bušotina, a dobiveni podaci su neophodni i kod modeliranja proizvodnog sustava bušotine, temeljem kojeg se prognozira buduća proizvodnja, a time i isplativost cjelokupnog sustava. Korištenjem NMR-karotaže u kombinaciji sa dodatnim karotažnim metodama, dobiveni podaci mogu dati precizniji uvid osnovnih ležišnih karakteristika.

## 5. LITERATURA

1. AKKURT, R., MARDON, D., GARDNER, J.S., MARCHALL, D.M., SOLANET, F., 1998. *Enhanced diffusion: expanding the range of NMR direct hydrocarbon-typing applications*. SPWLA 39th Annual Logging Symposium Transactions, SPWLA-1998-GG.
2. CHANDRA, R.Y., SURYA, S.Y., 2008. *Techniques in Exploration and Formation Evaluation for Gas Hydrates*. 7<sup>th</sup> International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, P-177
3. COATES, G.R., GARDNER, J.S., MILLER, D.L., 1994. *Applying pulse-echo NMR to shaly sand formation evaluation.*, SPWLA 35th Annual Logging Symposium Transactions, SPWLA-1994-B.
4. COATES, G.R., XIAO, L., PRAMMER, M.G., 1999. *NMR Logging, Principles and Applications*. Halliburton Energy Services, Houston.
5. FREEDMAN, R., HEATON, N., 2004. *Fluid Characterization using Nuclear Magnetic Resonance Logging*. *Petrophysics*, 45(3), str. 241-250.
6. FREEDMAN, R., 2005. *Advances in NMR Logging*. *Journal of Petroleum Technology*, 58(1), str. 60-66.
7. MARDON, D., PRAMMER, M.G., COATES, G.R., 1996. *Characterization of light hydrocarbon reservoirs by gradient-NMR well logging*. *Magnetic Resonance Imaging*, 14, str. 769–777.
8. OREŠKOVIĆ, J., 2019. *Bušotinska karotaža : Metoda nuklearne magnetske rezonancije (NMR)*, nastavni materijali ak.godine 2019./2020.

## IZJAVA

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

*Marin Jelusić*

---



KLASA: 602-01/24-01/109  
URBROJ: 251-70-12-24-2  
U Zagrebu, 11. 9. 2024.

**Marin Jelušić, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/109, URBROJ: 251-70-12-24-1 od 26.06.2024. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### PRIMJENA NMR-KAROTAŽE ZA PROCJENU POROZNOSTI I IDENTIFIKACIJU LEŽIŠNIH FLUIDA

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)