

# Zvučna karotaža simulirana korištenjem metode multilinearne regresije

---

**Kovačić, Jurica**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:723906>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-25**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**ZVUČNA KAROTAŽA SIMULIRANA KORIŠTENJEM METODE  
MULTILINEARNE REGRESIJE**

Završni rad

Jurica Kovačić

N4503

Zagreb, 2023.

## ZVUČNA KAROTAŽA SIMULIRANA KORIŠTENJEM METODE MULTILINEARNE REGRESIJE

Jurica Kovačić

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

### Sažetak

Zvučna karotažna mjerenja daju vrlo bitne podatke potrebne za karakterizaciju nabušenih stijena, kao i podatke potrebne za povezivanje bušotinskih mjerenja i površinskih seizmičkih mjerenja. U područjima gdje su uglavnom stare bušotine najčešće je zvučna karotaža izvedena samo na kraćim interesantnim intervalima ili nije izvedena uopće. Uz pomoć softvera *Interactive Petrophysics*, koji sadrži modul *Machine Learning* moguće je predvidjeti (simulirati) karotažne krivulje čak i ako one nisu u stvarnosti izmjerene. U ovom radu su prednosti softvera korištene za predviđanje krivulja zvučne karotaže uz pomoć provedenih drugih karotažnih mjerenja (neutronske karotaže, karotaže gustoće, kalipera, karotaže prirodne radioaktivnosti i karotaže otpornosti). Zvučna karotaža predviđana je metodom multilinearne regresije na primjeru jedne bušotine na području Dravske depresije te je uspoređena s krivuljom izmjerene zvučne karotaže. Cilj rada je bio odrediti koji ulazni karotažni podaci daju simuliranu zvučnu karotažu koja se najbolje podudara s mjerenom krivuljom zvučne karotaže. Dobiveni rezultati se relativno dobro podudaraju sa stvarnim krivuljama osim kada se kao ulazni podaci koriste samo različite krivulje otpornosti.

Ključne riječi: zvučna karotaža, multilinearne regresija, Interactive Petrophysics  
Završni rad sadrži: 21 stranicu, 13 slika, 8 referenci  
Jezik izvornika: Hrvatski  
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb  
Mentori: Dr. sc. Jasna Orešković, izvanredna profesorica RGNF-a  
Ocjenjivači: Dr. sc. Jasna Orešković, izvanredna profesorica RGNF-a  
Dr. sc. Sonja Koščak Kolin, docentica RGNF-a  
Dr. sc. Borivoje Pašić, izvanredni profesor RGNF-a

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	II
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA.....	III
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ZVUČNA KAROTAŽA.....</b>	<b>2</b>
<b>3. KAROTAŽNA MJERENJA KORIŠTENA ZA SIMULACIJU KRIVULJE ZVUČNE KAROTAŽE .....</b>	<b>6</b>
3.1. Karotaža električne otpornosti .....	6
3.2. Karotaža prirodne radioaktivnosti .....	7
3.3. Neutronska karotaža .....	7
3.4. Karotaža gustoće.....	7
3.5. Ostale metode karotažnih mjerenja .....	8
<b>4. SIMULACIJA METODOM MULTILINEARNE REGRESIJE .....</b>	<b>9</b>
4.1. Metoda linearne regresije .....	9
4.2. Prikaz rezultata .....	10
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>20</b>
<b>6. LITERATURA .....</b>	<b>21</b>

## POPIS SLIKA

<u>Slika 2-1.</u> Prikaz brzina longitudinalnih i transverzalnih valova u različitim stijenama.....	3
<u>Slika 2-2.</u> Rasprostiranje glavnog vala u bušotini .....	4
<u>Slika 2-3.</u> Prikaz dijagrama zvučne karotaže za bušotinu B-1 .....	5
<u>Slika 4-1.</u> Primjer grafičkog prikaza linearne regresije .....	11
<u>Slika 4-2.</u> Izbornik modula multilinearne regresije.....	12
<u>Slika 4-3.</u> Prozor <i>Create Regression Model</i> unutar modula <i>Multi-Linear Regression</i> .....	13
<u>Slika 4-4.</u> Prozor <i>Run Model</i> unutar modula <i>Multi-Linear Regression</i> .....	14
<u>Slika 4-5.</u> Prikaz <i>Multi-Well Plot-a</i> te simulirane zvučne karotaže .....	14
<u>Slika 4-6.</u> Prikaz koeficijenata ulaznih podataka i korelacijskog koeficijenta $R^2$ .....	16
<u>Slika 4-7.</u> Podudaranje mjerene i simulirane zvučne karotaže u ovisnosti o sljedećim ulaznim podacima (CAL,DEN,GR,CN).....	17
<u>Slika 4-8.</u> Prikaz korelacijskog koeficijenta i koeficijenata ulaznih podataka.....	18
<u>Slika 4-9.</u> Prikaz simulirane i mjerene zvučne karotaže u ovisnosti s odabranim ulaznim podacima (RFOC,RILD,RILM).....	19
<u>Slika 4-10.</u> Prikaz mjerene zvučne karotaže i simuliranih zvučnih karotaža.....	20

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>AC</i>	$\mu\text{s/m}$	zvučna karotaža
<i>CN</i>	-	neutronska karotaža
<i>DEN</i>	$\text{kg/m}^3$	karotaža gustoće
<i>CAL</i>	mm	kaliper
<i>GR</i>	GAPI	karotaža prirodne radioaktivnosti
<i>RILD</i>	$\Omega\text{m}$	električna otpornost mjerena sondom dubokog zahvata
<i>RILM</i>	$\Omega\text{m}$	električna otpornost mjerena sondom srednjeg zahvata
<i>SP</i>	mV	spontani potencijal
<i>RFOC</i>	$\Omega\text{m}$	fokusirana otpornost
<i>P</i>	-	longitudinalni val
<i>S</i>	-	transverzalni val
<i>v</i>	m/s	brzina
$\Delta t$	$\mu\text{s/m}$	intervalno vrijeme
$\Delta t_{ma}$	$\mu\text{s/m}$	vrijeme prolaska vala kroz čvrsti dio stijene
$\Delta t_f$	$\mu\text{s/m}$	vrijeme prolaska vala kroz fluid u porama stijene
$\Phi$	-	poroznost
$R^2$	-	korelacijski koeficijent, mjera predviđanja točnosti korelacije

## 1. UVOD

Bušotinska karotaža način je dobivanja raznih podataka o bušotini, te geološkim i petrofizikalnim svojstvima izbušenih stijena. Najčešće u tu svrhu možemo dobiti podatke o električnoj otpornosti, gustoći, brzini rasprostiranja seizmičkih valova, temperaturi, promjeru bušotine i ostalim. Krajnji cilj istraživanja je odrediti postoji li ležište ugljikovodika te ako da na kojoj je dubini i kojeg je volumena. Za to su nam potrebni podaci o vrsti stijena, poroznosti, propusnosti, vrsti i volumenu fluida te zasićenju određene stijene fluidima, a sve te podatke dobivamo karotažnim mjerenjima. Bušotinska karotaža izvodi se spuštanjem, najčešće nekoliko instrumenata zajedno na dno kanala bušotine te njihovim podizanjem na površinu uz bilježenje podataka. Može se izvoditi tijekom bušenja, no najčešće se izvodi nakon bušenja određene kolone kanala bušotine. Fizikalna veličina koju mjerimo registrira se kontinuirano duž cijelog kanala bušotine i prikazuje pomoću dijagrama.

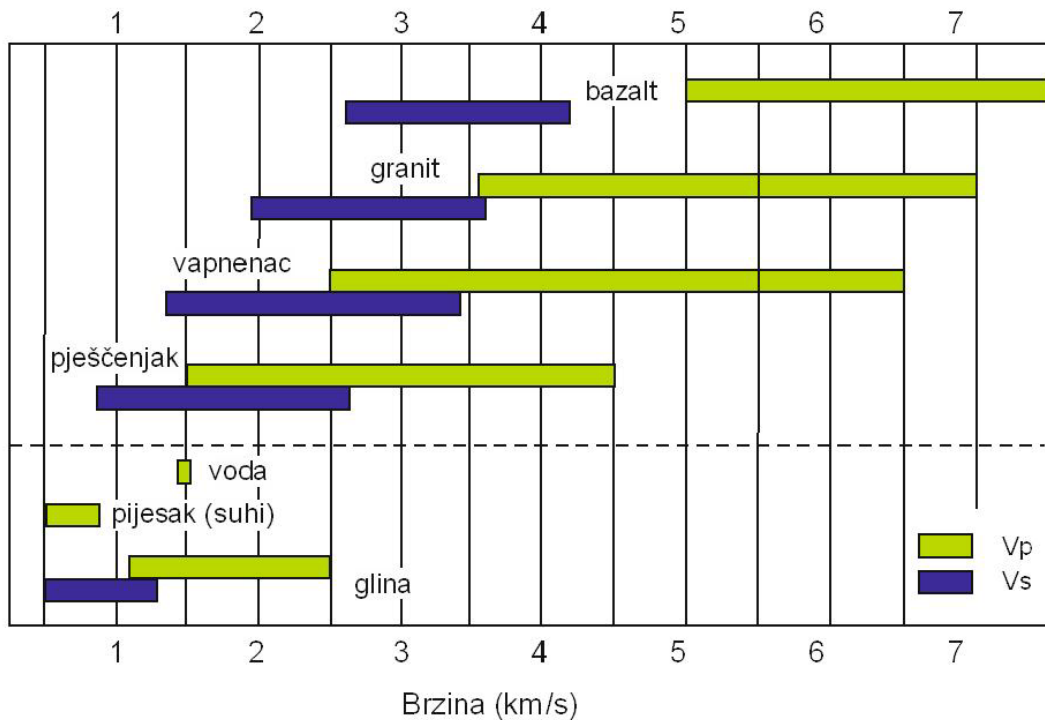
Metode karotažnih mjerenja mogu biti električne, radioaktivne, elektromagnetske i zvučne. Razlike određenih metoda najčešće su vrste sonde koje se koriste u istraživanjima, ali i sam način dobivanja podataka. Zvučna karotaža bazira se na mjerenju vremena prolaska elastičnog (zvučnog) vala između prijemnika i odašiljača na sondi. Val se najprije rasprostire kroz fluid određenom brzinom, a zatim kroz stijenu većom brzinom. Brzina rasprostiranja tog vala ovisi o poroznosti i sastavu stijene.

Zvučna karotaža primjenjuje se za određivanje poroznosti, procjenu litologije, procjenu slojnog tlaka te korelaciju s površinskim seizmičkim podacima. Često nam nisu dostupni podaci o zvučnoj karotaži duž nekog segmenta kanala bušotine ili čak duž cijelog kanala bušotine. U takvim slučajevima moguće ju je simulirati pomoću karotažnih podataka koji su nam dostupni. Pri tome se koriste razne tehnike, odnosno statističke metode. U ovom radu simulirat će se zvučna karotaža pomoću metode linearne regresije, a pri tome će se koristiti druga karotažna mjerenja, kao što su karotaža gustoće i prirodne radioaktivnosti, karotaže otpornosti, neutronska karotaža i promjer bušotine (kaliper).

## 2. ZVUČNA KAROTAŽA

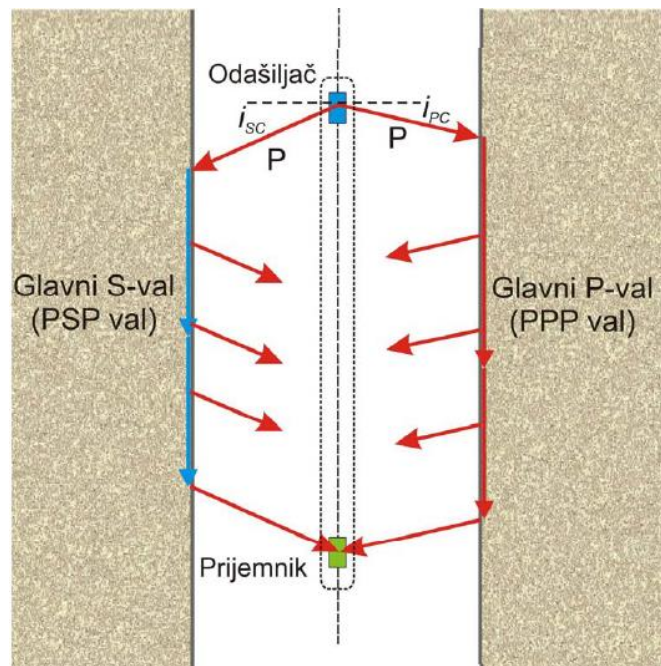
Zvučnom karotažom mjeri se vrijeme koje je potrebno elastičnom valu da prođe put između odašiljača i prijemnika na sondi. To vrijeme nazivamo intervalnim vremenom. Temelji se na različitim brzinama vala kroz fluid i stijenu. Elastični val iz odašiljača putuje većom brzinom kroz stijenu nego kroz fluid u bušotini. Brzina kojom će val prolaziti kroz matriks stijene ovisi o poroznosti, kompakciji i sastavu stijene. Povećanje prolaznog vremena elastičnog vala kroz stijenu može ukazivati na sloj bogat ugljikovodicima (Ala, 2016). Kombinacijom zvučne karotaže i ostalih mjerenja povećavamo točnost i preciznost dobivenih podataka, kao što su poroznost, propusnost i zasićenje ugljikovodicima, stoga se često zajedno s ovom metodom koriste i električna otpornost stijene, gustoća stijene te prirodna radioaktivnost. Osnovna namjena je odrediti poroznost iz mjerenog vremena putovanja vala. Osim toga, koristi se za korelaciju s površinskim seizmičkim podacima, izračunavanje akustičnih impedancija te identificiranje zona povišenog tlaka. Dvije su vrste elastičnih valova: longitudinalni (P) i transverzalni (S). Kod longitudinalnih valova čestice sredstva kroz koje se val širi titraju u smjeru prostiranja vala te se rasprostiru većom brzinom od ostalih valova. Kod transverzalnih valova čestice sredstva kroz koje se val širi osciliraju okomito na pravac prostiranja vala. Obje vrste valova uglavnom ovise o modulima elastičnosti i gustoći tvari kroz koje se rasprostiru. Bitno je još naglasiti da je brzina longitudinalnih valova veća od brzine transverzalnih te da se u tekućinama i plinovima transverzalni valovi uopće ne šire (Slika 2-1).





**Slika 2-1.** Brzine longitudinalnih i transverzalnih valova u različitim stijenama (Orešković, 2017)

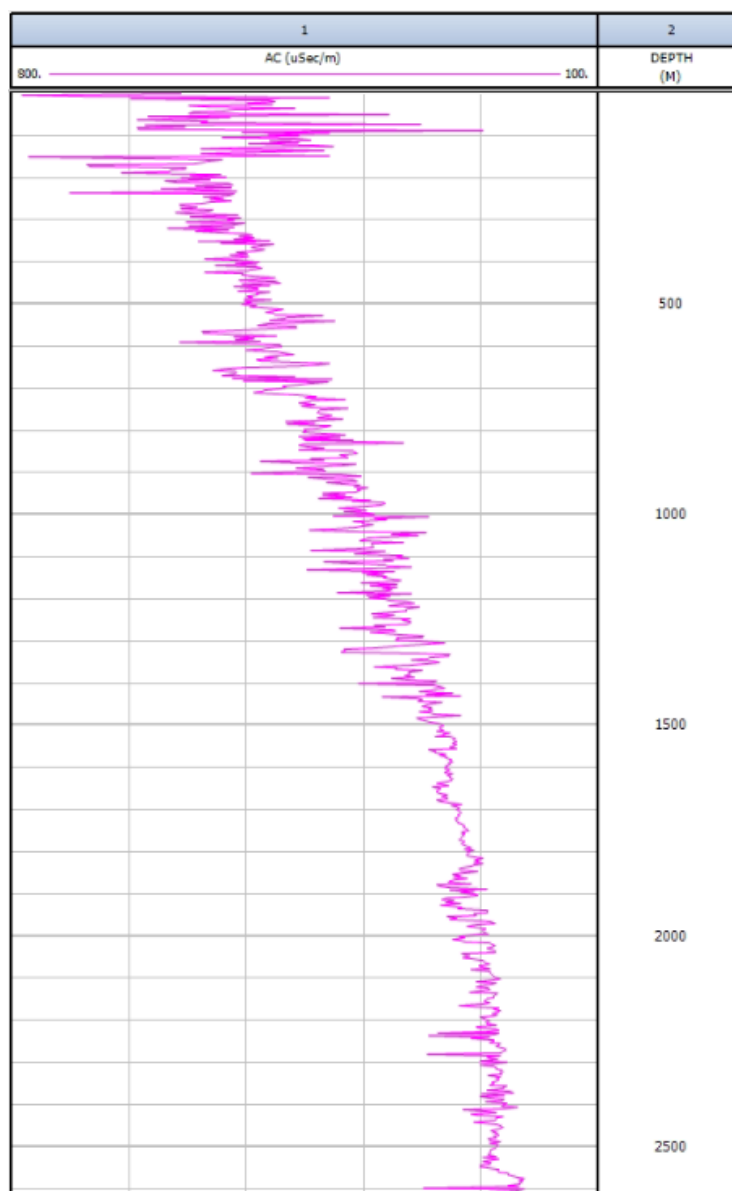
Pri dolasku elastičnog vala do granice dvaju sredstava s različitim brzinama, val se djelomično lomi, a djelomično odbija. Pritom vrijedi Snellov zakon koji tumači da će se valna zraka odbiti pod kutom jednakom upadnom kutu. Za lomljeni val vrijedi da će se valna zraka lomiti od okomice ukoliko je brzina u drugom sloju veća i obratno. Val koji se lomi pod kutom od  $90^\circ$  prostire se granicom dvaju sredstava i nazivamo ga glavnim valom jer dolazi do prijemnika većom brzinom od vala koji se direktno rasprostire kroz isplaku (Slika 2-2). Najmanja udaljenost kod koje lomljeni val stiže do prijemnika prije direktnog vala naziva se kritična udaljenost.



**Slika 2-2.** Rasprostiranje glavnog vala u bušotini (Orešković, 2017)

Glavni dijelovi sonde za zvučnu karotažu su odašiljač (engl. transmitter) i prijemnik (engl. receiver). Oba su piezoelektrična. Obično ovakve sonde imaju mali promjer mjerenja koji ovisi o valnoj duljini i udaljenosti između odašiljača i prijemnika. Ta udaljenost ne smije biti prevelika kako signal na prijemniku ne bi bio preslab, ali niti premala tj. ne smije biti manja od kritične udaljenosti. Sonde za zvučnu karotažu sastoje se od nekoliko odašiljača zvučnih valova i nekoliko prijemnika. Sonda kompenzirane zvučne karotaže ima dva odašiljača i četiri prijemnika, te daje dobre rezultate i ukoliko se mijenja promjer bušotine ili ako se sonda ne nalazi u osi bušotine, dok se sonda s velikim razmakom između odašiljača i prijemnika koristi ukoliko nam je potreban veći radijus mjerenja.

Vrlo je bitno kod ovakvog mjerenja znati očitati dijagram zvučne karotaže. Taj dijagram pokazuje nam intervalno vrijeme prolaska vala ( $\Delta t$ ) ili sporost, tj. inverznu vrijednost brzine izraženu u mikrosekundama po metru ( $\mu\text{s/m}$ ). Rezultat mjerenja prikazuje se najčešće tako da vrijednosti opadaju s lijeva na desno, odnosno pad intervalnog vremena odgovara porastu brzine što se može vidjeti na Slici 2-3.



**Slika 2-3.** Dijagram zvučne karotaže za bušotinu B-1

Zvučnom karotažom može se odrediti poroznost probušene stijene. Za računanje najčešće koristimo Wyllievu formulu (Schwaetzer, 1958.) za koju je potrebno poznavati podatke o intervalnom vremenu ( $\Delta t$ ), vrijeme prolaska vala kroz čvrsti dio stijene ( $\Delta t_{ma}$ ) i vrijeme prolaska vala kroz fluid u porama stijene ( $\Delta t_f$ ). Tada poroznost ( $\phi$ ) računamo sljedećim izrazom :

$$f = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}}$$

Kod računanja poroznosti podaci o intervalnom vremenu i vremenu prolaska vala kroz čvrsti dio stijene određuju se ili laboratorijskim mjerenjima ili se uzimaju gotovi podaci iz literature. Kako bi se točno odredila poroznost neke stijene često se uzimaju podaci i ostalih karotažnih mjerenja kao što su karotaža gustoće (DEN) ili neutronska karotaža (CN) (Orešković, 2017).

### **3. KAROTAŽNA MJERENJA KORIŠTENA ZA SIMULACIJU KRIVULJE ZVUČNE KAROTAŽE**

Određena petrofizikalna svojstva stijena mogu se odrediti uz pomoć više karotažnih metoda. Tako, na primjer, poroznost možemo odrediti uz pomoć karotaže gustoće, neutronske karotaže ili zvučne karotaže te je moguće da će nam svaka od tih metoda dati nešto drugačije rezultate. Upravo je iz tog razloga potrebno mjeriti barem dvama metodama, kako bi na kraju dobili što točniji rezultat. Stoga nam problem može predstavljati ukoliko jednu od tih metoda nismo u mogućnosti koristiti. Tu problematiku može se riješiti predviđanjem podataka zvučne karotaže uz pomoć ostalih mjerenja čije rezultate znamo. S takvim problemom bavi se i ovaj rad, gdje se zvučna karotaža predviđa uz pomoć neutronske karotaže (CN), karotaže gustoće (DEN), kalipera (CAL), karotaže prirodne radioaktivnosti (GR), električne otpornosti mjerene sondom dubokog zahvata (RILD), električne otpornosti mjerene sondom srednjeg zahvata (RILM) i laterologom (RFOC), te spontanog potencijala (SP). Kroz sljedeća poglavlja поближе će se objasniti svaka od prethodno navedenih metoda.

#### **3.1. Karotaža električne otpornosti**

U okolini kanala bušotine nalaze se različiti slojevi koji se razlikuju po električnoj otpornosti i zasićenju. Raspodjela električne otpornosti ovisi o litološkom sastavu stijene, ali je različita je u slojevima zasićenim vodom te slojevima zasićenim ugljikovodicima. Naznaka pojave ugljikovodika može biti porast otpornosti u netaknutoj zoni. Od unutrašnjosti kanala bušotine prema van zone se kreću od : isplake u kanalu bušotine, isprane zone, prijelazne zone i netaknute zone. Sonde za elektrokarotažu sastoje se obično od četiri elektrode. Sonde mogu biti razne: klasične (normalna i inverzna), induktivne sonde, mikrosonde i laterolozi. Normalna sonda mjeri razliku potencijala, a za razliku od nje inverzna sonda mjeri gradijent potencijala na udaljenosti od izvora. Osim po načinu mjerenja, ove dvije sonde razlikuju se i po razmještanju elektroda. Ovisno o razmaku među elektrodama definiramo dubinu prodiranja sonde. Tako najčešće razlikujemo dvije vrste normalnih sondi: velika normala (duljina 64") i mala normala (duljina 16"). Unatoč tome što mala normala ima manji dubinski zahvat, preciznija je pri određivanju granica slojeva dok velika normala zbog većeg dubinskog zahvata mjeri otpornost netaknute zone (Simpson, 2017). Osim normalnih i inverznih sondi, često se prilikom određivanja električne otpornosti koriste mikrosonde koja se koriste za još preciznija istraživanja na sedimentima tankih slojevitosti. Dvije najraširenije mikrosonde su mikrolog i mikrolaterolog za čije je korištenje potrebno čvrsto prijanjanje uz stijenu kanala bušotine što se postiže papučom, sustavom poluga i opruga koje se stišću i razvlače ovisno o promjeru

kanala bušotine (Šumanovac, 2012). Jedno od električnih mjerenja je mjerenje spontanog potencijala (prikazuje razliku potencijala između dvije elektrode, jedne na površini i druge spuštene u bušotinu). Dijagram spontanog potencijala koristi se za određivanje granica između propusnih i nepropusnih slojeva.

### **3.2. Karotaža prirodne radioaktivnosti**

Glavni izvori radioaktivnosti u stijenama su izotopi torija, urana i kalija. Najzastupljeniji je izotop kalija i to u glinama, laporima i šejlovima koji se ističu povećanom radioaktivnošću. Iz dijagrama karotaže prirodne radioaktivnosti možemo očitati podatke uz pomoću kojih odjeljujemo nepropusne (visokoradioaktivne) od propusnih (niskoradioaktivnih) naslaga. Također se dobivaju podaci o sadržaju gline u propusnim stijenama. Sonde za ovu vrstu karotaže sastoje se od detektora gama-zračenja, najčešće scintilacijskog brojača ili Geiger-Müllerovog brojača.

### **3.3. Neutronska karotaža**

Iz izvora na sondi dolazi do bombardiranja stijene brzim neutronima, koji u reakciji s atomima u stijeni gube energiju i pri tome usporavaju. Usporavaju sve dok im se energija ne smanji do one razine koju imaju atomi u stijeni. Ovi, takozvani termalni neutroni, nadalje gube energiju sve dok ne budu uhvaćeni jezgrom i pri tome emitiraju gama-zračenje. Ovim mjerenjima prvotno se određivala poroznost, no danas se koristi za procjenu vodikovog indeksa. Sonda za neutronska karotaža se sastoji od izvora neutrona (americij-berilija ili plutonij-berilija) te detektora. Zbog utjecaja isplake u bušotini na usporenje emitiranih neutrona, sonda mora biti pritisnuta uz stijenske kanala bušotine. Često se u praksi, kombinira zajedno s karotažom gustoće (Bassiouni, 1994).

### **3.4. Karotaža gustoće**

Izvorom gama-zraka bombardira se stijena te se mjeri apsorpcija i raspršenje zračenja. Sonda ima jedan ili više detektora zračenja i usmjereni izvor gama-fotona. Izvor zračenja nalazi se na papučici koja je pritisnuta uz stijenkicu kanala bušotine. Kao izvor se koriste kobalt-60 ( $Co^{60}$ ) ili cezij-137 ( $Cs^{137}$ ). Gama-zrake su emitirane u stijenu, gdje se jedan dio odbije i rasprši, a drugi odbije i registrira na detektoru. Gama-zrake također prolaskom kroz stijenu gube energiju (prigušuju se). Ovim načinom mjerenja, uz kombinaciju s ostalima, dobivaju se podaci o gustoći stijene iz koje se kasnije izračunava poroznost.

### **3.5. Ostale metode karotažnih mjerenja**

Za dobivanje raznih podataka o stanju u kanalu bušotine koriste se još neke, dosad ne spomenute metode, a to su: karotaža promjera bušotine, karotaža temperature, karotaža kvalitete cementacije, snimanje stijenke bušotine i karotaža devijacije bušotine.

Promjer bušotine dobiva se mjerenjem pomoću kalipera. Konvencionalni kaliper obično se sastoji od tri ili četiri mehaničke poluge koje su konstantno u kontaktu sa stjenkama kanala bušotine. Dolaskom kalipera na pukotinu u stijenu, mehanička poluga se širi i prikazuje promjenu na dijagramu. Promjer bušotine potrebno je konstantno pratiti kako bi znali koliko nam je istrošeno dlijeto, ali i jer tako možemo odrediti u kakvim se naslagama trenutno nalazimo tijekom bušenja.

Kod karotaže temperature, mjerenja se obavljaju uvijek na dnu bušotine i intervalno prema vrhu kanala. Instrumenti za mjerenje su termistor i jednostavan maksimalni termometar. Mjerenjem temperature u bušotini zapravo mjerimo temperaturu isplake u bušotini. Svrha je određivanje zona loše cementacije u bušotini, kavernoznih mjesta u stijenama, mjesta gubljenja isplake te mjesta pojave plina u bušotini.

## 4. SIMULACIJA METODOM MULTILINEARNE REGRESIJE

Linearna regresija jedna je od geostatičkih metoda koja se u istraživanju ležišta ugljikovodika koristi od kraja 20. stoljeća, a različite geostatističke metode usavršavaju se i danas. Omogućavaju povezivanje različitih poznatih varijabli i na taj način daljnje razvijanje modela o istraživanom području. U njihovu svrhu koriste se razne korelacije, programi i baze podataka koje omogućavaju napraviti model sa što više različitih vrsta podataka kako bi mogli opisati istraživano područje uz što manju pogrešku.

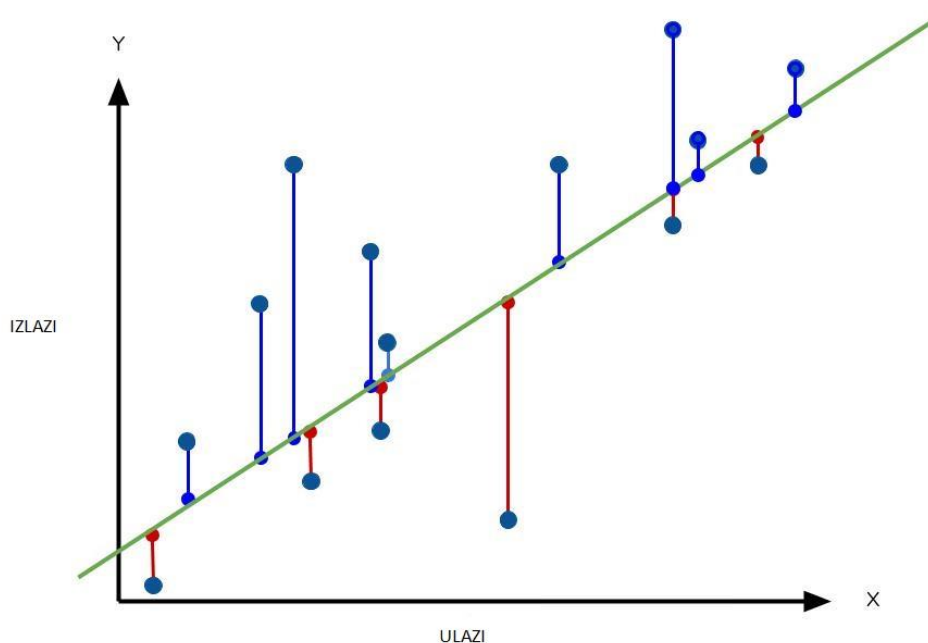
Kao predmet ovog istraživanja odabrana je bušotina B-1 na području plinskog polja u Podravini. Uz pomoć raznih karotažnih podataka u toj bušotini simulirana je krivulja zvučne karotaže. Simulacija je izvedena metodom multilinearne regresije ali na više načina, tj. korištenjem različitih kombinacija ulaznih podataka. Tako dobivene simulirane krivulje su zatim uspoređene s mjerenom krivuljom, kako bi se utvrdilo koji ulazni podaci daju najpouzdanije rezultate.

### 4.1. Metoda linearne regresije

Linearna regresija ili interpolacija matematički je postupak koji prikazuje međusobnu ovisnost jedne varijable o jednoj nezavisnoj varijabli. U slučaju kada postoji neka zavisnost (korelacija) varijabli možemo ju istražiti regresijskim analizama. Regresijska analiza podrazumijeva pronalaženje funkcije (modela) koja opisuje odnos između jedne ili više neovisnih varijabli te njihove povezanosti s traženom ovisnom varijablom (Benšić, Šuvak, 2013). Regresija se najčešće koristi za modele predviđanja gdje je tražena ovisna varijabla kontinuirana. Regresijska analiza je *linearna* ako se radi o jednakom broju neovisnih i ovisnih varijabli. Kada jedna varijabla zavisi o većem broju drugih nezavisnih varijabli govorimo o *multilinearnoj* regresiji. I linearna i multilinearne regresije baziraju se na metodi srednje kvadratne pogreške, gdje je cilj smanjiti kvadrate udaljenosti između pravca regresije i mjerenih podataka (Slika 4-1). Dobiveni model možemo tada koristiti za predviđanje podataka za koje nemamo mjerenja. Na primjer, ukoliko raspolažemo s dovoljnom količinom ulaznih podataka moguće je predviđanje određenih karotažnih krivulja kao što je u ovom slučaju krivulja zvučne karotaže.

Mjera točnosti korelacije, odnosno predviđanja modela, promatra se uz pomoć parametra  $R^2$ , korelacijskog koeficijenta čije vrijednosti mogu biti između 0 i 1, a reprezentativnost korelacije raste s porastom korelacijskog koeficijenta prema jedinici. Korelacijski koeficijent ili koeficijent determinacije predstavlja omjer varijacije između dobivenog modela i ulaznih

podataka (Benšić i Šuvak, 2013). Radi li se o pozitivnoj ili negativnoj linearnoj vezi možemo prikazati i grafički uz pomoć dijagrama rasipanja.



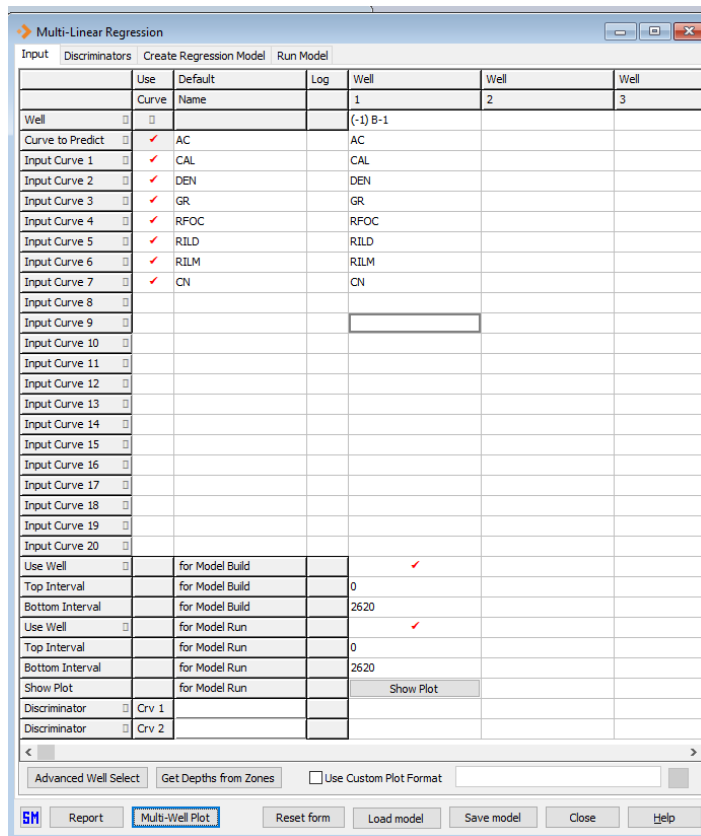
**Slika 4-1.** Primjer grafičkog prikaza linearne regresije (izrađeno prema Benšić i Šuvak, 2013)

Na Slici 4-1 vidi se grafički prikaz linearne regresije uz prikazana odstupanja za svaku točku od pravca regresije. To odstupanje može biti pozitivno ili negativno, ovisno o tome s koje strane pravca regresije se točka nalazi.

#### 4.2. Prikaz rezultata

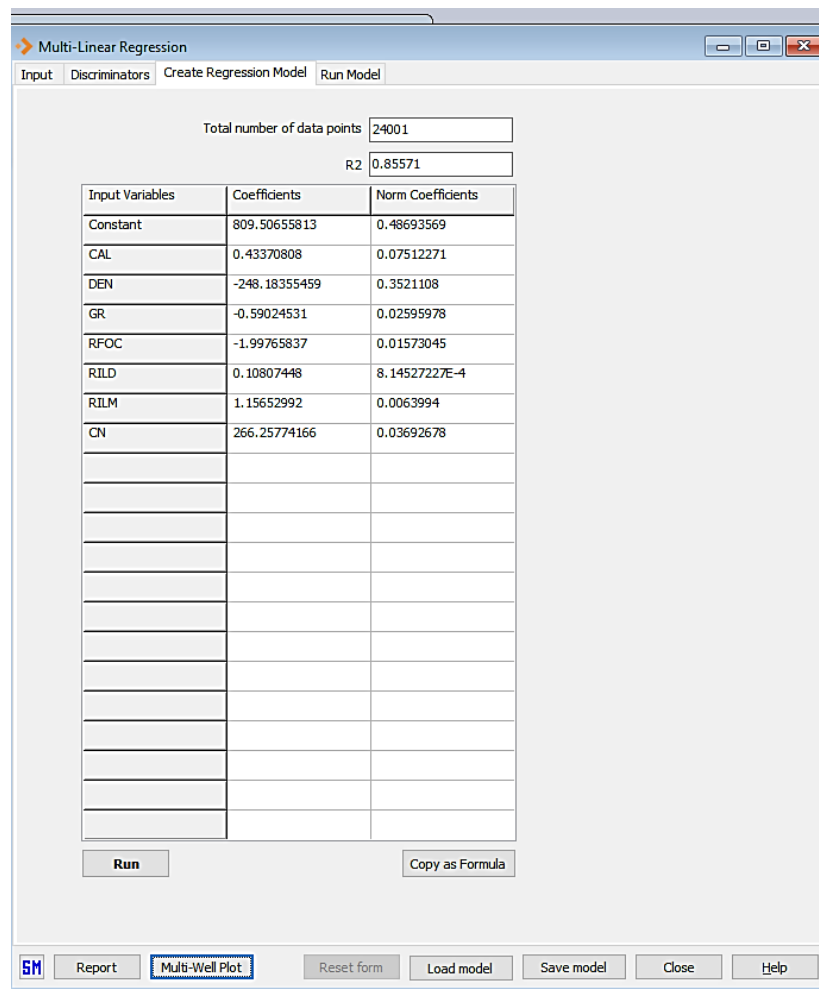
Simulacija karotažne krivulje izvedena je pomoću softvera *Interactive Petrophysics*, odnosno modula *Multi-Linear Regression* (Slika 4-2). Odabire se jedna karotažna krivulja koju će se simulirati modelom, u ovom slučaju AC (zvučna karotaža) te ostale krivulje koje služe kao ulazni podaci, odnosno nezavisne varijable. Ostale krivulje su krivulje neutronske karotaže (CN), karotaže gustoće (DEN), kalipera (CAL), karotaže prirodne radioaktivnosti (GR), električne otpornosti mjerene sondom dubokog zahvata (RILD), električne otpornosti mjerene sondom srednjeg zahvata (RILM), spontanog potencijala (SP) te električne otpornosti mjerene sondom plitkog zahvata (RFOC). Za dobivanje korelacijskog modela koristi se opcija *Use Well for Model Build*, a za simuliranje krivulje zvučne karotaže *Use Well for Model Run* (Lloyd's Register, 2021).





Slika 4-2. Izbornik modula multilinearne regresije

U prvom koraku odabrano je predviđanje zvučne karotaže uz korištenje sljedećih ulaznih podataka: CAL, DEN, GR, RFOC, RILD, RILM i CN. U sljedećem koraku su promijenjeni ulazni podaci i predviđanje zvučne karotaže je izvedeno za još dva različita seta ulaznih podataka.



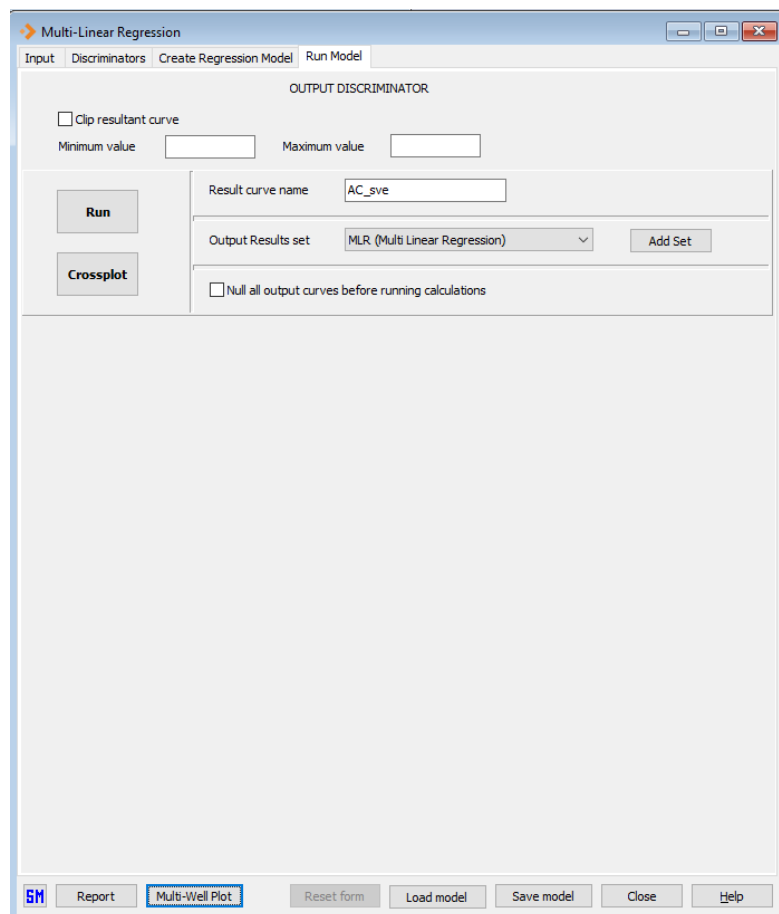
Slika 4-3. Prozor *Create Regression Model* unutar modula *Multi-Linear Regression*

Nakon odabiranja ulaznih podataka i krivulje koju želimo predvidjeti, koristi se prozor *Create Regression Model* (Slika 4-3). U njemu za svaki ulazni podatak dobijemo određeni koeficijent. Koeficijent predstavlja veličinu u kojoj će mjeri simulirana krivulja ovisiti o tom ulaznom podatku. Što je koeficijent veći, simulirana krivulja će imati veću ovisnost. Model za prvi set ulaznih podataka ima sljedeći oblik:

$$AC = 809,50655813 + 0,43370808*CAL - 248,18355459*DEN - 0,59024531*GR - 1,99765837*RFOC + 0,10807448*RILD + 1,15652992*RILM + 266,25774166*CN$$

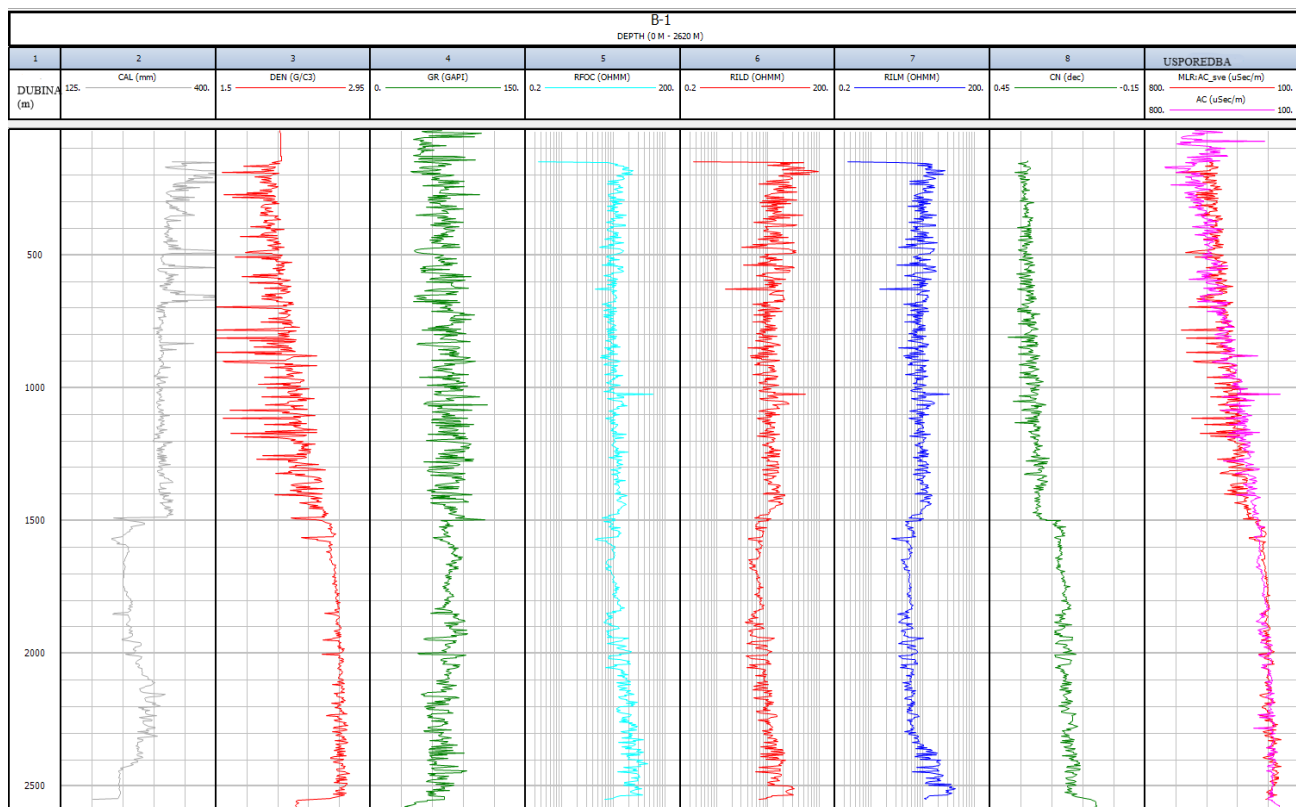
Vidi se da najveći koeficijent ima karotaža gustoće (DEN) što znači da će simulirani izlazni podatak ovisiti najviše od karotaži gustoće. Stoga kod predviđanja krivulje zvučne karotaže nikako kao ulazni podatak ne bi trebalo izostavljati karotažu gustoće.

Osim koeficijenata ulaznih podataka, unutar ovog prozora, prikazuje se i podatak korelacijskog koeficijenta  $R^2$ . U ovom slučaju iznosi 0,85571, a već je prije spomenuto da je poželjno da njegova vrijednost bude što bliža jedinici.



**Slika 4-4.** Prozor *Run Model* unutar modula *Multi-Linear Regression*

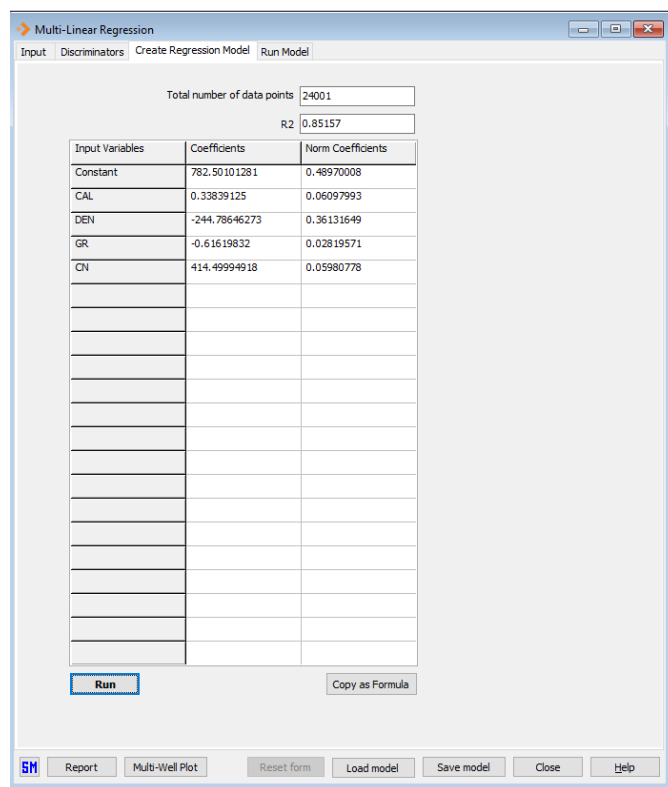
Sljedeći korak je uz pomoć naredbe *Run* izvršiti simuliranje željene krivulje, odnosno izračunati je pomoću dobivenog modela te grafički prikazati podatke naredbom *Multi-Well Plot* (Slika 4-4).



**Slika 4-5.** Prikaz ulaznih podataka i usporedba simulirane i mjerene zvučne karotaže

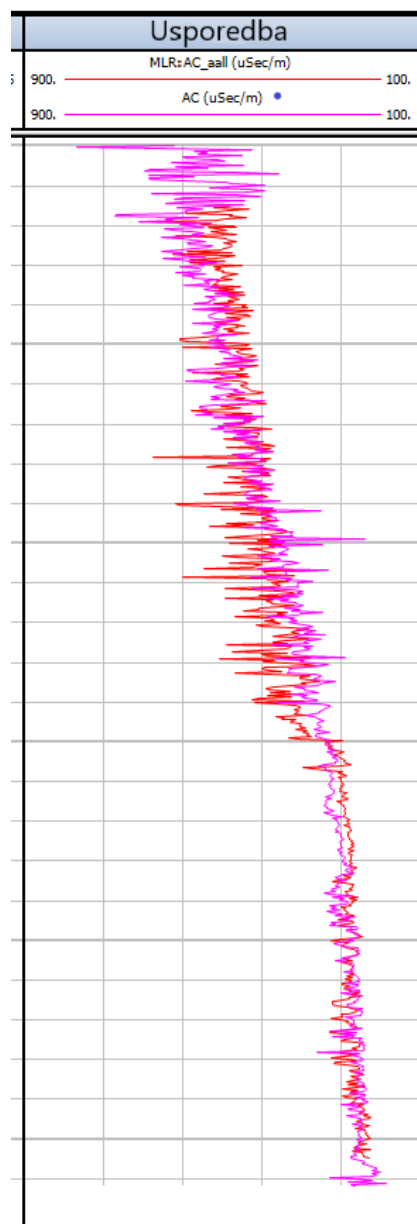
Prikazivanjem *Multi-Well Plot-a* (Slika 4-5) imamo uvid u sve odabrane ulazne podatke, to jest izgled krivulja ulaznih podataka, kao i u izmjerenu zvučnu karotažu te simuliranu zvučnu karotažu. Rezultati na Slici 4-5 pokazuju vrlo dobro podudaranje mjerene zvučne karotaže (u posljednjem stupcu označene ljubičastom bojom) i simulirane (označene crvenom bojom u posljednjem stupcu). Dobro podudaranje očekivano je radi malog odstupanja  $R^2$  od broja 1. Također je prije spomenuto da će izgled simulirane krivulje najviše ovisiti o DEN, a na Slici 4-5 vidi se da izgled simulirane zvučne karotaže najviše izgledom podsjeća na krivulju DEN.

Sljedeći korak je simulirati zvučnu karotažu korištenjem drugih ulaznih podataka, te su korištene krivulje kalipera (CAL), gustoće (DEN), prirodne radioaktivnosti (GR) i neutronske karotaže (CN) (Slika 4-6). Ponovno je odabrano predviđanje krivulje zvučne karotaže.



**Slika 4-6.** Prikaz koeficijenata ulaznih podataka i korelacijskog koeficijenta  $R^2$

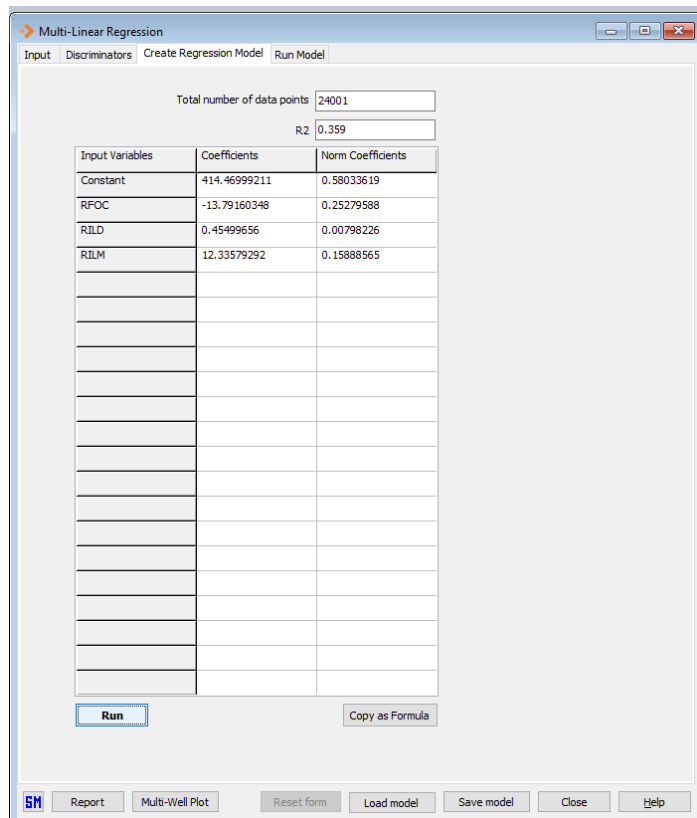
Na Slici 4-6 primjećujemo da korelacijski koeficijent  $R^2$  za ove ulazne podatke iznosi 0,85157 što je nešto manje nego u prvom slučaju. To znači da će prvi primjer odabranih ulaznih podataka biti reprezentativniji pri simuliranju zvučne karotaže. U ovom slučaju je također najveći koeficijent za karotažu gustoće (DEN).



**Slika 4-7.** Podudaranje mjerene i simulirane zvučne karotaže dobivene ulaznim podacima: CAL, DEN, GR, CN

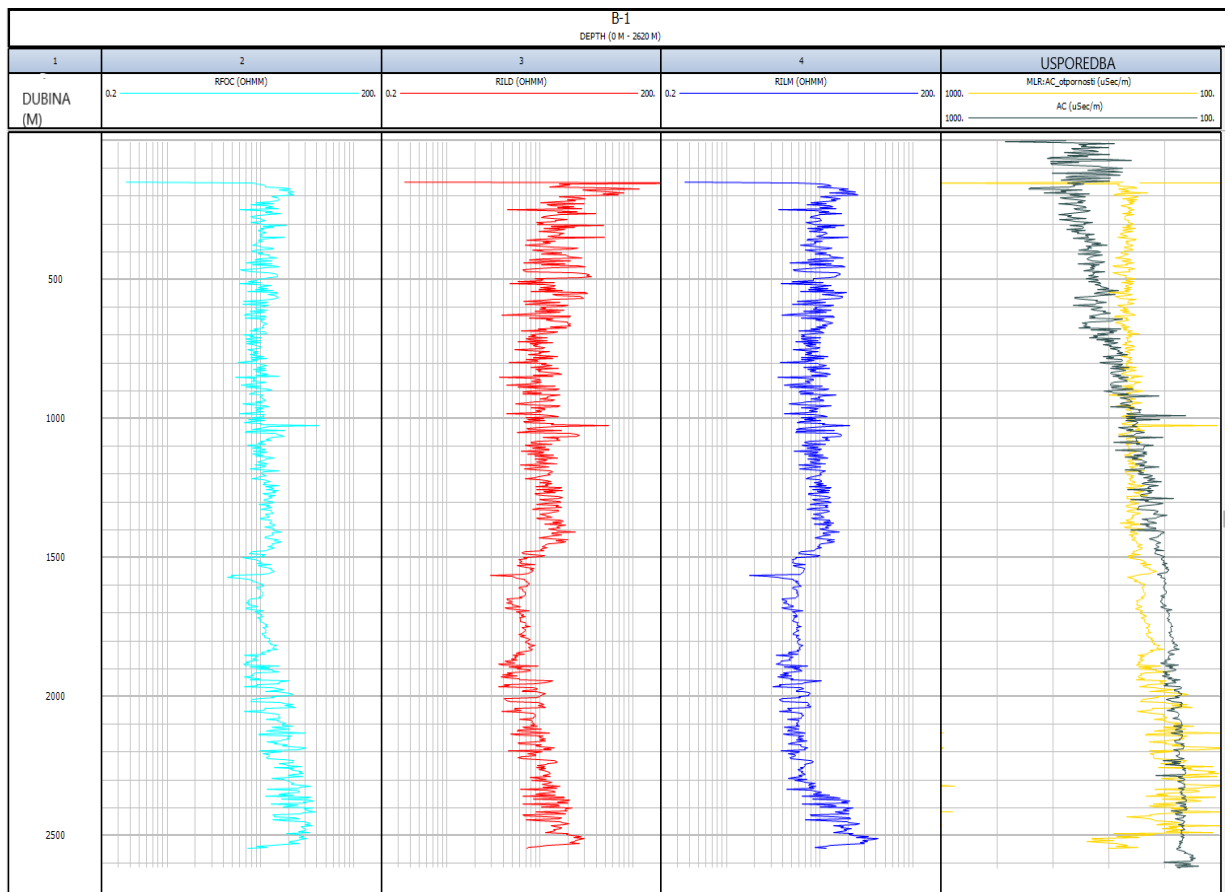
I u ovom slučaju vidimo dobro podudaranje mjerene (krivulja ljubičaste boje) i simulirane (krivulja crvene boje) zvučne karotaže (Slika 4-7). Također simulirana karotaža svojim izgledom najviše podsjeća na karotažu gustoće (DEN) (crvena krivulja na Slici 4-5).

Nakon ova dva slučaja, gdje vidimo relativno dobro preklapanje simulirane vrijednosti s mjerenom, predstavljen je slučaj gdje se mjerena zvučna karotaža ne preklapa u takvoj mjeri sa simuliranom.



**Slika 4-8.** Prikaz korelacijskog koeficijenta i koeficijenata ulaznih podataka

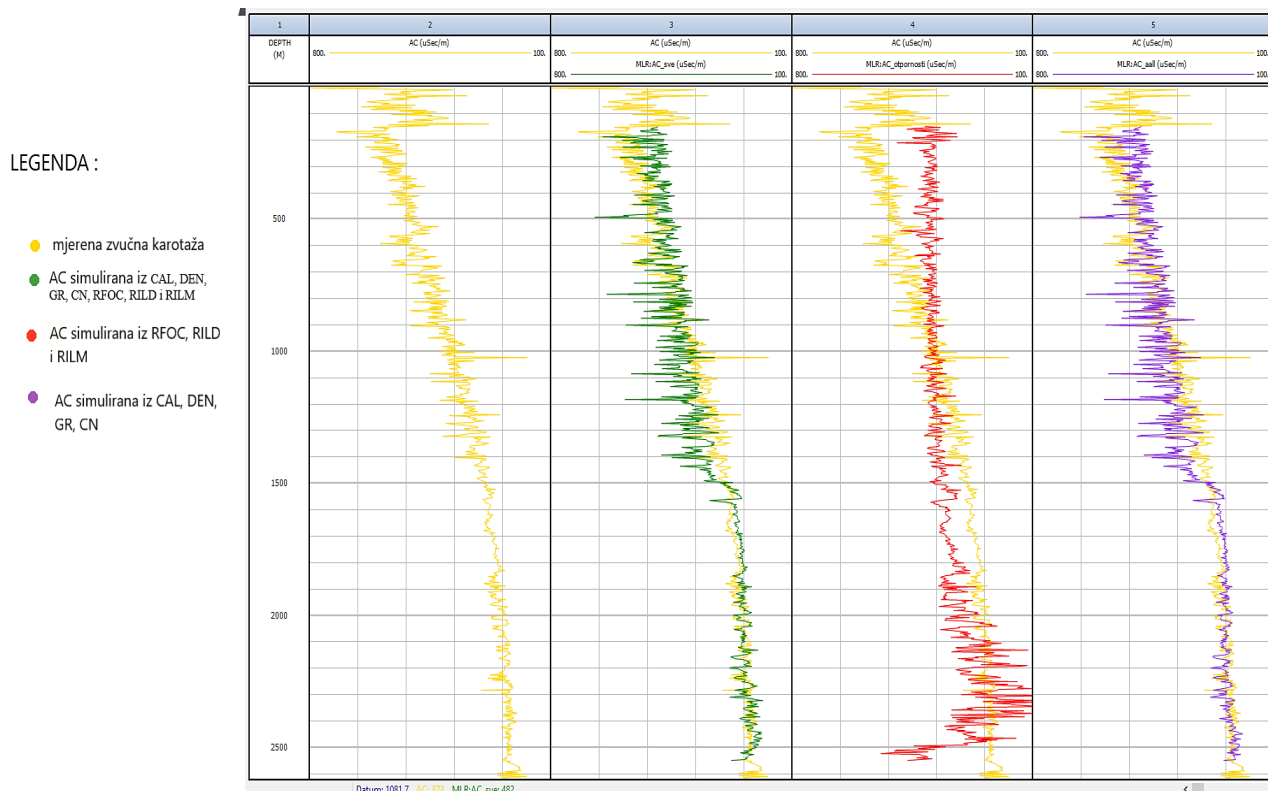
Kao ulazni podaci odabrane su krivulje otpornosti RFOC, RILD i RILM (Slika 4-8). Korelacijski koeficijent  $R^2$  iznosi tek 0,359 (Slika 4-8) što je velika razlika u odnosu na prva dva slučaja. Možemo zaključiti da korištenjem ovih ulaznih podataka nećemo dobiti reprezentativan primjer simulirane karotaže jer je korelacijski koeficijent dosta manji od 1. Pretpostavljamo da se izgled dviju krivulja (mjerene i simulirane karotaže) neće preklapati kao u prethodna dva slučaja.



**Slika 4-9.** Prikaz simulirane i mjerene zvučne karotaže s odabranim ulaznim podacima: RFOC, RILD, RILM

Kao što je i pretpostavljeno, mjerena zvučna karotaža (na Slici 4-9 prikazana sivom bojom) ne preklapa se dobro sa simuliranom (žuta boja). Korištenjem ulaznih podataka RILD, RILM i RFOC ne dobiva se reprezentativan primjer što znači da, ukoliko bi predviđali zvučnu karotažu na sljedećim bušotinama na istom polju, ove podatke ne bi koristili kao ulazne.





**Slika 4-10.** Prikaz mjerene zvučne karotaže i simuliranih zvučnih karotaža s različitim ulaznim podacima

Nakon dobivenih svih simuliranih zvučnih karotaža na Slici 4-10. vidimo prikaz podudaranja istih sa mjerenom zvučnom karotažom. Upravo ona, gdje smo imali najveći koeficijent korelacije, na Slici 4-10. u drugom stupcu prikazana zelenom bojom, ima najveće podudaranje s mjerenom zvučnom karotažom koja je prikazana žutom bojom. Simulirana zvučna karotaža koja ima najmanji koeficijent korelacije prikazana je na Slici 4-10. crvenom bojom u trećem stupcu, te se najmanje podudara s mjerenom zvučnom karotažom.

## 5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je predvidjeti izgled krivulje zvučne karotaže (AC) na temelju drugih karotažnih mjerenja koja su izvedena u bušotini. Iako je na primjeru ove bušotine uspješno izvedeno mjerenje zvučne karotaže cilj je bio testirati koliko su dobra podudaranja zvučne karotaže simulirane pomoću drugih karotažnih mjerenja (AC\_mlr) sa mjerenom zvučnom karotažom.

Rezultati pokazuju da od svih korištenih ulaznih podataka najveću ovisnost simulirana AC\_mlr ima o karotaži gustoće (DEN), što se primjećuje i po tome što ima najveći koeficijent u modelu. Zaključno, vrlo je bitno predviđati zvučnu karotažu koristeći karotažu gustoće kao ulazni podatak. Ukoliko se taj podatak izostavi simulirana zvučna karotaža imat će manje podudaranje s mjerenom, ali je ipak moguće simulirati zvučnu karotažu. Nasuprot tome, najmanje podudaranje AC\_mlr s AC ima prilikom korištenja otpornosti RFOC, RILD i RILM kao ulaznih podataka, pa njih nije preporučljivo koristiti ukoliko ih ne kombiniramo s ostalim ulaznim podacima.

Ponekad je teško vizualno odrediti koja su najbolja podudaranja krivulja te bi bilo krivo prilikom izbora ulaznih podataka, one najreprezentativnije birati s obzirom na izgled krivulja. Zbog toga je bitno odrediti i koeficijent korelacije,  $R^2$ . Što je on bliži jedinici reprezentativnost korelacije biti će veća. Koeficijent  $R^2$  je najveći u slučaju kada su za ulazne podatke korišteni CAL, DEN, GR, RFOC, RILD, RILM, CN (Slika 4-3).

Metoda multilinearne regresije je vrlo dobar primjer kako možemo predvidjeti krivulju zvučne karotaže korištenjem različitih karotažnih mjerenja kao ulaznih podataka. Također, može se zaključiti da povećanje broja ulaznih podataka povećava i preciznost podudaranja simulirane karotaže s onom izmjerenom. No, najbitniji ulazni podatak je karotaža gustoće jer najviše utječe na konačni izgled simulirane zvučne karotaže. Za dobro izvedeno predviđanje potrebno je koristiti i ostala mjerenja, koja nemaju toliki koeficijent utjecanja na konačni izgled krivulje, ali njihovim uvrštavanjem dobivamo reprezentativniji konačni model.

## 6. LITERATURA

ALA, M. 2016. Petroleum geology: Log interpretation Course. Imperial College London, London, UK.

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

BENŠIĆ, M., ŠUVAK, N. 2013. Primijenjena statistika. Sveučilište J.J. Strossmayera, Odjel za matematiku, Osijek.

Lloyd's Register 2021. Interactive Petrophysics User Manual.

OREŠKOVIĆ, J. 2017. Bušotinska karotaža, interna skripta za predmet. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.

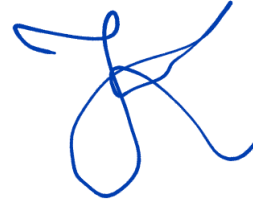
SCHWAETZER, T. 1958. The measurement of vertical velocity by continuous velocity logging. Geophysical Prospecting, 6/3, 257-271.

SIMPSON, D. 2017. Well-Bore Construction (Drilling and Completions), Practical Onshore Gas Field Engineering, str. 85-134. Gulf Professional Publishing, Houston, TX, SAD

ŠUMANOVAC, F. 2012. Osnove geofizičkih istraživanja. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb

## **IZJAVA**

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

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and curves, positioned above a horizontal line.

---

Jurica Kovačić



KLASA: 602-01/23-01/68  
URBROJ: 251-70-12-23-2  
U Zagrebu, 04.09.2023.

**Jurica Kovačić, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/68, URBROJ: 251-70-12-23-1 od 23.05.2023. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### ZVUČNA KAROTAŽA SIMULIRANA KORIŠTENJEM METODE MULTILINEARNE REGRESIJE

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

Mentorica:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Jasna Orešković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomatske ispite:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)