

# Zvučna karotaža simulirana korištenjem metoda linearne regresije i neuronskih mreža

---

Grljević, Stijepo

Master's thesis / Diplomski rad

2022

*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:169:110131>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-11**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij geologije

**ZVUČNA KAROTAŽA SIMULIRANA KORIŠTENJEM METODA LINEARNE  
REGRESIJE I NEURONSKIH MREŽA**

Diplomski rad

Stijepo Grljević

G432

Zagreb, 2022.



KLASA: 602-01/22-01/145  
URBROJ: 251-70-15-22-2  
U Zagrebu, 8. 7. 2022.

**Stijepo Grljević, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/22-01/145, URBROJ: 251-70-15-22-1 od 24. 6. 2022. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### ZVUČNA KAROTAŽA SIMULIRANA KORIŠTENJEM METODA LINEARNE REGRESIJE I NEURONSKIH MREŽA

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

Mentorica:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Jasna  
Orešković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Doc. dr. sc. Zoran Kovač

(titula, ime i prezime)



Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)

## ZVUČNA KAROTAŽA SIMULIRANA KORIŠTENJEM METODA LINEARNE REGRESIJE I NEURONSKIH MREŽA

Stijepo Grljević

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

### Sažetak

Karotažna mjerenja daju bitne podatke potrebne za karakterizaciju nabušenih stijena, kao i povezivanje bušotinskih i površinskih seizmičkih mjerenja. Zvučna karotaža (AC) pri tome daje podatke potrebne za procjenu poroznosti, izračunavanje akustičnih impedancija potrebnih za konstruiranje sintetskih seizmograma i seizmičku inverziju. Često, a posebno u starim bušotinama, zvučna karotaža nije izvedena ili je izvedena samo na interesantnim intervalima. Softver *Interactive Petrophysics* sadrži modul *Machine Learning* u okviru kojeg su alati *Neural Network* i *Multi-Linear regression* koji omogućuju predviđanje krivulja karotažnih mjerenja. U ovom radu korišteni su za predviđanje zvučne karotaže na temelju drugih izmjerenih karotažnih krivulja (neutronske karotaže, karotaže gustoće, prirodne gama-radioaktivnosti, karotaže otpornosti). Zvučna karotaža je predviđana u bušotinama polja u Savskoj depresiji (naftno-plinsko polje Stružec), a zatim je uspoređena s izmjerenim krivuljama zvučne karotaže. Rezultati dobiveni objema metodama relativno se dobro podudaraju sa stvarnima, uz manja odstupanja djelomično uzrokovana zasićenjem ugljikovodicima, tankim slojevima ili lošom kvalitetom ulaznih podataka i u nekim bušotinama nedostatkom karotažnih krivulja. Također su izračunati sintetski seizmogrami koristeći mjerenu zvučnu karotažu te zvučne karotaže simulirane na dva načina. Dobiveno je vrlo dobro podudaranje u oba slučaja, no nešto bolje poklapanje ostvareno je kod sintetskog seizmograma izračunatog pomoću zvučne karotaže simulirane neuronskom mrežom.

Ključne riječi: zvučna karotaža, neuronske mreže, linearna regresija, sintetski seizmogram, *Interactive Petrophysics*

Završni rad sadrži: 49 stranice, 34 slike, i 33 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

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

Mentori: izv. prof. dr. sc. Jasna Orešković, izvanredna profesorica RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Jasna Orešković, izvanredna profesorica RGNF  
Dr. sc. Marko Cvetković, izvanredni profesor RGNF  
Dr. sc. Ivan Medved, docent RGNF

## ACOUSTIC LOG SIMULATED USING LINEAR REGRESSION AND NEURAL NETWORK METHODS

Stijepo Grljević

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Geophysical Exploration and Mine Surveying  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Abstract

Well logging produces essential data necessary for characterization of drilled rocks as well as for comparison of borehole and surface geophysical parameters. Acoustic logging (*AC*) gives the data needed for porosity estimation, synthetic seismogram calculation and seismic inversion. Acoustic well logging is often omitted, especially in older wells or performed only on interesting depth intervals. *Interactive Petrophysics* software offers *Neural Network* and *Multi-Linear Regression* tools through its Machine Learning Module which provide the prediction of well-logs. In this research, they were used to simulate the *AC* logs using other well-log curves (neutron log, density log, natural gamma-ray log and resistivity log). Acoustic log prediction was performed for wells in a field located in Sava depression (hydrocarbon field „Stružec“) and compared to actual, measured acoustic well logs. Both methods produced relatively good results, i.e. they show good fitting of the simulated and measured *AC*-logs. Minor offsets occurred due to the hydrocarbon saturation, thin layers, bad input data quality and the lack of well logs in some wells. Synthetic seismograms were calculated using the measured *AC* log along with the two simulated ones. Good fitting was obtained in both cases, although the best fit was observed on the synthetic seismogram calculated using the Neural Network-simulated *AC*-log.

Keywords: well-logging, neural networks, linear regression, synthetic seismogram, Interactive Petrophysics

Thesis contains: 49 pages, 34 figures and 33 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: PhD Jasna Orešković, associate professor RGNF

Reviewers: PhD Jasna Orešković, associate professor RGNF  
PhD Marko Cvetković, associate professor RGNF  
PhD Ivan Medved, assistant professor RGNF

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KAROTAŽNA MJERENJA</b> .....	<b>3</b>
2.1. Karotaža električne otpornosti .....	4
2.2. Karotaža prirodne radioaktivnosti .....	6
2.3. Neutronska karotaža .....	6
2.4. Kompenzirana karotaža gustoće .....	7
2.5. Zvučna karotaža .....	7
<b>3. SIMULACIJA KAROTAŽNIH MJERENJA</b> .....	<b>10</b>
3.1. Naftno-plinsko polje Stružec .....	10
3.2. Metoda neuronske mreže .....	13
3.3. Metoda multilinearne regresije .....	14
<b>4. REZULTATI</b> .....	<b>15</b>
4.1. Simulacija metodom neuronske mreže .....	15
4.3. Simulacija metodom multilinearne regresije .....	23
<b>5. SINTETSKI SEIZMOGRAM</b> .....	<b>40</b>
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>46</b>
<b>7. LITERATURA</b> .....	<b>48</b>

## POPIS SLIKA

Slika 2-1. Skica normalne (lijevo) i inverzne (desno) sonde.....	5
Slika 2-2. Skica sonde za kompenziranu karotažu gustoće .....	7
Slika 2-3. Skica sonde za zvučnu karotažu.....	8
Slika 3-1. Geografski smještaj polja Stružec .....	11
Slika 3-2. Generalizirani geološki stup polja Stružec .....	12
Slika 4-1. Prva simulacija zvučne karotaže neuronskom mrežom za bušotinu B-1 .....	16
Slika 4-2. Druga simulacija zvučne karotaže neuronskom mrežom za bušotinu B-1 .....	17
Slika 4-3. Prva simulacija neuronskom mrežom za bušotinu B-2.....	18
Slika 4-4. Druga simulacija zvučne karotaže neuronskom mrežom za bušotinu B-2 .....	19
Slika 4-5. Simulacija zvučne karotaže neuronskom mrežom za bušotinu B-3 .....	20
Slika 4-6. Simulacija zvučne karotaže neuronskom mrežom za bušotinu B-4 .....	21
Slika 4-7. Simulacija zvučne karotaže neuronskom mrežom za bušotinu B-5 .....	22
Slika 4-8. Izbornik modula multilinearne regresije ( <i>Multi-Linear Regression</i> ).....	24
Slika 4-9. Prva simulacija zvučne karotaže multilinearom regresijom za bušotinu B-1 ...	25
Slika 4-10. Dijagram rasipanja za bušotinu B-1 pri usporedbi snimljene zvučne karotaže (AC) i simulirane (AC_mlr) .....	26
Slika 4-11. Koeficijenti regresijskog modela za bušotinu B-1 .....	27
Slika 4-12. Druga simulacija multilinearom regresijom za bušotinu B-1 .....	28
Slika 4-13. Prva simulacija zvučne karotaže multilinearom regresijom za bušotinu B-2.	29
Slika 4-14. Tablica koeficijenata i dijagram raspršenosti za prvu simulaciju u bušotini B-2 .....	30
Slika 4-15. Druga simulacija zvučne karotaže multilinearom regresijom za bušotinu B-2 .....	31
Slika 4-16. Prva simulacija multilinearom regresijom za bušotine B-1 (lijevo) i B-2 (desno) .....	32
Slika 4-17. Tablica koeficijenata za model dobiven bušotinama B-1 i B-2.....	32
Slika 4-18. Druga simulacija multilinearom regresijom za bušotine B-1 (lijevo) i B-2 (desno) .....	33
Slika 4-19. Tablica koeficijenata za model dobiven bušotinama B-1 i B-2, bez CN krivulje .....	33
Slika 4-20. Simulacija multilinearom regresijom za bušotinu B-3 .....	34
Slika 4-21. Simulacija multilinearom regresijom za bušotinu B-4 .....	35

Slika 4-22. Simulacija multilinearom regresijom za bušotinu B-5 .....	36
Slika 4-23. Simulacija multilinearom regresijom za bušotinu B-6 modelom od B-1 i B-2 .....	37
Slika 4-24. Tablica koeficijenata za prvu simulaciju u bušotini B-6.....	37
Slika 4-25. Simulacija multilinearom regresijom za bušotinu B-6 .....	38
Slika 4-26. Tablica koeficijenata za drugu simulaciju u bušotini B-6.....	38
Slika 5-1. Shema izračunavanja sintetskog seizmograma .....	41
Slika 5-2. Sintetski seizmogram za bušotinu B-1 izračunat pomoću mjerene krivulje (AC) i krivulje simulirane neuronskom mrežom (AC_nn).....	43
Slika 5-3. Sintetski seizmogram izračunat iz mjerene krivulje AC i krivulje simulirane multilinearom regresijom (AC_mlr).....	44



## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
<i>DEPTH</i>	m	dubina
<i>CN</i>	-	kompensirana neutronska karotaža
<i>DEN</i>	g/c <sup>3</sup>	kompensirana karotaža gustoće
<i>GR</i>	GAPI	karotaža prirodne radioaktivnosti
<i>R16</i>	Ωm	električna otpornost mjerena malom normalom
<i>R64</i>	Ωm	električna otpornost mjerena velikom normalom
<i>AC</i>	μs/m	intervalno vrijeme prolaska P-vala mjereno zvučnom karotažom
<i>RILM</i>	Ωm	električna otpornost mjerena induktivnom sondom srednjeg zahvata
<i>RILD</i>	Ωm	električna otpornost mjerena induktivnom sondom dubokog zahvata
<i>R<sup>2</sup></i>	-	Pearsonov koeficijent korelacije

## 1. UVOD

Bušotinska karotaža jest nezamjenjiv postupak *in-situ* mjerenja fizičkih svojstava stijena u bušotinskom i pribušotinskom prostoru. Izvodi se spuštanjem jednog, a najčešće više instrumenata na dno kanala bušotine te njegovim podizanjem na površinu uz bilježenje mjerenih podataka. Zabilježeni podaci mjerodavni su za izdvajanje ekonomski zanimljivih naslaga, općenito za određivanje tijeka i metodologije bušenja, kao i za dobivanje šire slike o istraživanom području, a ležišta i polja nerijetko se rasprostiru i stotinama četvornih kilometara. Karotaža se može izvoditi tijekom bušenja, no najčešće se izvodi sama, nakon završetka kolone (zadanog dubinskog intervala kojeg se cementira, a ovisi o litološkom sastavu i dubini).

Jezgrovanje se vrši na iznimno zanimljivim intervalima, a to zapravo predstavlja ekstrakciju stijenske mase u obliku valjka kako bi se analizirala u više-manje netaknutom i prirodnom stanju i slijedu, a postupak je vrlo skup i logistički zahtjevan. Prilikom izrade bušotina bilo koje namjene, a posebno u istraživanju ugljikovodika, često je fokus na smanjenju troškova i to najčešće na račun karotažnih mjerenja u smislu da se ne izvode uvijek duž cijelog kanala bušotine.

S razvojem tehnologije, u naftnoj industriji sve više na važnosti dobivaju različite metode računalne obrade bušotinskih i površinskih podataka, a kojih je uvijek mnogo. Tijekom godina razvijeni su mnogi koncepti, softveri i baze podataka s tipskim modelima koji se čak koriste i u usporedbi i analizi ležišta koja geografski nisu nužno blizu, no imaju slične geološke karakteristike i građe bazena. Naime, kao što je i u geologiji poznato, mnogi fenomeni mogu se dovesti u međusobnu relaciju i prostornu povezanost, te se u kvalitetne regionalne pristupe vrijedi pouzdati. Fizičke veličine mjerene u bušotini direktan su odraz svojstava stijena te se, ukoliko se njima pravilno rukuje i na adekvatan ih se način obrađuje, mogu dobiti vrlo korisne informacije uz znatno smanjen trošak novih *in-situ* mjerenja. Skoro sve fizičke veličine mogu se različitim matematičkim metodama dovesti u međusobnu zavisnost te se od naizgled malog broja podataka mogu dobiti velike količine informacija i to s vrlo visokom preciznošću. Svi ti podaci neće se odmah iskoristiti, no u fazi razrade, kad se naglasak stavlja na maksimalno iskorištavanje ležišta, imaju ključnu ulogu u prikupljanju što više parametara i tu je detaljnija računalna obrada nezamjenjiv dio.

Kvalitetna i kontinuirana mjerenja zvučnom karotažom predstavljaju vrlo vrijedan podatak jer su osnovni ulazni podatak pri izradi sintetskog seizmograma. Njegova namjena je definiranje seizmičkog karaktera litoloških granica određenih u bušotini, pri povezivanju bušotinskih podataka sa seizmičkim refleksijskim podacima. S druge strane, izračunavanje poroznosti pomoću zvučne karotaže predstavlja jednu od standardnih metoda u procjeni petrofizikalnih svojstava nabušenih naslaga, a primjenu također ima u izračunavanju pornog tlaka.

Budući da zvučna karotaža često nije mjerena kontinuirano duž cijelog kanala bušotine ili uopće nije mjerena, raznim tehnikama moguće je simulirati ju pomoću dostupnih podataka. U ovom radu simulirat će se zvučna karotaža metodama linearne regresije i neronskih mreža koristeći druga dostupna karotažna mjerenja (neutronska karotažu, karotažu gustoće i prirodne gama-radioaktivnosti te karotažu otpornosti kao ulazne podatke, a kako bi se procijenio utjecaj različitih faktora na dobivene rezultate. Naposljetku će se izračunati sintetski seizmogrami u jednoj bušotini kako bi se dodatno provjerili i interpretirali dobiveni modeli.

## 2. KAROTAŽNA MJERENJA

Neka petrofizikalna svojstva mogu se odrediti i pomoću više karotažnih metoda. Poroznost je moguće izmjeriti karotažom prirodne gama-radioaktivnosti, karotažom gustoće, neutronsom karotažom te zvučnom karotažom. Mjerenjem poroznosti svakom zasebno za neke naslage mogu se dobiti vrlo različite vrijednosti, a upravo je to razlog zašto se skoro uvijek mjeri najmanje dvjema metodama. S druge strane, karotažom prirodne gama-radioaktivnosti, karotažom otpornosti te karotažom gustoće mogu se mjeriti litološka svojstva. U različitim formacijama određena će tehnika dati najbolje rezultate. Osim za interpretaciju, rezultati karotažnih istraživanja služe i za razvoj objedinjenih petrofizikalnih modela za dobro istražene sljedove naslaga, posebno u naftnogeološki perspektivnim sedimentnim bazenima čiji je postanak uvijek vrlo dobro definiran. Takvi modeli sadrže sve relevantne geološke i ostale podatke čiji odnos je jasno kvantitativno i kvalitativno definiran, a u svrhu donošenja zaključaka i pretpostavki koji će biti prihvatljivi i zasnovani na stvarnim odnosima. Upravo zbog navedenog desetljećima su u naftnoj geologiji određeni fenomeni podložni determinaciji o njima nepoznatih informacija koje proizlaze iz poznatih odnosa, a omogućuje znatne uštede operativnih troškova i vremena. Ti postupci determinacije zasnivaju se na raznim tehnikama koje su u naftnogeološkoj struci standardni i općeprihvaćeni.

Mnogi radovi bave se problematikom predviđanja karotažnih krivulja raznim pristupima, od relativno jednostavnijih tehnika sličnih onoj korištenoj u ovom radu do naprednih programerskih metoda, poput tzv. *Deep learning*-a i *Big data analytics*-a. Nuwara (2020) se bavio predviđanjem krivulje zvučne karotaže P-valova u programskom jeziku *Python* koristeći postojeće regresijske modele iz baze *Scikit*, a kao ulazne podatke uz karotažu gustoće, karotažu prirodne radioaktivnosti i karotažu otpornosti koristio je i karotažu promjera bušotine, poroznost te faktor fotoelektrične apsorpcije. Sličan pristup koristili su Joshi et al. (2021) uz pomoć nadziranog i nenadziranog strojnog učenja (eng. *Supervised and unsupervised Machine learning*).

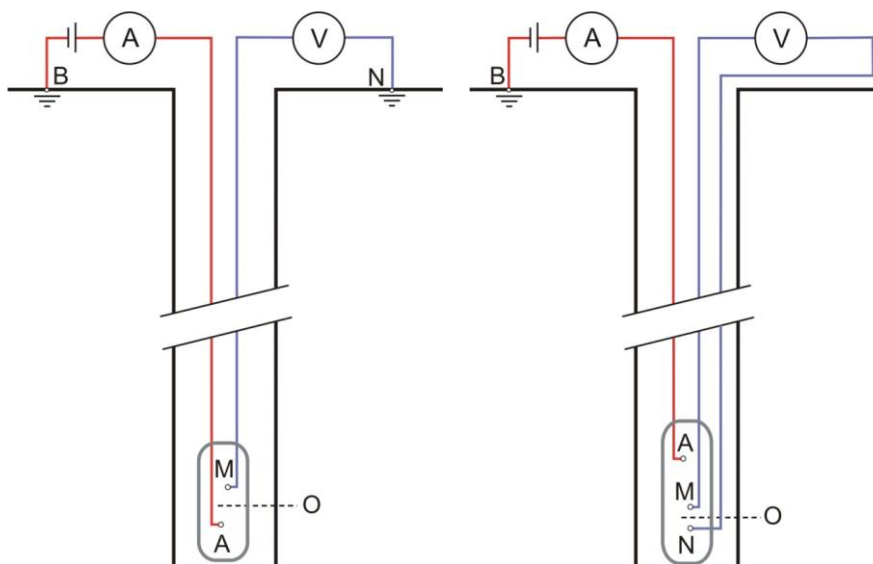
U sljedećim potpoglavljima ukratko će se opisati vrste karotažnih mjerenja koje su u ovom radu korištene u svrhu simulacije zvučne karotaže.

## 2.1. Karotaža električne otpornosti

Puštanjem električne struje kroz stijene, konkretnije naslage u kanalu bušotine, ona će se ponašati različito za stijene različitih fizikalno-kemijskih svojstava. Porozne stijene u pornom prostoru sadrže fluide, najčešće vodu, naftu ili plin (uključujući i zrak). Voda je gotovo uvijek prisutna u poroznim klastičnim naslagama, a njena električna vodljivost raste proporcionalno sa stupnjem mineralizacije. Ioni otopljeni u vodi nosioci su naboja i takva voda učinkovito provodi struju. U pravilu se porastom dubine povećava i mineralizacija, što je značajno kod naftnogeoloških istraživanja u kojima se strukture istraživanja najčešće nalaze na većim dubinama. Ugljikovodici u pornom prostoru znatno su slabiji vodiči te uzrokuju povećanje električne otpornosti naslaga, a koja je obrnuto proporcionalna električnoj vodljivosti.

Kako su porni fluidi glavni nositelji električnog naboja, svrha ove karotaže jest razdvajanje propusnih od nepropusnih naslaga, a daje i informacije bitne za definiranje litoloških karakteristika (posebno stupanj zaglinjenosti) te zasićenja fluidima i u manjem stupnju poroznosti (Luthi, 2013).

Električna otpornost se može mjeriti raznim sondama, klasičnim normalnim i inverznim sondama, induktivnim sondama, mikrosondama i laterolozima. Normalna sonda mjeri razliku potencijala, a inverzna gradijent potencijala na određenoj udaljenosti od izvora tj. strujne elektrode. Kod normalne sonde jedna strujna i jedna potencijalna elektroda smještene su u bušotinu, a druga strujna i potencijalna na površinu, dok se kod inverzne jedna strujna elektroda postavlja na površinu, a druga se skupa s obje potencijalne nalazi u bušotini (Slika 2-1). Duljina normalne sonde definirana je kao razmak strujne i potencijalne elektrode u bušotini (AM). Dubina prodiranja sonde ovisit će o razmaku među elektrodama, a u praksi se najčešće istovremeno koriste dvije vrste normalne sonde: velika normala (duljine 64") i mala normala (duljine 16"). Mala normala ima manji dubinski zahvat, no preciznija je u registriranju granica slojeva, dok velika normala zbog većeg dubinskog zahvata mjeri otpornost netaknute zone (Simpson, 2017).



Slika 2-1. Skica normalne (lijevo) i inverzne (desno) sonde (Orešković, 2017)

Klasične sonde često ne mogu razdvojiti tanke slojeve zbog smanjene rezolucije kao posljedice dubokog prodiranja u naslage, a tome doprinosi i isplaka koja, zbog sadržaja glinovite komponente, često ima otpornosti daleko manje od naslaga što smanjuje dubinu prodiranja. Sonde s usmjerenim strujama mnogo su efikasnije što se tiče rezolucije i dubine prodiranja (Darling, 2005).

Osim njih, često se koriste i mikrosone koje su još preciznije u istraživanjima namijenjenim na sedimentima tanke slojevitosti. One su vrlo malih dimenzija, a imaju mali dubinski zahvat, no ipak puno veću rezoluciju, a mjere u varijanti normalne ili inverzne sonde. Dvije najraširenije varijante su mikrolog i mikrolaterolog. Za uspješno mjerenje nužno je osigurati njihovo čvrsto prijanjanje uz stjenku kanala bušotine što je omogućeno papučom, sustavom opruga i poluga koje se šire ili stišću ovisno o promjeru bušotine (Šumanovac, 2012).

Induktivna sonda može mjeriti i u bušotinama u kojima se koriste isplake visoke otpornosti (uljne isplake), a gdje je mjerenje klasičnim sondama otežano, no može se koristiti i u bušotinama s isplakama malih otpornosti. Podatak koji ona daje jest specifična vodljivost stijena uz korištenje elektromagnetske indukcije. Struja visoke frekvencije (20 kHz) generirana u odašiljačkoj zavojnici izaziva nastanak sekundarne struje inducirane u naslagama. Te sekundarne struje stvaraju magnetno polje koje u prijammiku induciraju naboj proporcionalan vodljivosti naslaga (Kaufman i Itskovich, 2017). Posebno dobre rezultate daje u vodljivim stijenama, tj. otpornosti nižih od  $200 \Omega\text{m}$  (Šumanovac, 2012).

## 2.2. Karotaža prirodne radioaktivnosti

Prirodna gama-radioaktivnost ovisit će o sadržaju izotopa urana, kalija i torija u stijenama, a kalijev izotop  $^{40}\text{K}$  je najobilniji s obzirom da ga sadrže mnoge gline, tinjci i alkalijski feldspati koji se nalaze u šejlovima i laporima i glinovitim naslagama, u odnosu na pijeske, pješčenjake i karbonate koji ga sadrže bitno manje (Simpson, 2017). Jedna od primjena ove karotaže je razdvajanje propusnih, niskoradioaktivnih i nepropusnih, visokoradioaktivnih naslaga. Također se podaci dobiveni mjerenjem prirodne radioaktivnost koriste pri izračunu volumnog udjela gline u naslagama. U kombinaciji s karotažom spontanog potencijala daje vrlo precizne rezultate. Detektor gama-zraka (Geiger-Müllerov ili scintilacijski brojač) nalazi se na sondi koja je oprugom pritisnuta uz zid bušotine. Mjerenje se izvodi polaganim izvlačenjem sonde, a rezultati su kvalitetniji kad se smanji brzina izvlačenja. Uređaj konačno bilježi broj primljenih gama-fotona u sekundi čija će količina ovisiti o udjelu gline i šejla u naslagama (Ala, 2016). Mjerene vrijednosti se prikazuju u izvedenim GamaAPI (GAPI) jedinicama.

## 2.3. Neutronska karotaža

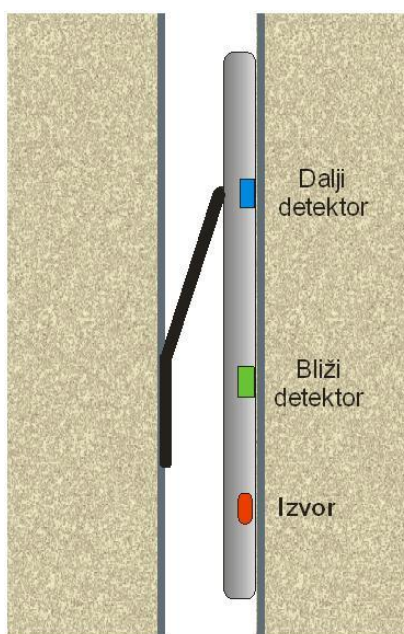
Stijene se bombardiraju brzim neutronima iz izvora na sondi i mjeri se njihovo usporenje uslijed sudara brzog neutrona i jezgre vodika, koji je masom najslabiji masi neutrona te najučinkovitije utječe na usporenje brzih neutrona. Primarni cilj ove karotaže u prošlosti bilo je uglavnom utvrđivanje poroznosti, no danas se koristi za procjenu vodikovog indeksa. Neutronska karotaža ne daje dobre procjene poroznosti ukoliko se u naslagama nalazi plin koji će dati manje vrijednosti. Također, pogrešne procjene zasićenja vodom davat će u glinovitim naslagama koje u kristalnoj rešetki sadrže vodik (Šumanovac, 2012).

Radijus prodiranja u bušotini ovisit će o poroznosti naslaga, odnosno s povećanjem poroznosti dubina prodiranja će se smanjiti. Sonda treba biti pritisnuta na stijenkama kanala bušotine kako bi se umanjio utjecaj isplake na mjerenje. Usporednim izvođenjem mjerenja karotažom gustoće s neutronska karotažom moguće je vrlo precizno odrediti litološki sastav, kao i zasićenje plinom što je vrlo često slučaj na mjestu međusobnog preklapanja njihovih krivulja (Ellis i Singer, 2007).

## 2.4. Kompenzirana karotaža gustoće

Izvorom gamma-zraka bombardiraju se stijene te se mjeri apsorpcija i raspršenja zračenja, tj. na detektoru se bilježi smanjeno rezultantno zračenje u odnosu na emitirano. Gama zrake kroz stijenu gube dio energije, odnosno dolazi do prigušenja intenziteta gama zraka, budući da energija u stijeni međudjeluje s elektronskim oblacima u atomima. To za posljedicu ima smanjenje energije gama zračenja registriranog na detektoru. Smanjenje energije ovisi o elektronskoj gustoći stijene koja je proporcionalna s volumnom gustoćom stijene. Energija zračenja ovisit će o gustoći stijena, a što je ona veća, prigušenje će biti veće (Darling, 2005).

Kako bi se maksimalno umanjio utjecaj isplake i isplačnog kolača na mjerenje, provodi se kompenzirana karotaža gustoće (eng. *Compensated Density Log*). Sonda koja se koristi za to mjerenje ima dva prijemnika, jedan bliži izvoru (38 cm), a drugi na 63 cm od izvora (Slika 2-2) (Ellis i Singer, 2007).



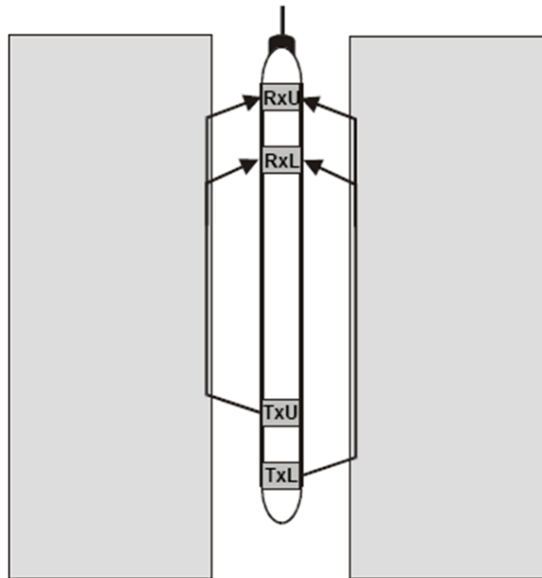
Slika 2-2. Skica sonde za kompenziranu karotažu gustoće

## 2.5. Zvučna karotaža

Ovom karotažom mjeri se vrijeme prolaska elastičnog longitudinalnog vala na određenom putu, tj. intervalno vrijeme prolaska (Slika 2-3). Temelji se na kombinaciji tri principa - detekciji brzine elastičnih valova, mjerenju prigušenja/smanjenja amplitude vala i



refleksije vala. Zvučna karotaža najčešće podrazumijeva mjereno intervalno vrijeme prolaska refraktiranog P-vala od odašiljača, kroz stijenu do prijemnika (Ellis i Singer, 2007).



Slika 2-3. Skica sonde za zvučnu karotažu

Iako je zvučna karotaža vjerojatno najbitnija karotažna metoda, ona se ponekad iz različitih razloga ne izvodi, ili ne izvodi na pojedinim intervalima ukoliko to ne zahtijevaju sigurnosni, vremenski ili financijski kriteriji. Međutim, razvijene su mnoge empirijske metode za njeno izračunavanje uz pomoć drugih podataka i one su uglavnom zadovoljavajuće, a jedna od njih je Faustova formula (1953):

$$V_p = 46,5(Z T)^{1/6} \quad (2-1)$$

gdje je  $V_p$  brzina P-valova,  $Z$  je dubina u metrima, a  $T$  starost stijena u godinama. Ova formula veliku težinu daje starosti naslaga jer ipak često vrijedi da stijene na većim dubinama imaju veći stupanj kompakcije, a time i gustoću te posljedično veće brzine P-valova. Faustovu formulu treba se koristiti oprezno i poželjno uz druge, preciznije metode jer se njome ne može umanjiti efekt pojave plina (Guntoro et al., 2013).

Zvučnu karotažu empirijski se može izračunati i uz poznatu gustoću stijena, što je prvi primijenio Gardner (1974):

$$\rho = aV_p^b \quad (2-2)$$

gdje je  $\rho$  gustoća,  $V_p$  brzina P-valova,  $a=0.23$ ,  $b=0.25$ .

Općenito u geoznanosti jedna od osnovnih ideja jest identificirati homogenost, kontinuiranost, u bilo kojem mjerilu. Ono što nam homogenost predstavlja jest vjerojatnost da će se isto svojstvo (npr. poroznost, propusnost, zasićenje ugljikovodicima) pojaviti i na pretpostavljenom tj. željenom mjestu. U istraživanju ugljikovodika homogenost i kontinuiranost jesu glavni faktori za odabir ekonomski zanimljivog ležišta i zbog toga je cilj identificirati što veće područje oko kanala bušotine. U tome su i nezamjenjiva seizmička mjerenja kao i geološke karte i podaci o širem području. Računalne metode, a posebno neuronske mreže koriste obrasce za identificiranje homogenosti, povezanosti podataka i njihovo grupiranje, tj. sličnost. Geološka interpretacija uvijek ima presudnu subjektivnu komponentu te je nerijetko da deset geologa ima deset ne toliko sličnih interpretacija nekog fenomena.

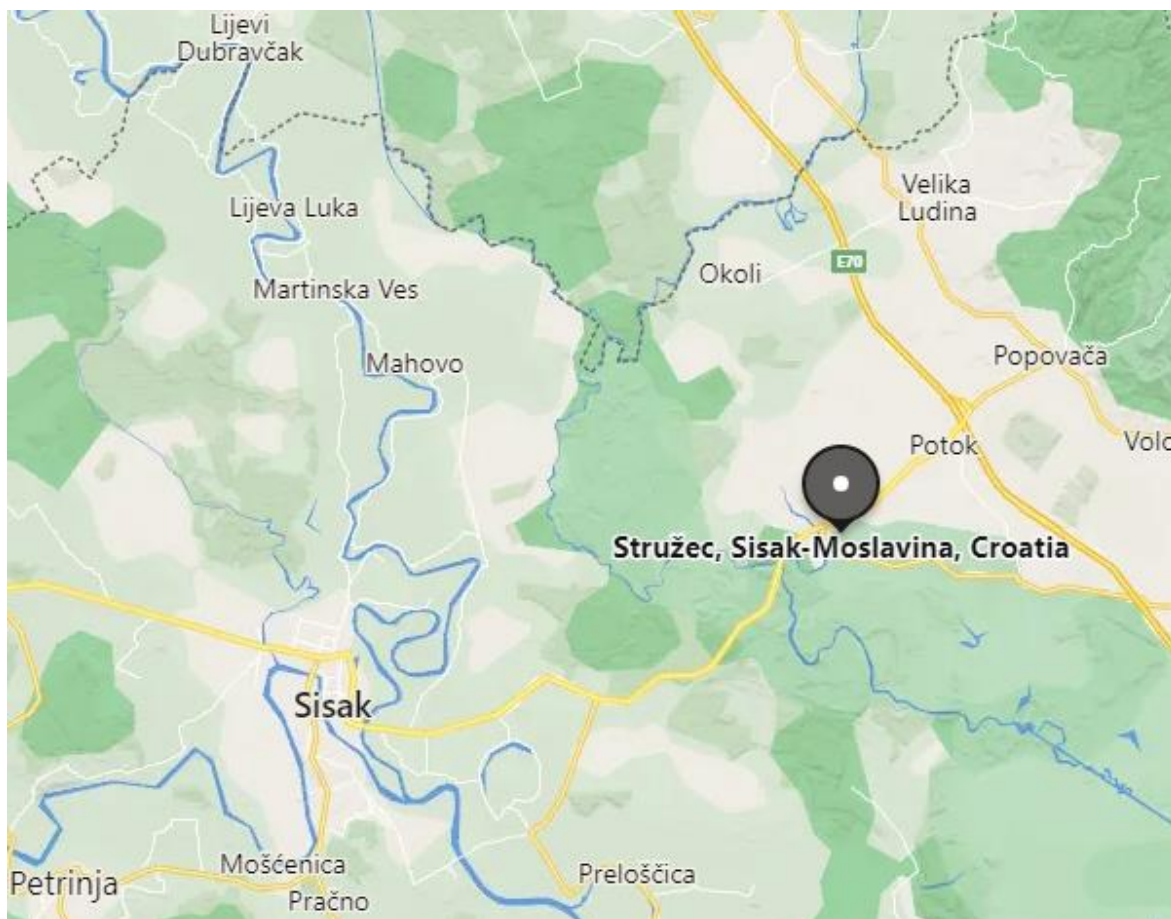
### 3. SIMULACIJA KAROTAŽNIH MJERENJA

Napredne geostatističke metode u istraživanju ležišta ugljikovodika i općenito geoznanostima u velikom se obujmu koriste još od kraja prošlog stoljeća, a razvijaju se i prilagođavaju i dan danas. Kao što je spomenuto u prethodnom poglavlju, one za cilj imaju prepoznati homogenost na odgovarajućoj razini, kvantificirati međusobnu zavisnost što većeg broja varijabli i naposljetku razviti model koji je primjenjiv na najveće moguće područje istraživanog svojstva. Odnos među podacima nije uvijek linearan te nije moguće jednoznačno definirati međusobnu zavisnost tih podataka jednostavnijim matematičkim relacijama. Uz to, u naftogeološkim istraživanjima podataka je mnogo i najbitniji korak jest te podatke grupirati u skupine s obzirom na njihovu sličnost i međusobnu zavisnost. Zbog toga su razvijeni brojni modeli i baze podataka, algoritmi, neuronske mreže i dr. Svi oni imaju zadatak pronaći model koji će što više raspoloživih podataka svrstati u grupe u kojima će se moći opisati nekim zajedničkim modelom uz što manju (statističku) pogrešku.

Softveri koji se koriste u naftnim kompanijama pružaju brojne mogućnosti za rad sa svim vrstama geofizičkih podataka, od najjednostavnijih za svrhe učenja pa do naprednih kakvim se redovno koriste geoznanstvenici zaposleni u industriji. Za predmet istraživanja ovog rada izabrani su karotažni podaci iz šest odabranih bušotina naftno-plinskog polja Stružec koje je relativno dobro istraženo kao jedno od najvažnijih proizvodnih polja u Republici Hrvatskoj. Nakon proučavanja stručne dokumentacije tvrtke INA d.d. i uvida u karakteristike struktura i ležišta, odabrane su bušotine s najboljom kvalitetom karotažnih podataka koje će se koristiti za konstruiranje modela po kojem će se simulirati krivulje zvučne karotaže za sve bušotine.

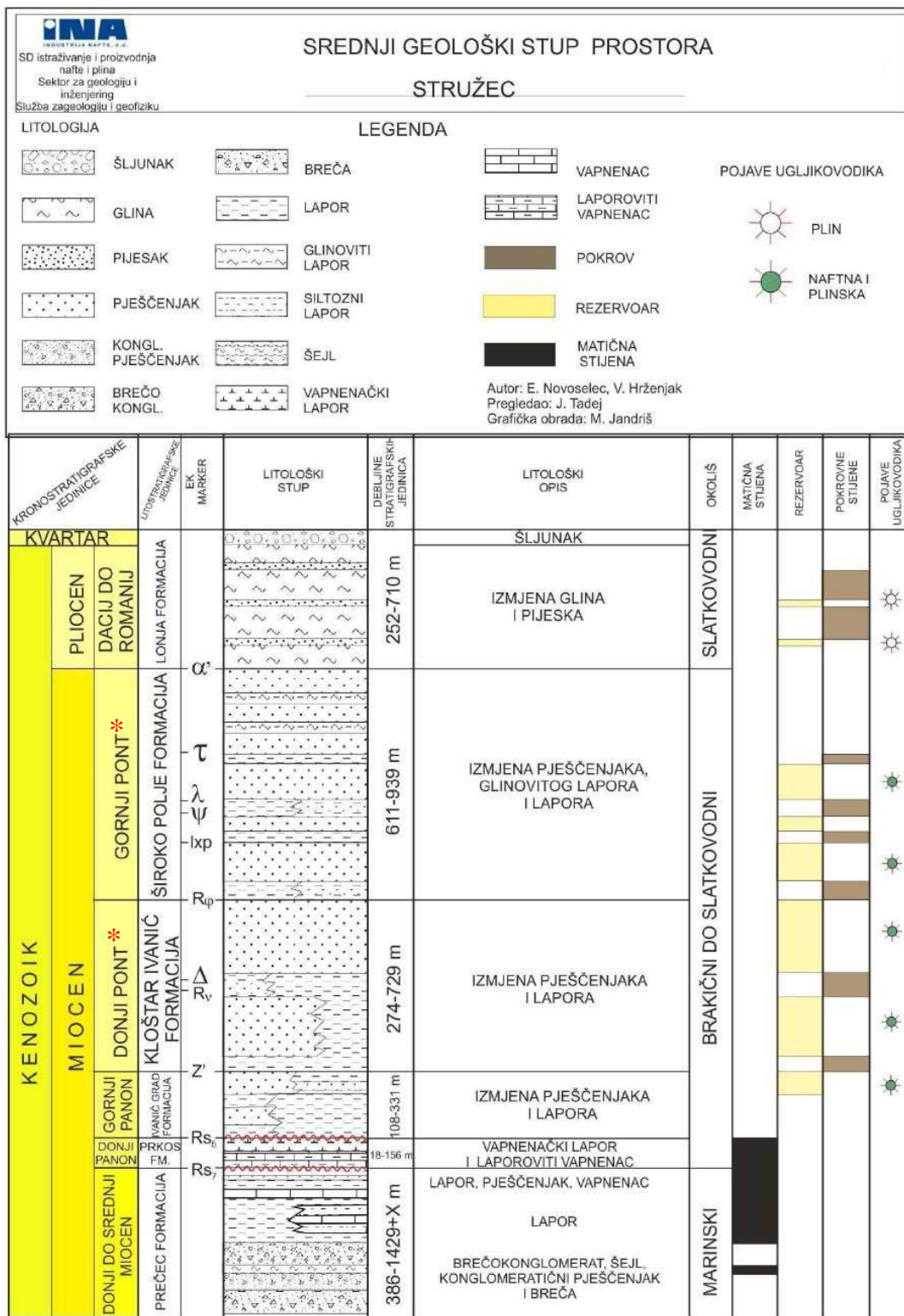
#### 3.1. Naftno-plinsko polje Stružec

Bušotinski podaci koji će se koristiti dobiveni su na polju Stružec, gdje je istraživanje i razradu izvodila INA d.d. Naftno-plinsko polje Stružec nalazi se na području istoimenog naselja u općini Popovača, Sisačko-moslavačka županija, 10 km sjeveroistočno od grada Siska (Slika 3-1).



Slika 3-1. Geografski smještaj polja Stružec

U geološkom kontekstu nalazi se u sjeverozapadnom dijelu Savske depresije koja predstavlja jugoistočni rub Panonskog bazena. Panonski bazen je imao tipični razvoj zalučnog bazena (eng. *Back-arc basin*) u kojem je prevladavala ekstenzijska tektonika koja je započela u donjem miocenu. Bazen je karakteriziran brojnim rasjedima pružanja SZ—JI koji su rezultat te tektonike, a čija je posljedica i stvaranje depresija koje su omogućile veliki akomodacijski prostor, uz stanjenje Zemljino kore i povećani geotermalni gradijent (Pavelić, 2001). Najintenzivnija sedimentacija događala se u miocenu i pliocenu, a dominiraju terigeni sedimenti (Slika 3-2). U pliocenu i kvartaru, kao i recentno, dominira kompresijska tektonika. Kao pomoć pri interpretaciji koristit će se i pet regionalnih elektrokarotažnih (EK) markera ( $\lambda$ ,  $\psi$ ,  $I_{xp}$ ,  $H_p$  i  $R_\varphi$ ) koji su utvrđeni u bušotinama polja Stružec radi procjene utjecaja zasićenja naslaga ugljikovodicima na mjerene i simulirane krivulje. Svi EK markeri nalaze se unutar formacije Široko Polje, a  $R_\varphi$  predstavlja njenu granicu s formacijom Kloštar Ivanić.



50000220.008.10-00

Slika 3-2. Generalizirani geološki stup polja Stružec (Krklec et al., 2013)

\*katovi donji i gornji pont više se ne koriste za središnji Paratethys prema Čorić et al. (2009), već gornji miocen

Polje se u cijelosti nalazi unutar antiklinale Osekovo pružanja istok-zapad. Istraživanja ugljikovodika na tom području započela su 1940. godine kad su korištena gravimetrijska mjerenja kojima je otkrivena anomalija Osekovo uzrokovana antikinalom. Prva bušotina O-1 izrađena je 1941. godine. Prve naslage u kojima je zabilježena pojava ugljikovodika su Abichi naslage (sivi lapori i glinovito-pjeskoviti lapori gornjeg panona). Detaljnija geofizička istraživanja započeta su 1956. i 1957. nakon čega je projektirana bušotina O-3 kojom su otkrivena tri naftonosna pješčana sloja imenovana  $P_1$ ,  $P_2$  i  $p_1$ . Daljnjim istraživanjima utvrđene su i ostale naftonosne formacije Kloštar Ivanić, Ivanić Grad te Široko Polje. Ležišta su utvrđena uglavnom u sitnozrnastim do srednjezrnastim pješčenjacima, gornjopanonske starosti. Na polju je ukupno 149 bušotina prosječne dubine 1093 m, od kojih su 61 proizvodne naftne i 7 proizvodnih plinskih. Sveukupno je utvrđeno 37 ležišta ugljikovodika (Žužul et al., 2011).

### 3.2. Metoda neuronske mreže

Neuronske mreže, kao što i sam naziv govori, alat su koji teoretski djeluje na sličan način kao i ljudski mozak, odnosno njegovi kognitivni mehanizmi. To je vrlo bitno jer su se desetljećima interpretacije, zaključci i poslovne odluke u geoznanostima, a posebno nafnogeološkim istraživanjima, temeljile na znanju, vještini i iskustvu geologa, bez pomoći računalnih programa i modernih rješenja. U geoznanostima će uvijek nezamjenjiva biti subjektivna komponenta, a s obzirom na važnost i mjerilo predmeta izučavanja naše struke, s razvojem novih metodologija i pristupa, ona i dalje ne gubi na važnosti. Neuronske mreže imaju sposobnost učenja, a ukoliko je taj proces adekvatno odrađen, one mogu oponašati obrasce koji su im predstavljeni u samoj fazi učenja (uvježbavanja, eng. *training*). Njihova prednost u odnosu na ljudski mozak je ta što mogu raditi s ogromnim brojem podataka. Podatke zaprimaju, obrađuju i prosljeđuju kao bročane vrijednosti kojima pripisuju i razne matematičke transformacije kako bi ih prema i najmanjoj sličnosti precizno mogli kategorizirati ili grupirati. Vrlo je bitno mrežu uvježbati na način da u fazi učenja daje zadovoljavajuće izlazne rezultate, uz minimalnu pogrešku. Neuronske mreže funkcioniraju na način da pogrešku za svaki neuron iskoriste za optimizaciju mreže tako da prilagođavaju težinske koeficijente koje će im dodijeliti (Malvić i Cvetković, 2009).

### 3.3. Metoda multilinearne regresije

Linearna regresija (interpolacija) matematički je postupak definiranja međusobne ovisnosti nekog skupa podataka. Veliki dio podataka, odnosno fizičkih svojstava mjerenih u kanalu bušotine međusobno se mogu povezati određenim matematičkim transformacijama ili množenjem s koeficijentima (npr. Gardnerova (2-2) i Faustova formula (2-1)). Upravo na tome počiva postupak predviđanja jedne ili više karotažnih krivulja ukoliko raspolažemo s dovoljnim brojem ulaznih podataka. Kad postoji zavisnost jedne varijable o više drugih nezavisnih varijabli, postupak se zove multivarijantna (ili multilinearne) regresija. Obje počivaju na metodi najmanjih kvadrata, što zapravo znači da je cilj umanjiti kvadrate udaljenosti između regresijskog pravca i mjerenih podataka.

Omjer varijacije podataka dobivenog modela i ukupne varijacije podataka (ulaznih podataka) je  $R^2$  odnosno korelacijski koeficijent (koeficijent determinacije). On nam govori koliko rasipanje podataka u modelu potječe od same linearne zavisnosti u odnosu na rasipanje koje se ne može objasniti (pogreške u mjerenju, ekstremne vrijednosti i dr.).  $R^2$  poprima vrijednosti između 0 i 1, a veća vrijednost znači da je korelacija bolja tj. model reprezentativniji, odnosno varijacija manja. Po Chadockovoj ljestvici, vrijednost  $R^2$  između 0,25 i 0,64 predstavlja srednje jaku vezu, a između 0,64 i 1,00 jaku vezu (Lunt, 2013). Dijagram rasipanja grafički prikazuje gdje su koncentrirane točkaste vrijednosti, odnosno ulazni podaci te možemo vidjeti radi li se o pozitivnoj ili negativnoj linearnoj vezi.

## 4. REZULTATI

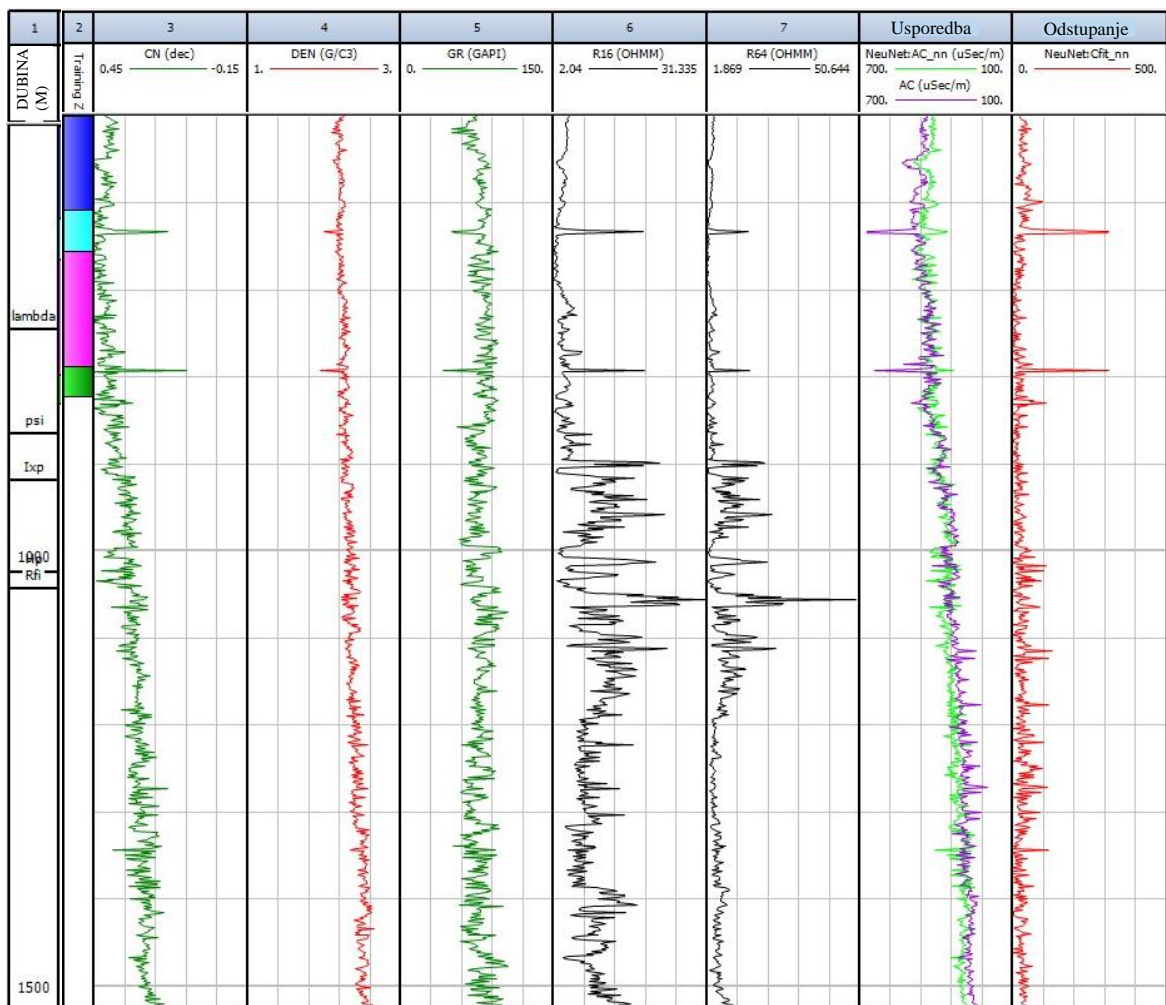
### 4.1. Simulacija metodom neuronske mreže

Za bušotine B-1, B-2, B-3, B-4, B-5 i B-6 naftno-plinskog polja Stružec, alat neuronskih mreža unutar modula *Machine Learning* softvera *Interactive Petrophysics* koristit će se kako bi se simulirala zvučna karotaža pomoću drugih standardnih karotažnih mjerenja. Ovdje su korištene karotaža prirodne gama-radioaktivnosti, karotaža gustoće, neutronska karotaža, te karotaže otpornosti, ovisno o dostupnosti pojedinih mjerenja za svaku bušotinu. Kvaliteta simulirane zvučne karotaže i interpretacija će se vršiti uzimajući u obzir prethodno dobivene rezultate pomoću metode linearne regresije. Neuronska mreža koju softver koristi je *Neuro Solutions 5.5* s jednim skrivenim slojem (IP User Manual, 2013).

Za uvježbavanje neuronske mreže koristit će se ulazni podaci iz dviju bušotina, B-1 i B-2. Simulacije krivulje zvučne karotaže (*AC* - prema eng. *Acoustic Log*) u ovim dvjema bušotinama izvodit će se prvo sa, a potom bez korištenja krivulje kompenzirane neutronske karotaže (*CN* - prema eng. *Compensated Neutron Log*) kako bi se usporedila kvaliteta. Ostala mjerenja, karotaža gustoće (*DEN*), prirodna gama-radioaktivnost (*GR*), karotaža otpornosti velikom i malom normalom (*R64* i *R16*) korištena su u oba slučaja. Za ostale bušotine neće se koristiti model koji uključuje krivulju *CN* jer u njima nije mjerena.

Za bušotinu B-1 korištene su četiri zone uvježbavanja neuronske mreže (eng. *Training zones*), a prikazane su u drugom stupcu slijeva na slici 4-1. Odabrane su na prikazanom intervalu iz dva razloga - u tom dubinskom rasponu interpretiran je elektrokarotažni (*EK*) marker  $\lambda$ . Isti su utvrđeni i u svim ostalim bušotinama što će generirati precizniji model, a osim toga najbolje vizualno podudaranje simulirane zvučne karotaže (*AC<sub>nn</sub>*) i mjerene krivulje (*AC*) ostvareno je upravo odabirom ovih zona. Optimalan broj zona uvježbavanja pri korištenju modula *Neural Network* je između 4 i 8 te je poželjno da budu relativno uske (IP User Manual, 2013). Posljednji stupac na slici 4-1 prikazuje vrijednost odstupanja mjerene i simulirane krivulje *AC*.



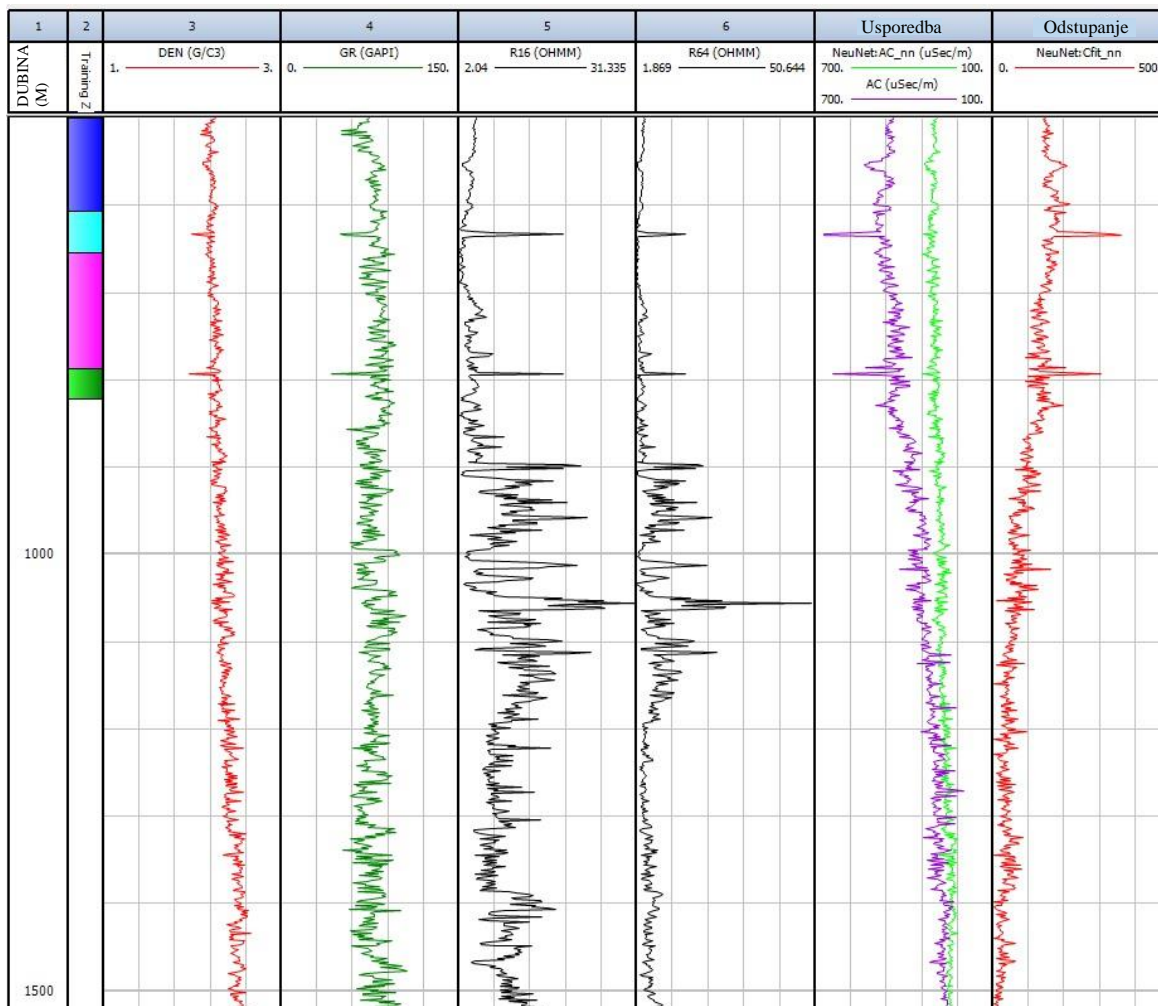


**Slika 4-1. Prva simulacija zvučne karotaže neuronskom mrežom za bušotinu B-1. Mjerena krivulja prikazana je ljubičastom bojom (AC), a simulirana zelenom (AC\_nn).**

Na dijagramu usporedbe simulirane i mjerene zvučne karotaže (Slika 4-1, predzadnji stupac) vidljivi su suprotni trendovi pikova na dubinama od oko 640 i 790 m. Pikovi su izraženiji na mjerenoj krivulji zvučne karotaže i ukazuju na povećanje intervalnog vremena, odnosno smanjenje brzine. Na istim dubinama uočavaju se i na ostalim karotažnim krivuljama. Razlog tome mogli bi biti tanki slojevi zasićeni ugljikovodicima, no bušotina je tehnički likvidirana i ne raspolaže se podacima o dubinama zasićenih slojeva. Ipak, na kraju ovog poglavlja to je potvrđeno za bušotine B-3, B-4 i B-5 za koje su dostupni podaci o proizvodnim intervalima.

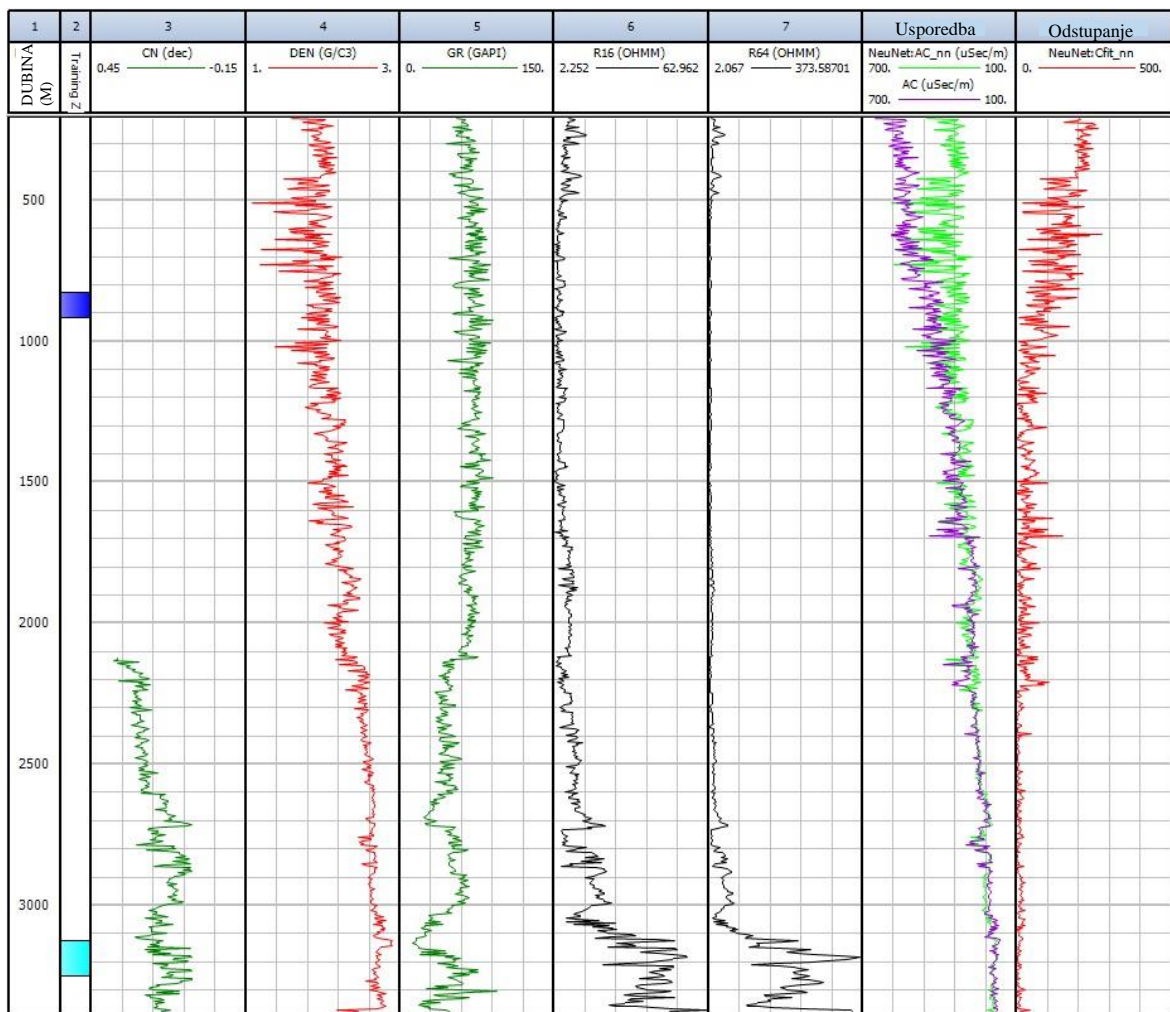
Nešto drugačija situacija dobije se kad iz ulaznih podataka uklonimo krivulju neutronske karotaže CN (Slika 4-2). Izraženi pikovi suprotne orijentacije na simuliranoj krivulji AC\_nn u plićoj zoni daleko su manji, ali jednakog trenda kao i na snimljenoj krivulji AC, a vrijednost odstupanja može se vidjeti na crvenoj krivulji u zadnjem stupcu. Ipak, vrijednosti na tim mjestima previše odstupaju i nedvojbeno je da uzrok toga treba pripisati značajnijoj promjeni

litostratigrafskih karakteristika. Upravo je ova situacija primjer važnosti uzimanja što većeg mogućeg broja pouzdanih podataka u obzir, kao i oslanjanje na ostale pristupe i metode simulacije krivulja.



**Slika 4-2. Druga simulacija zvučne karotaže neuronskom mrežom za bušotinu B-1**

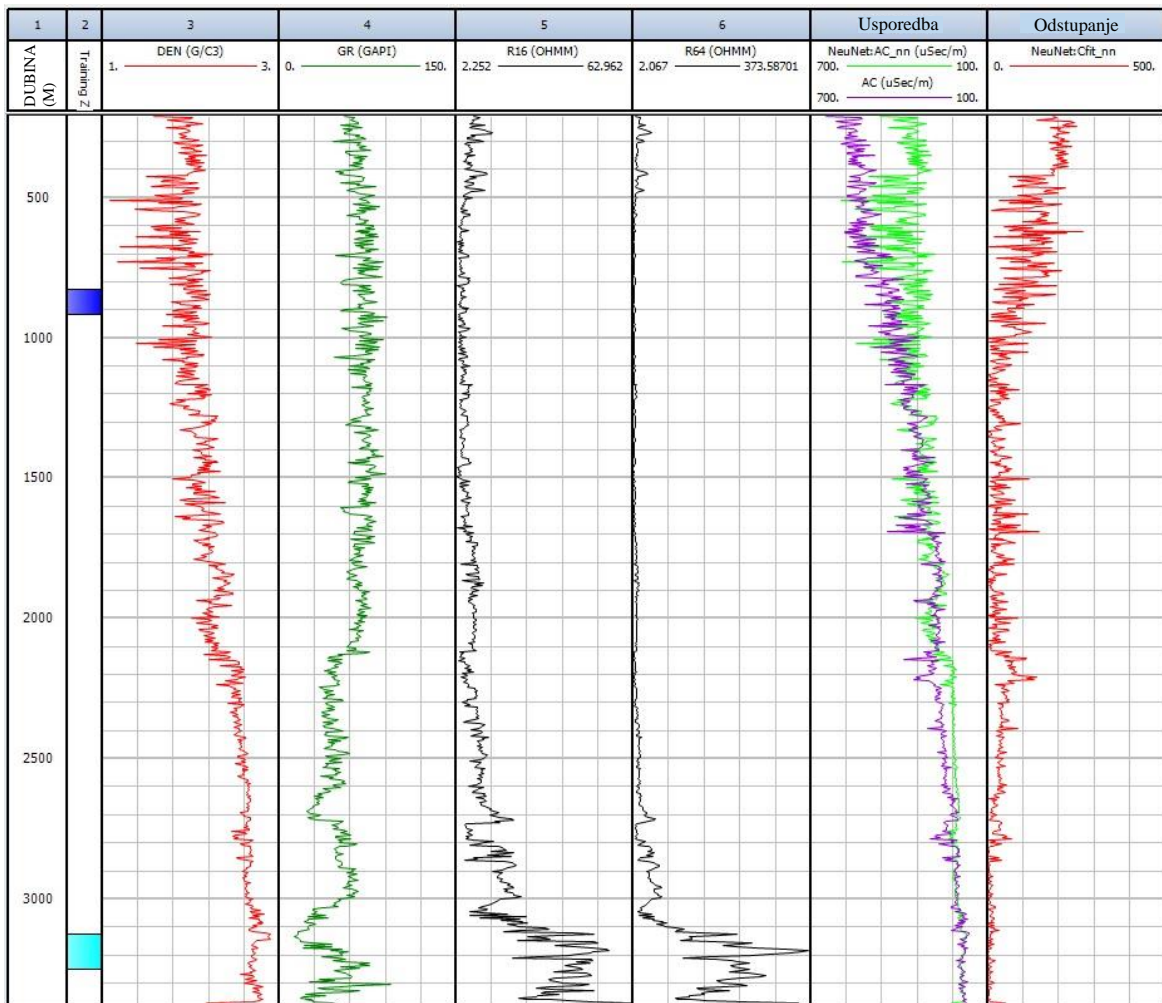
Nadalje, uz zone uvježbavanja u bušotini B-1, u bušotini B-2 odabrane su dvije zone (slika 4-3). Dvije relativno uske zone dale su vrlo dobre rezultate za obje bušotine, a što je bilo teško postići s obzirom da uvježbavanjem jedne bušotine, promjene (simulacije) se automatski primjenjuju na obje.



Slika 4-3. Prva simulacija neuronskom mrežom za bušotinu B-2

U intervalu gdje je mjerena kompenzirana neutronska karotaža (CN) uočava se vrlo dobro preklapanje mjerene (AC) i simulirane (AC<sub>nn</sub>) krivulje. U najplićem dijelu krivulje imaju prilično različite vrijednosti, iako su mjestimično istog trenda. Na razliku su sigurno utjecale velike varijacije gustoće naslaga kao što je vidljivo na krivulji karotaže gustoće (DEN). S povećanjem dubine, preklapanje je sve povoljnije.

Kao i u bušotini B-1, ukoliko se krivulja neutronske karotaže (CN) ne koristi za uvježbavanje neuronske mreže, dobije se nešto nepovoljniji rezultat (slika 4-4).

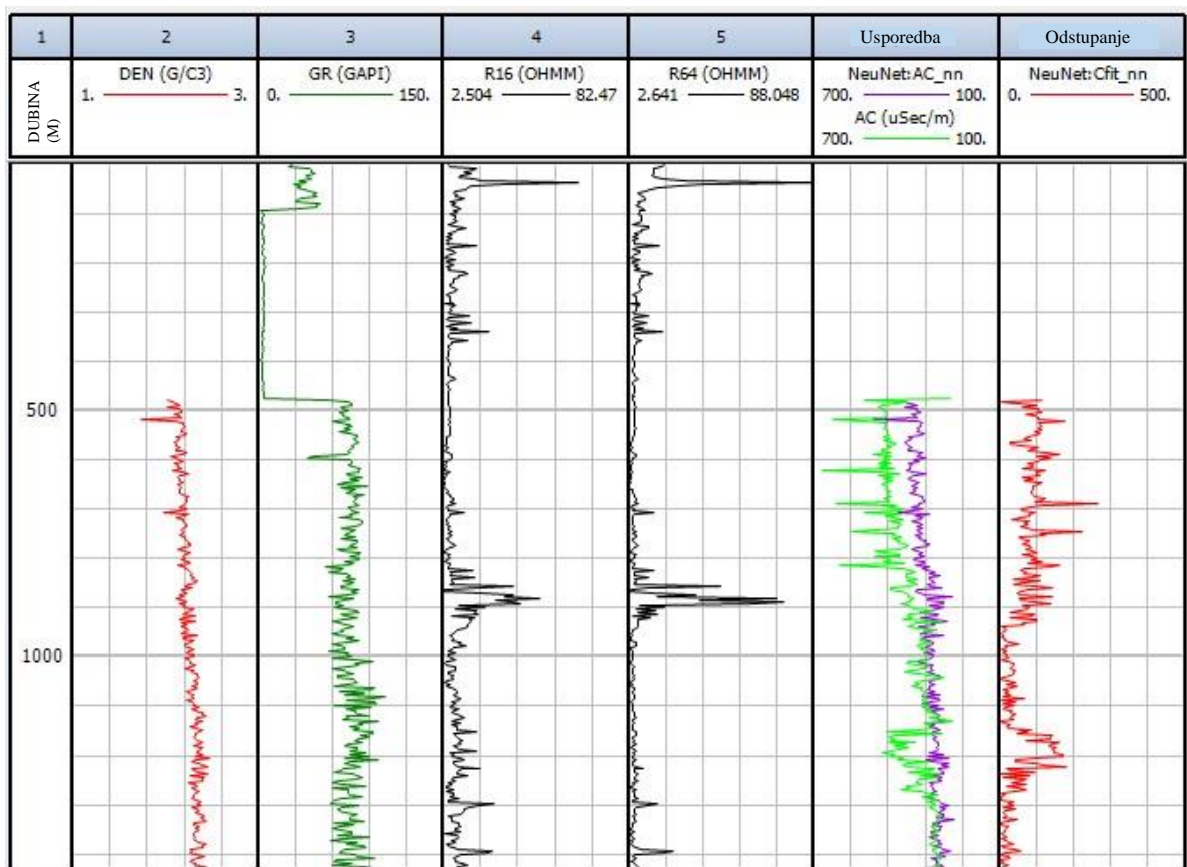


Slika 4-4. Druga simulacija zvučne karotaže neuronskom mrežom za bušotinu B-2

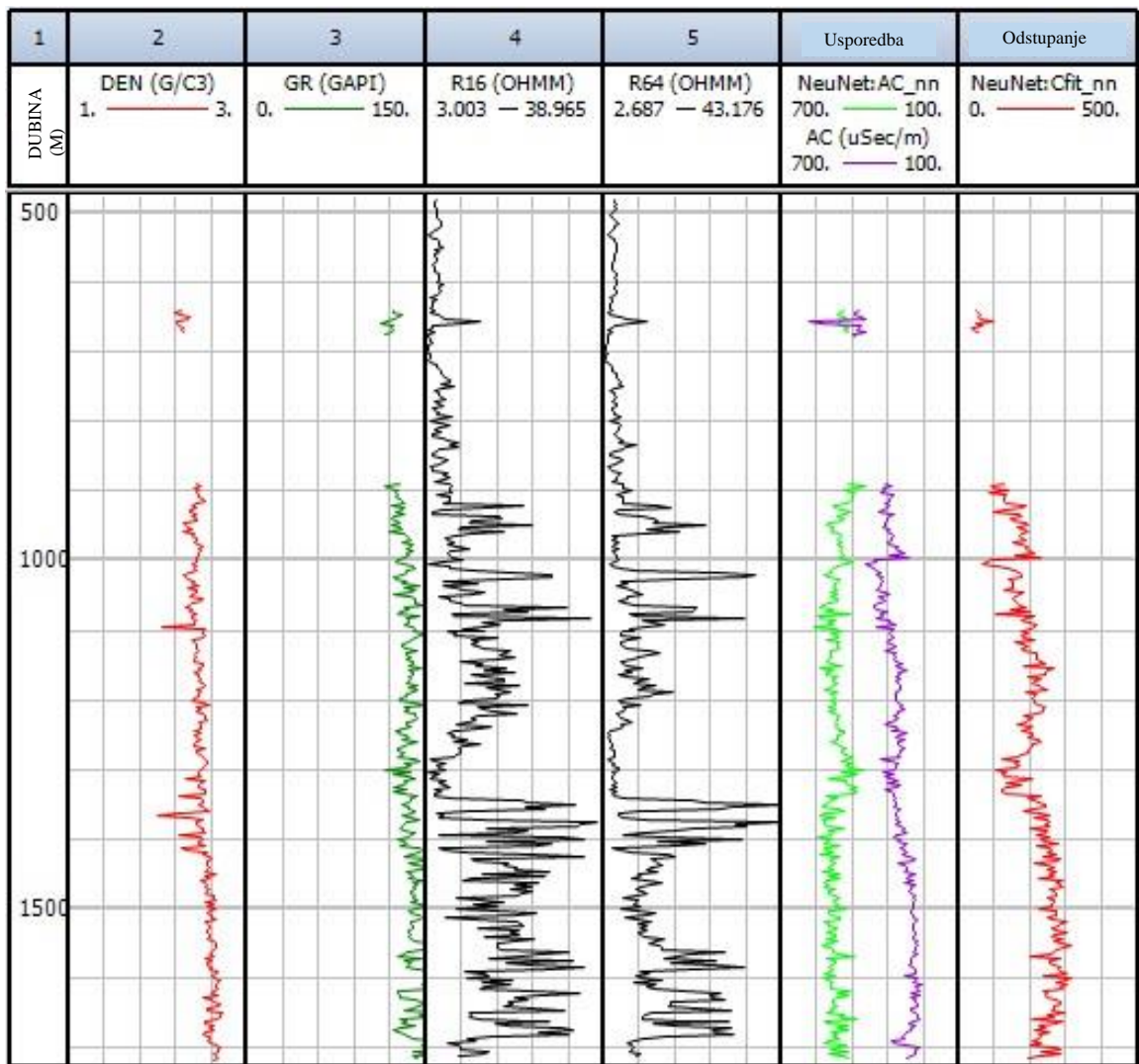
Kao i u prethodnom modelu, simulirana i mjerena krivulja AC pokazuju relativno dobro preklapanje u dubljim intervalima, a u plićim su karakterizirane velikim odstupanjima, iako uglavnom istim trendovima. Može se zaključiti da je, unatoč necjelovitosti, neuronska karotaža (CN) kao ulazni podatak ipak dala simuliranu zvučnu karotažu sličniju mjerenoj. Vrijednosti gustoće naslaga dobivene karotažom gustoće imaju vrlo veliku varijabilnost u plićim intervalima te daju veliku težinu u simulaciji, a može se zaključiti i da je litološki sastav u toj zoni vrlo kompleksan, što samo po sebi uvijek zahtijeva detaljniji pristup od ovog.

Neuronska mreža koja je uvježbana na podacima bušotina B-1 i B-2, u varijanti bez CN kao ulazne krivulje, korištena je za simulaciju zvučne karotaže u bušotinama B-3 (slika 4-5), B-4 (slika 4-6) i B-5 (slika 4-7). Na dijagramima je vidljiva značajna razlika u vrijednostima simulirane i mjerene zvučne karotaže, no na dijelovima s izraženim promjenama ipak su slične. Dio tankih slojeva se, prema tome, može razlučiti, a posebno uz

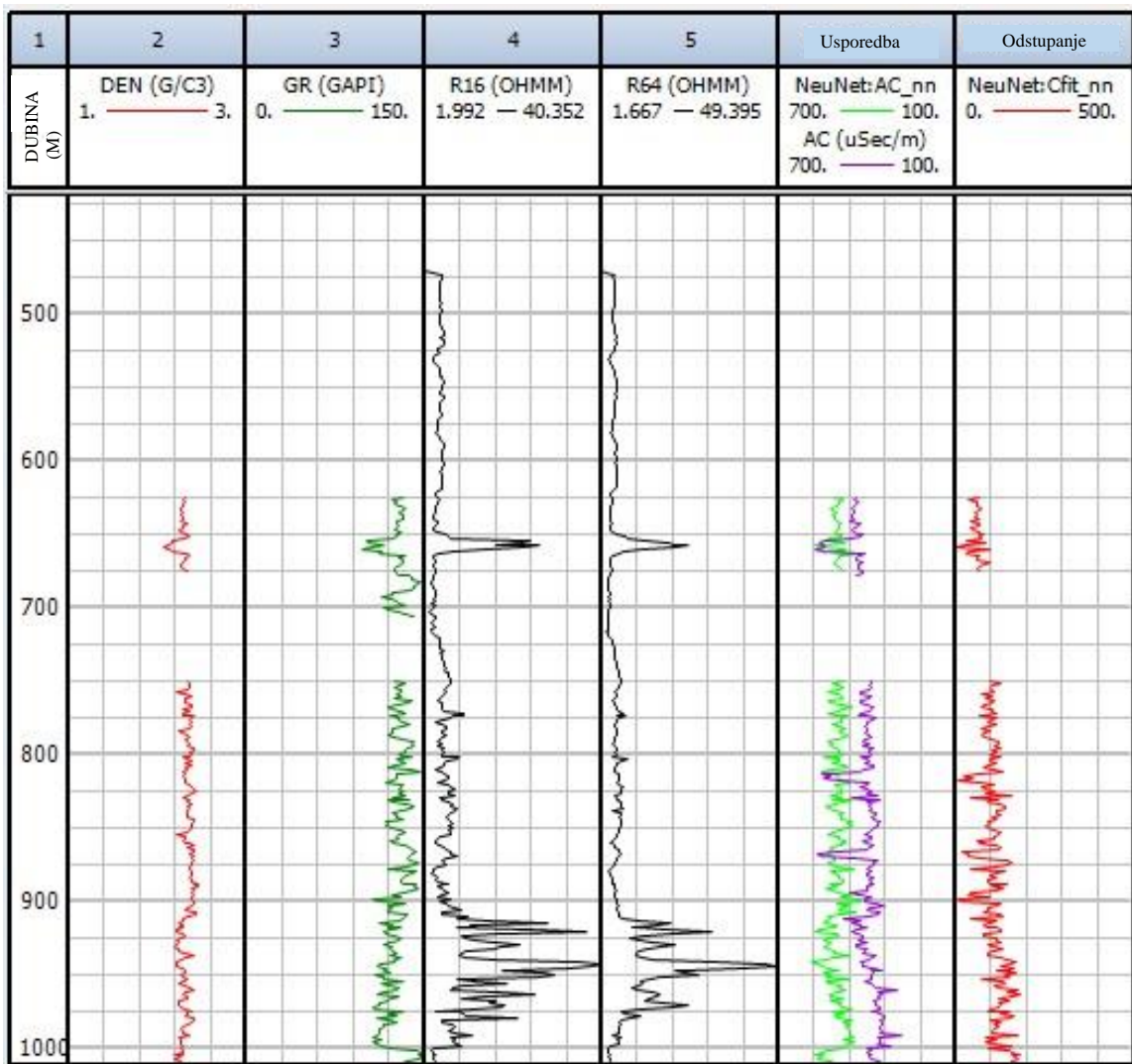
pomoć drugih krivulja. Na skoro svim mjestima gdje se uočavaju trendovi suprotnog predznaka u tankim intervalima usporedbom s tablicom krovina ležišta, nalaze se slojevi zasićeni ugljikovodicima koji su definitivno uzrok izraženih "pikova", odnosno smanjenja brzine prolaska vala, a koje neuronska mreža ne može uračunati u model, odnosno barem ne s podacima kojima raspolažemo. U bušotinama B-4 i B-5 u plićim zonama karotaža gustoće, prirodne gama-radioaktivnosti te zvučna karotaža ciljano su izvođene na kratkom intervalu iz razloga što se na njima nalaze vrlo bitna naftna i plinska ležišta serije "p" kategorije A. Naslage u tom intervalu pretežito su sitnozrnasti do srednjozrnasti mjestimično zaglinjeni pješčenjaci s proslojcima gline i lapora (Žužul et al., 2011).



Slika 4-5. Simulacija zvučne karotaže neuronskom mrežom za bušotinu B-3



Slika 4-6. Simulacija zvučne karotaže neuronskom mrežom za bušotinu B-4



Slika 4-7. Simulacija zvučne karotaže neuronskom mrežom za bušotinu B-5

### 4.3. Simulacija metodom multilinearne regresije

Bušotine B-1 i B-2 odabrane su kao reprezentativne za simulaciju ostalih krivulja zvučne karotaže iz razloga što je u njima nabušeno i prepoznato pet regionalnih EK-markera ( $\lambda$ ,  $\psi$ ,  $I_{xp}$ ,  $H_p$  i  $R\phi$ ) te su im krivulje karotaže gustoće i zvučne karotaže kontinuirane što je bitno kod kreiranja ulaznog modela.

Ove dvije bušotine, unatoč tome što lokacijom na polju i nisu toliko blizu, koristit će se za stvaranje modela iz razloga što jedine imaju kontinuirani slijed podataka potrebnih za definiranje linearne veze kako bi se dobio model primjenjiv za ostale bušotine.

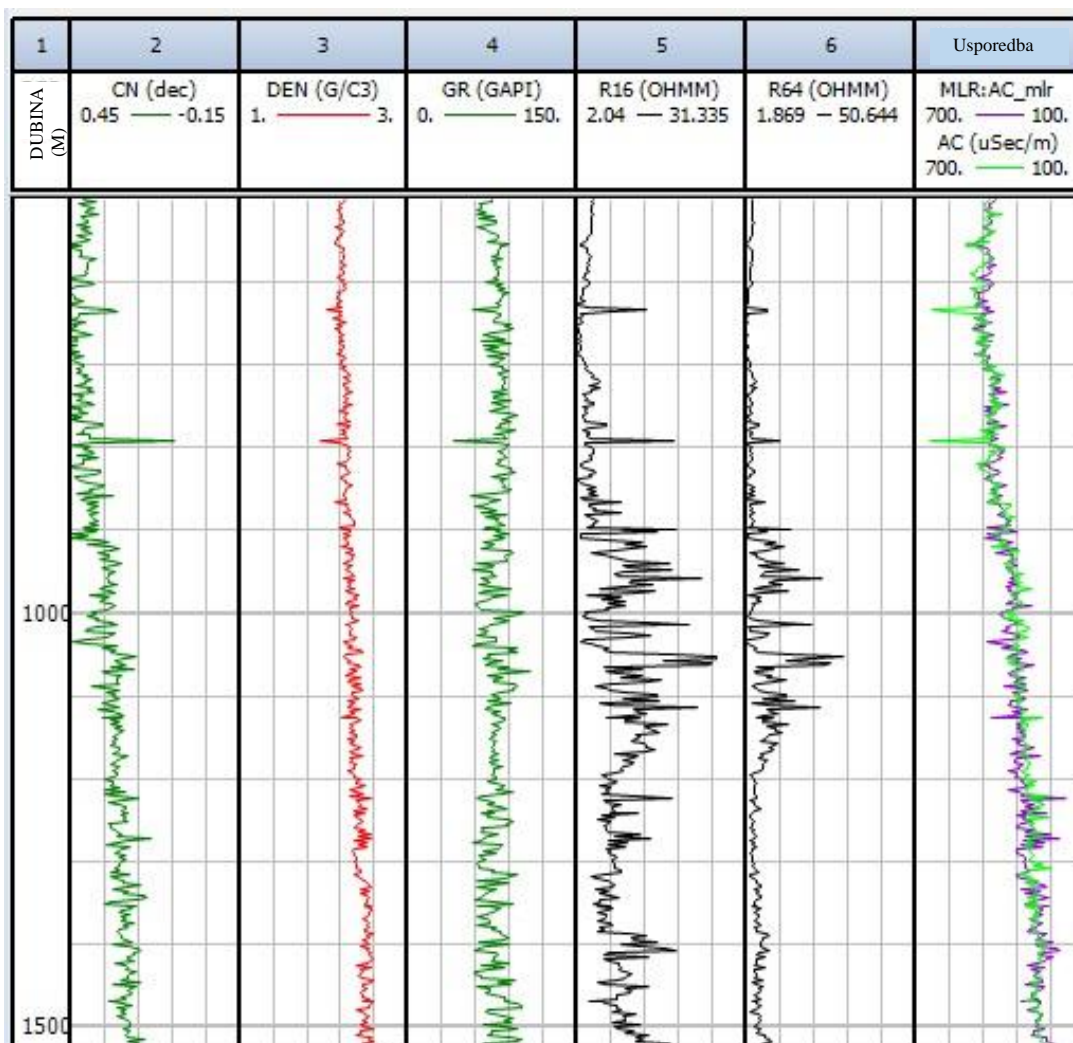
U dijaloškom okviru *Multi-Linear Regression* programa *Interactive Petrophysics* (slika 4-8) odabire se jedna krivulja koju će se simulirati modelom, u našem slučaju zvučna karotaža (*AC*), dok će ostale krivulje - kompenzirana neutronska karotaža (*CN*), karotaža gustoće (*DEN*), prirodne gama-radioaktivnosti (*GR*), krivulje električne otpornosti male normale (*R16*) te velike normale (*R64*) služiti kao ulazni podaci za dobivanje samog modela. Postavljanjem kvačice za opciju *Use Well for Model Build* bušotina će se koristiti za dobivanje korelacijskog modela, a opcijom *Use Well for Model Run* dobiveni će model simulirati krivulju zvučne karotaže izvodeći transformacije ulaznih krivulja s koeficijentima dobivenim pomoću komponente *Model Build*.



Multi-Linear Regression				
Input		Discriminators	Create Regression Model	Run Model
	Use	Default	Log	Well
	Curve	Name		1
Well	<input type="checkbox"/>			(3) B-139
Curve to Predict	<input checked="" type="checkbox"/>	AC		AC
Input Curve 1	<input checked="" type="checkbox"/>	CN		CN
Input Curve 2	<input checked="" type="checkbox"/>	DEN		DEN
Input Curve 3	<input checked="" type="checkbox"/>	GR		GR
Input Curve 4	<input checked="" type="checkbox"/>	R 16		R 16
Input Curve 5	<input checked="" type="checkbox"/>	R64		R64
Input Curve 6	<input type="checkbox"/>			
Input Curve 7	<input type="checkbox"/>			
Input Curve 8	<input type="checkbox"/>			
Input Curve 9	<input type="checkbox"/>			
Input Curve 10	<input type="checkbox"/>			
Input Curve 11	<input type="checkbox"/>			
Input Curve 12	<input type="checkbox"/>			
Input Curve 13	<input type="checkbox"/>			
Input Curve 14	<input type="checkbox"/>			
Input Curve 15	<input type="checkbox"/>			
Input Curve 16	<input type="checkbox"/>			
Input Curve 17	<input type="checkbox"/>			
Input Curve 18	<input type="checkbox"/>			
Input Curve 19	<input type="checkbox"/>			
Input Curve 20	<input type="checkbox"/>			
Use Well	<input type="checkbox"/>	for Model Build		<input checked="" type="checkbox"/>
Top Interval		for Model Build		500
Bottom Interval		for Model Build		1525
Use Well	<input type="checkbox"/>	for Model Run		<input checked="" type="checkbox"/>
Top Interval		for Model Run		500
Bottom Interval		for Model Run		1525
Show Plot		for Model Run		Show Plot
Discriminator	<input type="checkbox"/>	Crv 1		
Discriminator	<input type="checkbox"/>	Crv 2		

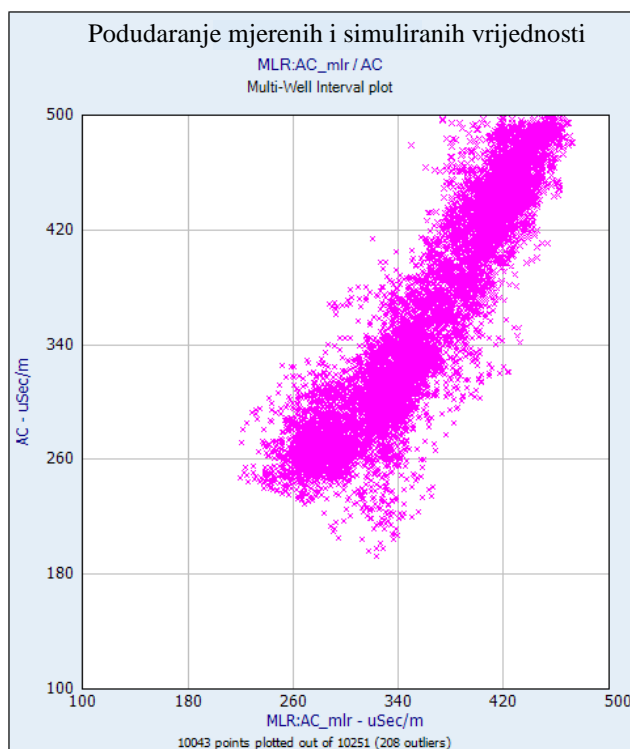
Slika 4-8. Izbornik modula multilinearne regresije (*Multi-Linear Regression*)

Za odabranu bušotinu (slika 4-9) prikazuju se ulazni podatci zajedno s novom, simuliranom krivuljom zvučne karotaže (AC\_mlr; zelena boja) pored mjerene (AC; ljubičasta boja).



Slika 4-9. Prva simulacija zvučne karotaže multilinearom regresijom za bušotinu B-1

Na Slici 4-9 možemo vidjeti relativno zadovoljavajuće preklapanje simulirane i mjerene krivulje zvučne karotaže, osim kod izraženih većih amplituda (na dubinama oko 640 m i 790 m). Odstupanja u ovom slučaju nisu veliki problem kod interpretacije s obzirom da na raspolaganju imamo još pet drugih krivulja koje pokazuju jednake trendove na mjestima većih otklona mjerene krivulje, a koji na simuliranoj krivulji nisu zabilježeni.



**Slika 4-10. Dijagram rasipanja za bušotinu B-1 pri usporedbi snimljene zvučne karotaže (AC) i simulirane (AC\_mlr)**

Dijagram rasipanja (eng. *scatter-plot*) na slici 4-10 grafički prikazuje gdje su koncentrirane točkaste vrijednosti, odnosno ulazni podaci te možemo vidjeti radi li se o pozitivnoj ili negativnoj linearnoj vezi. Što je oblak točkastih vrijednosti gušći, uži i manje dispergirani možemo reći da su podaci više linearno ovisni. Dodatne informacije koje on sadrži jesu broj ekstremnih vrijednosti (eng. *outliers*), broj nul-vrijednosti (eng. *null*). Ekstremne vrijednosti jesu one koje statistički znatno variraju od medijana, a nemaju čvrstu međusobnu vezu i uklonjene su iz postupka korelacije jer bi na model utjecali nepovoljno. Nul-vrijednosti (nisu jednake nuli) predstavljaju nepostojeći podatak, tj. dio intervala u kojem je došlo do pogreške u mjerenju, a u slučaju bušotine B-1 ih nema.

Broj podataka: 10251		
Koeficijent korelacije (R <sup>2</sup> ): 0.82095		
Ulazna krivulja	Koeficijent	Normalizirani koeficijent
Konstanta	1330.68407535	0.52509823
CN	153.93924246	0.01994341
DEN	-443.86610775	0.41040848
GR	0.58124922	0.01798932
R16	-6.06087703	0.01867608
R64	3.75719884	0.00788445

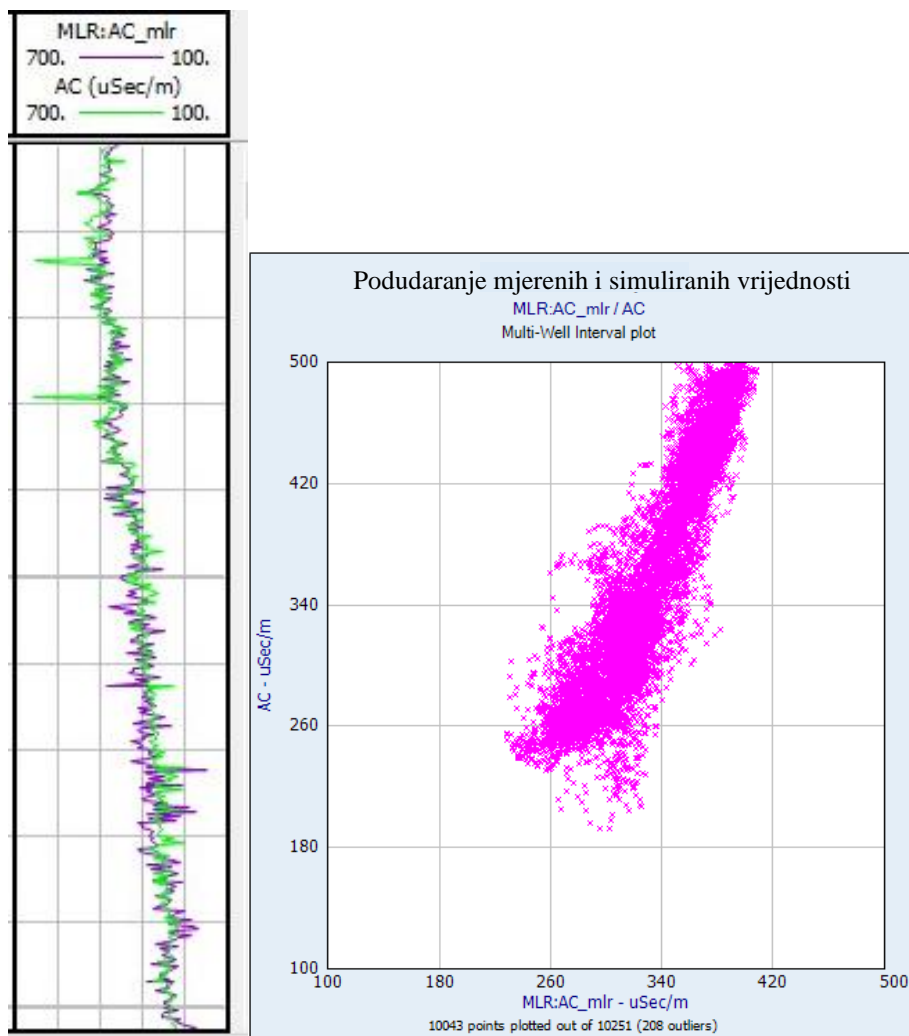
**Slika 4-11. Koeficijenti regresijskog modela za bušotinu B-1**

Tablica na slici 4-11 pokazuje težinske faktore koji su dodijeljeni pojedinim ulaznim podacima, zajedno s normaliziranim koeficijentima koji govore koliko koja krivulja utječe na model. Što je koeficijent bliži vrijednosti 1 ima veću težinu na dobiveni rezultat, i suprotno manju težinu ako je bliže nuli. U slučaju bušotine B-1, karotaža gustoće ima najveći utjecaj na linearnu vezu.

Multilinearnom regresijom za bušotinu B-1 dobivena je formula kojom je zvučna karotaža simulirana pomoću ulaznih podataka koje smo odabrali:

$$AC_{mlr} = 1330,68407535 + (153,93924246 \cdot CN) - (443,86610775 \cdot DEN) + (0,58124922 \cdot GR) - (6,06087703 \cdot R16) + (3,75719884 \cdot R64)$$

S obzirom da u većini bušotina kompenzirana neutronska karotaža (*CN*) nije izvedena, osim u B-2 i B-6 na jednom dijelu, ona neće biti korištena kao ulazni podatak za simuliranje zvučne karotaže u svim bušotinama. Kako bismo dobili regresijski model za bušotinu B-1 bez *CN* kao ulazne krivulje, potrebno ju je isključiti iz skupa ulaznih podataka prije generiranja modela (slika 4-12). Simulirana zvučna karotaža (ljubičasta krivulja na slici 4-12) ima sličan trend i oblik kao i u slučaju kad je kao ulazni podatak korištena kompenzirana neutronska karotaža (*CN*), koja je u prvom modelu imala nizak normalizirani koeficijent 0.0199.



Broj podataka:

Koeficijent korelacije ( $R^2$ ):

Ulazna krivulja	Koeficijent	Normalizirani koeficijent
Konstanta	1507.22775138	0.53388111
DEN	-500.79018203	0.41564276
GR	0.77622624	0.02156457
R16	-7.48414769	0.02070106
R64	4.3587801	0.00821055

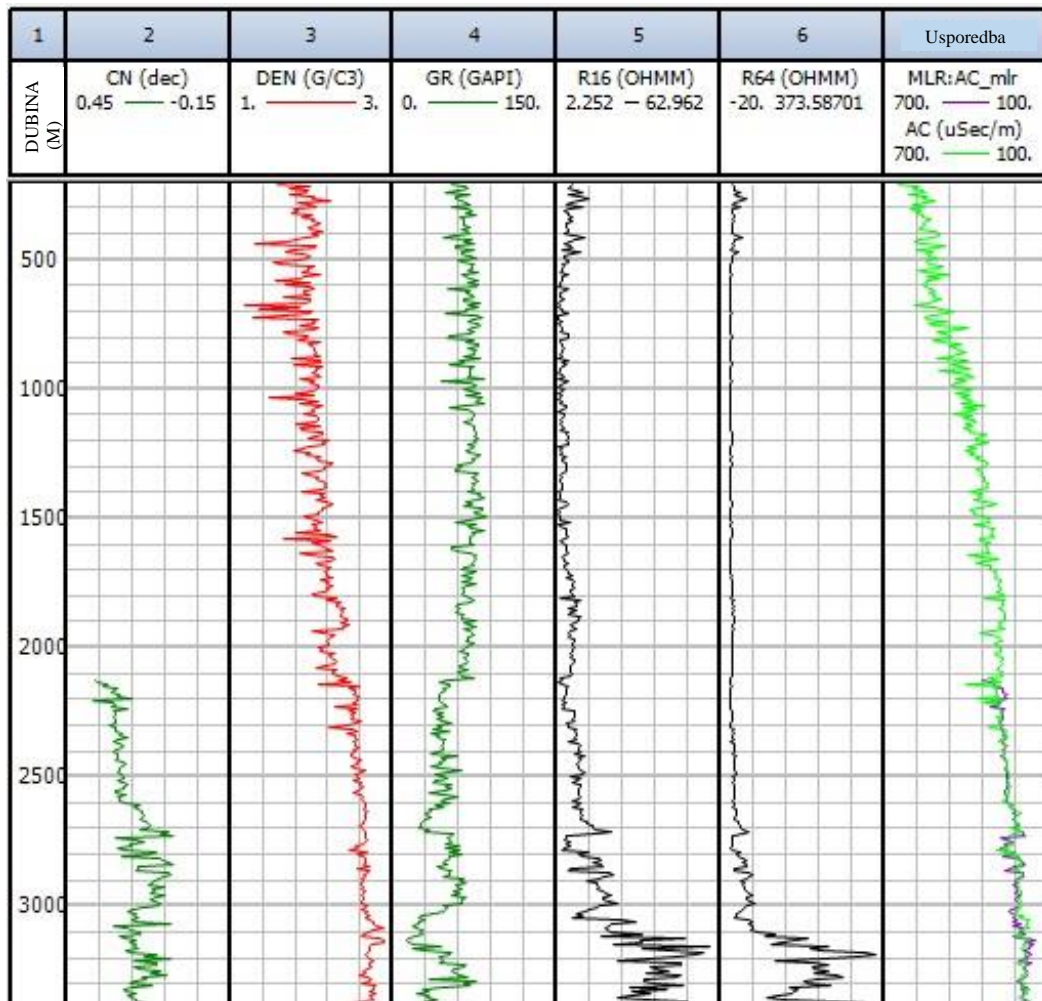
Slika 4-12. Druga simulacija multilinearom regresijom za bušotinu B-1

Uočljivo je da krivulja *DEN* ima nešto veći utjecaj (koeficijent) kod ovog modela u odnosu na prošli. Također, koeficijent korelacije također je niži u odnosu na prošli model, što daje zaključiti da *CN* nije doprinijela preciznosti modela, a dijagram rasipanja vrlo je sličan onom prethodnom.

Formula kojom je opisan ovaj model glasi:

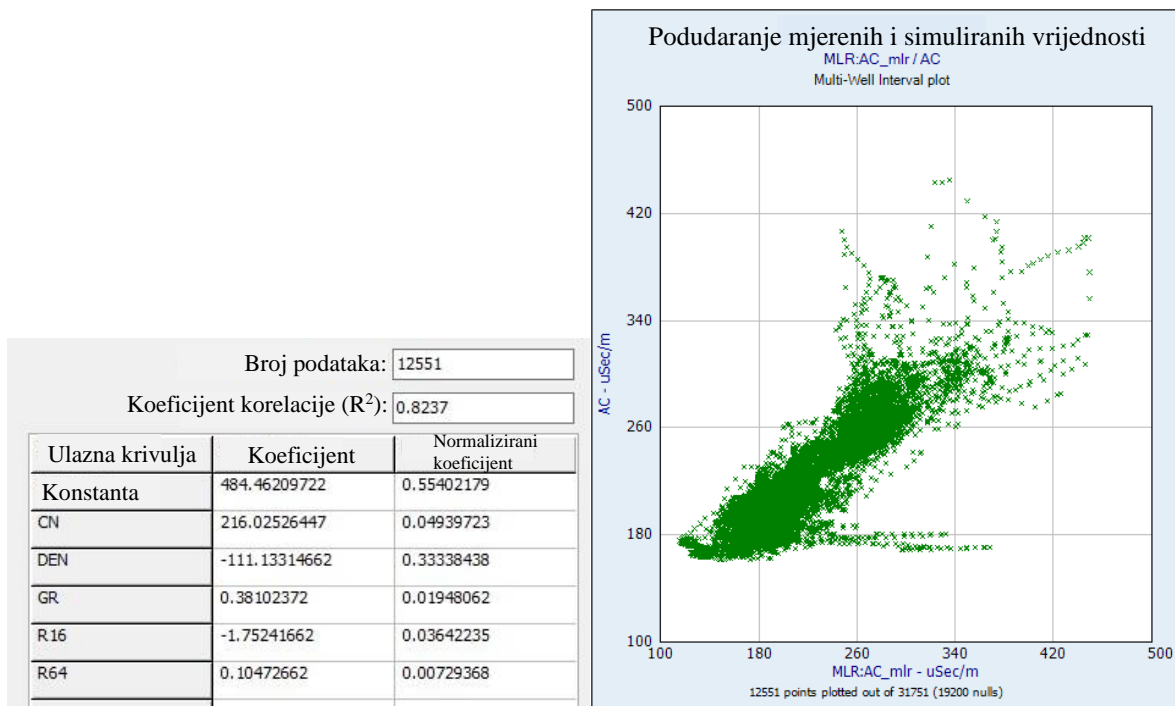
$$AC_{mlr} = 1507,22775138 - (500,79018203 * DEN) + (0,77622624 * GR) - (7,48414769 * R16) + (4,3587801 * R64)$$

Jednak postupak napravljen je za bušotinu B-2, prvo uključivši krivulju neutronske karotaže u izračun modela, a zatim bez nje.



Slika 4-13. Prva simulacija zvučne karotaže multilinearom regresijom za bušotinu B-2

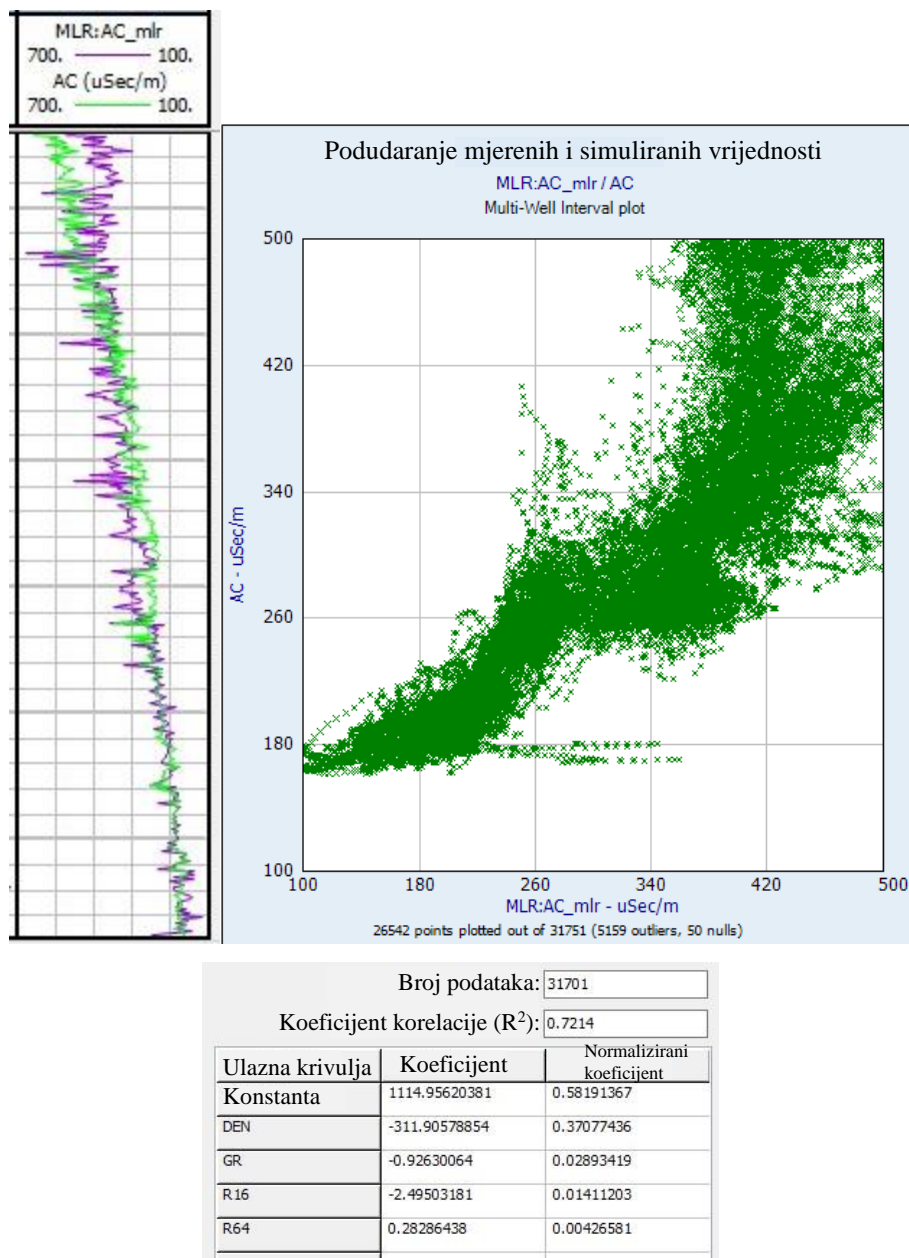
S obzirom da bušotina B-2 ima neutronska karotažu mjerenu samo u donjoj polovici kanala bušotine, krivulja će biti simulirana samo duž tog dijela (slika 4-13). Primjećuje se vrlo dobro preklapanje izračunate i mjerene krivulje, uključujući i promjene koje odgovaraju tankim slojevima povećane gustoće i otpornosti, vjerojatno laporima.



**Slika 4-14. Tablica koeficijenata i dijagram raspršenosti za prvu simulaciju u bušotini B-2**

Dijagram na Slici 4-14 uočljiva je manja raspršenost podataka, no ipak s relativno visokim koeficijentom korelacije, većim od onog u bušotini B-1. Nul-vrijednosti je 19 200, gotovo trećina svih točaka uzorkovanja, a razlog tome je mjerena neutronska karotaža (CN) samo na manjem dijelu intervala, a koji je jedini uzet u obzir pri izračunu modela.

Ukoliko izostavimo nepotpunu krivulju CN iz procesa izračuna modela, dobit ćemo simuliranu krivulju zvučne karotaže za cijeli kanal bušotine (slika 4-15).

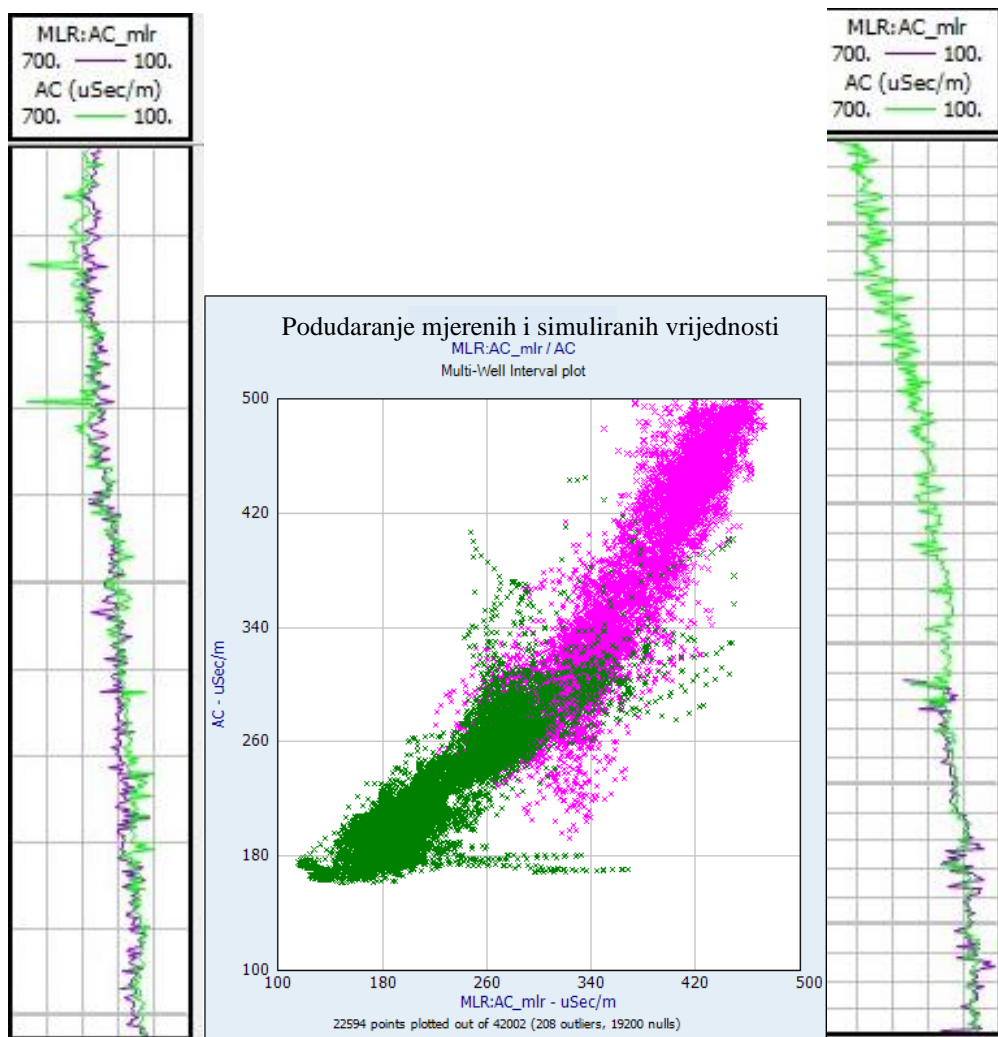


Slika 4-15. Druga simulacija zvučne karotaže multilinearom regresijom za bušotinu B-2

Međutim, u ovom slučaju simulirana i mjerena krivulja primjetno se razlikuju, naročito u njenom gornjem dijelu. Uzrok tome može biti u manjku podataka o gustoći (s obzirom da nije korišten *CN*), kao što je i opisano u prethodnom poglavlju.

Najviši koeficijent korelacije za bušotine B-1 i B-2 (slika 4-17) dobije se kad se krivulje karotaže gustoće, kompenzirane neutronske karotaže, prirodne gama-radioaktivnosti i električne otpornosti iz obje bušotine koriste kao ulazni podaci za dobivanje modela (Slika 4-16).



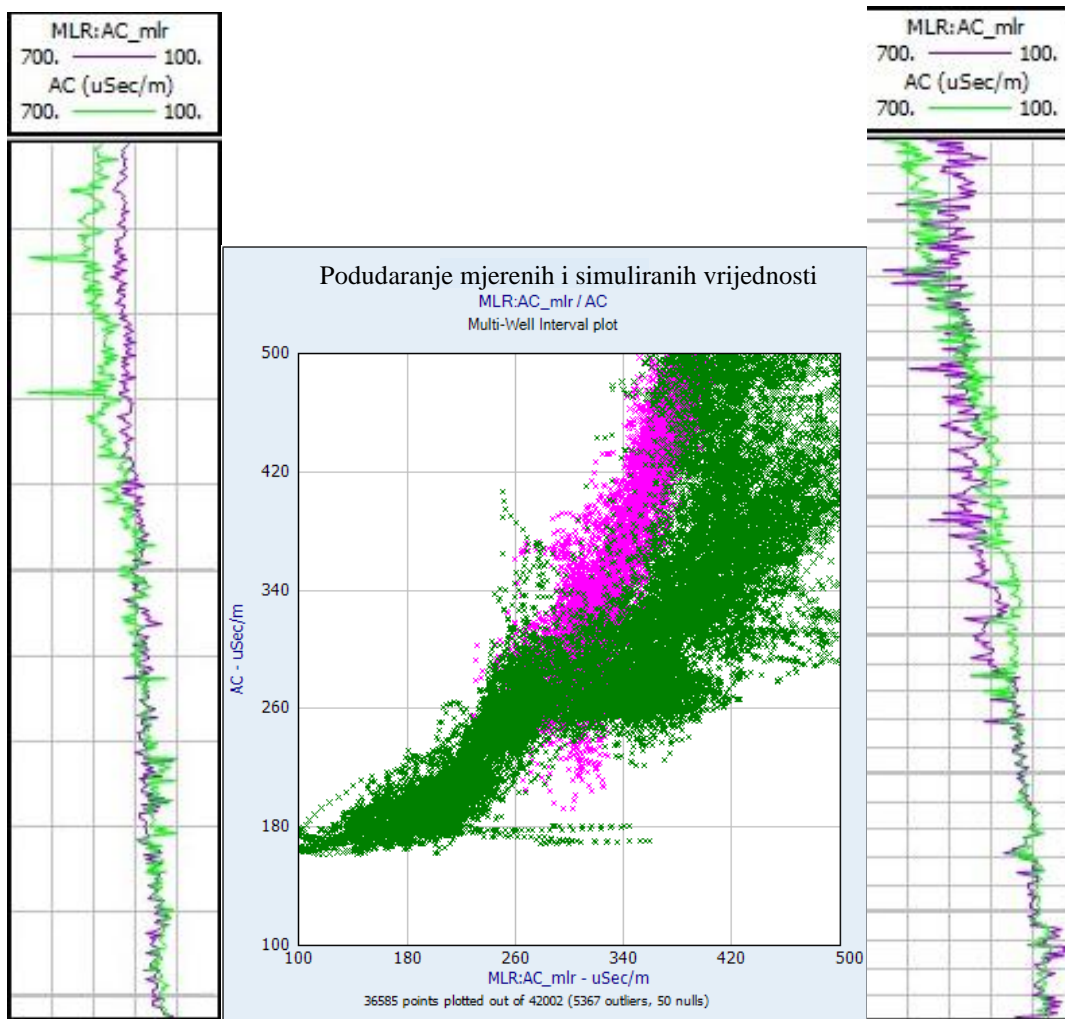


Slika 4-16. Prva simulacija multilinearom regresijom za bušotine B-1 (lijevo) i B-2 (desno); zelene točke na dijagramu prikazuju podatke iz bušotine B-1, a ljubičaste iz B-2

Broj podataka:	22802	
Koeficijent korelacije ( $R^2$ ):	0.87607	
Ulazna krivulja	Koeficijent	Normalizirani koeficijent
Konstanta	862.76038081	0.52162542
CN	334.04622562	0.05203795
DEN	-266.16620695	0.4018774
GR	0.26056444	0.00943153
R.16	-1.39380112	0.0113885
R64	0.16761077	0.00363929

Slika 4-17. Tablica koeficijenata za model dobiven bušotinama B-1 i B-2

Model dobiven odabirom ostalih ulaznih krivulja iz B-1 i B-2 bez korištenja CN kao ulaznog podatka nema optimalan koeficijent (Slika 4-18), no prema Chadockovoj ljestvici (Lunt, 2013) njihova veza i dalje se može definirati kao jaka (Slika 4-19):

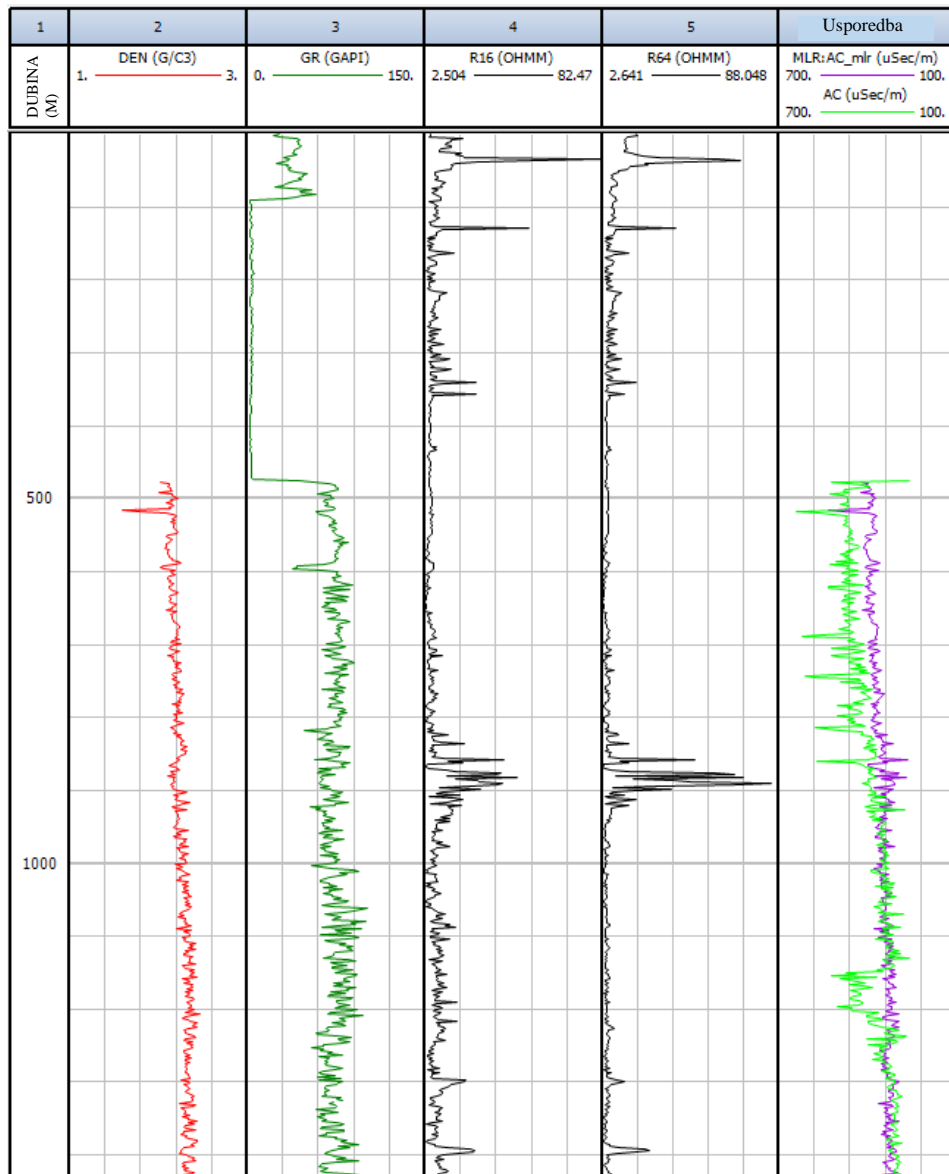


Slika 4-18. Druga simulacija multilinearom regresijom za bušotine B-1 (lijevo) i B-2 (desno)

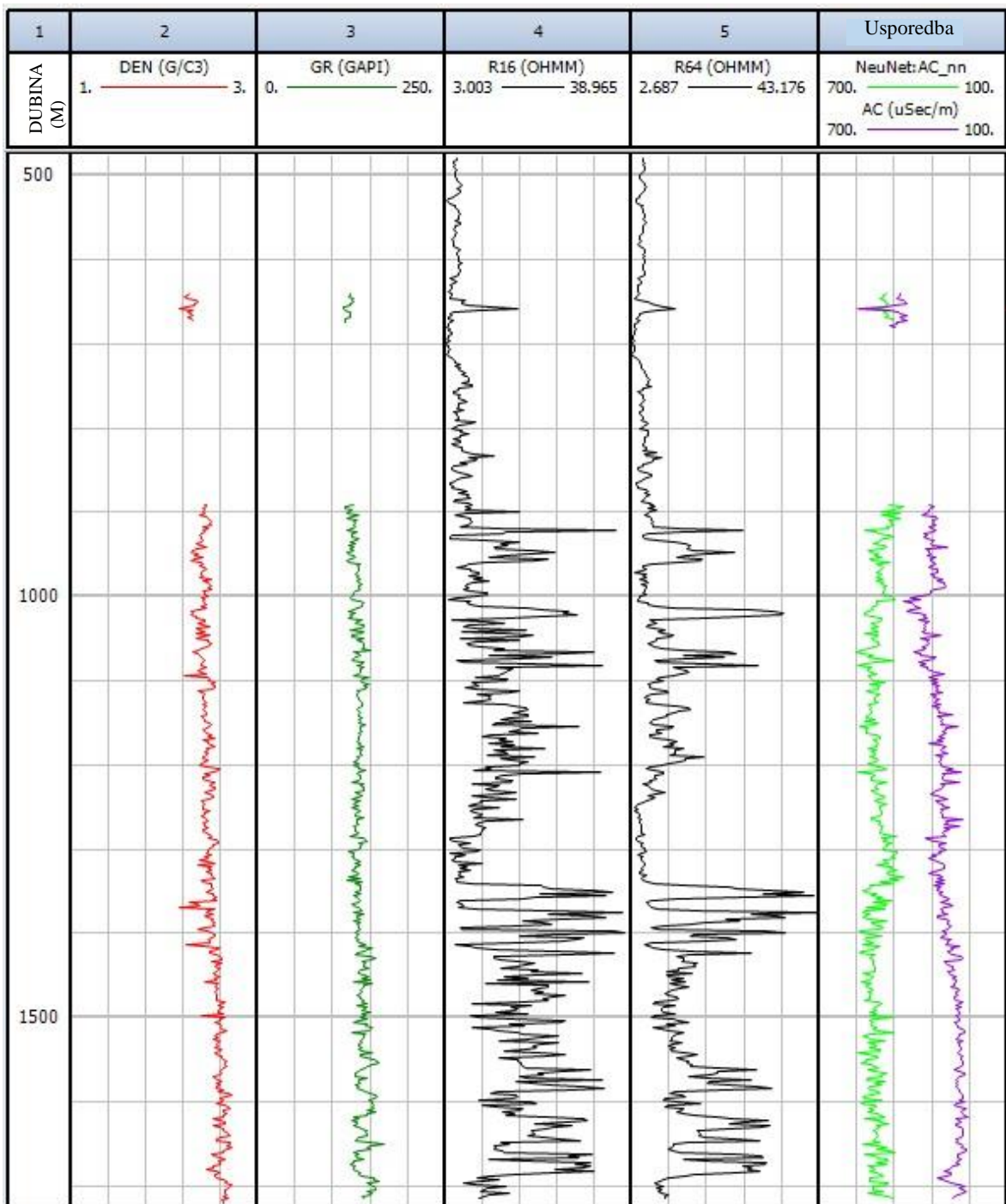
Broj podataka:		41952
Koeficijent korelacije (R <sup>2</sup> ):		0.67824
Ulazna krivulja	Koeficijent	Normalizirani koeficijent
Konstanta	943.4610947	0.58514084
DEN	-263.48269048	0.37481319
GR	0.36182189	0.01444936
R.16	-3.2841276	0.02056623
R64	0.35060227	0.00503038

Slika 4-19. Tablica koeficijenata za model dobiven bušotinama B-1 i B-2, bez CN krivulje

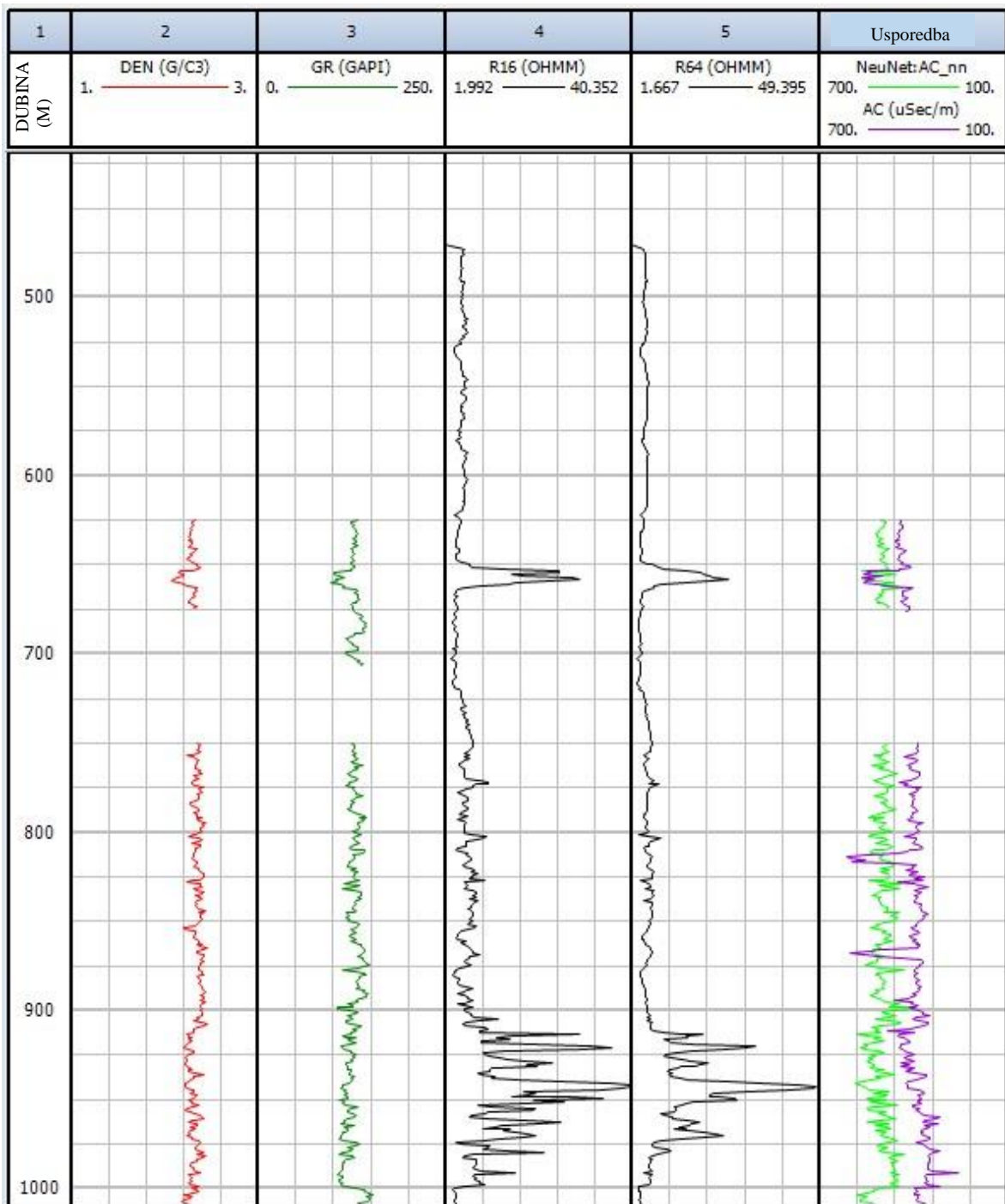
Ovaj model, gdje je dobiven temeljen na podacima iz bušotina B-1 i B-2, koristit će se za simulaciju AC krivulja iz bušotina B-3 (slika 4-20), B-4 (slika 4-21) i B-5 (slika 4-22).



Slika 4-20. Simulacija multilinearom regresijom za bušotinu B-3



Slika 4-21. Simulacija multilinearne regresije za bušotinu B-4

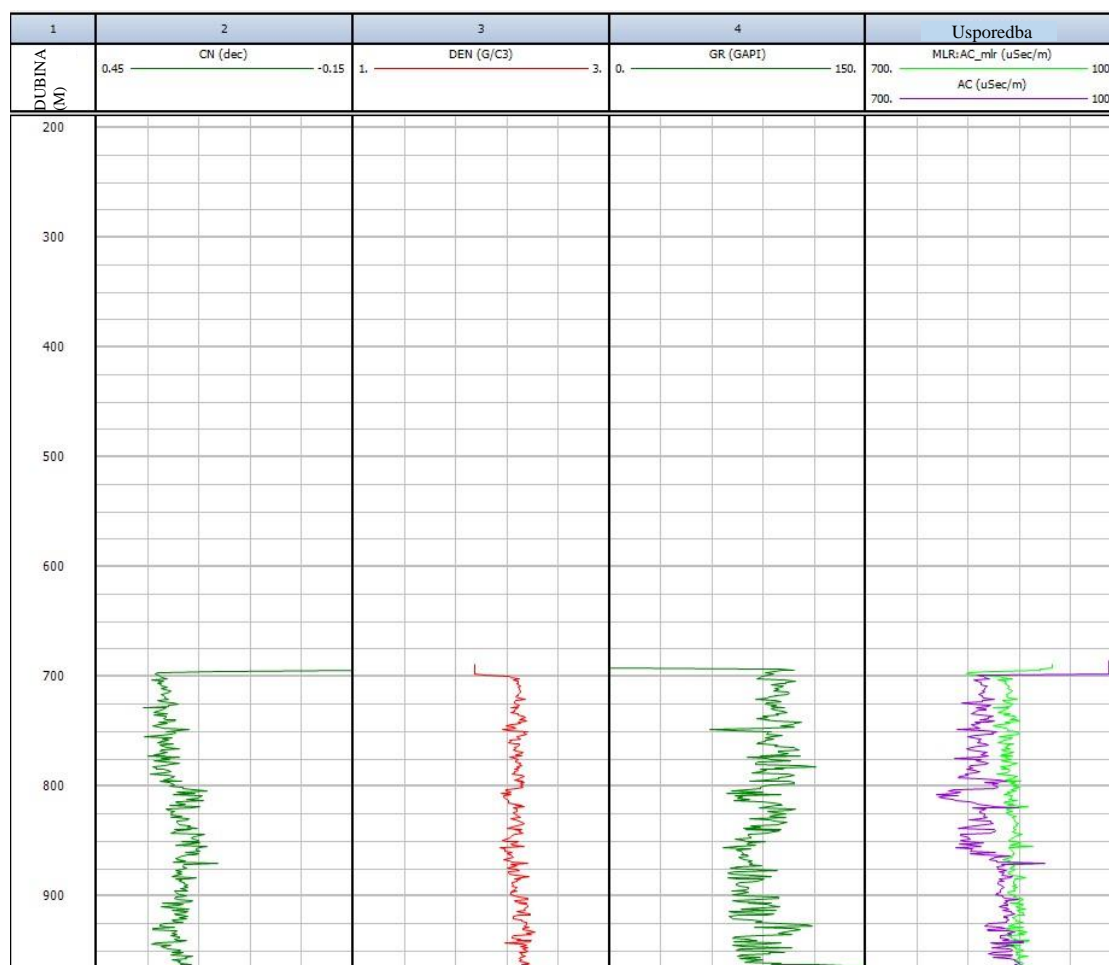


Slika 4-22. Simulacija multilinearom regresijom za bušotinu B-5

Simulirane krivulje AC za bušotine B-3, B-4 i B-5 ne pokazuju optimalno podudaranje s mjenim, iako su ponegdje kod tankih slojeva trendovi sličnog karaktera. Bolji rezultati postignuti su korištenjem neuronske mreže, kao što je i opisano u prethodnom poglavlju.

U bušotini B-6 mjerene su samo karotaža prirodne radioaktivnosti (GR), gustoće (DEN), kompenzirane neutronske karotaže (CN) te otpornosti induktivnom sondom. Za prvi model

koristit će se njene krivulje *GR*, *CN* i *DEN* zajedno s istim krivuljama iz B-1 i B-2 (slika 4-23).



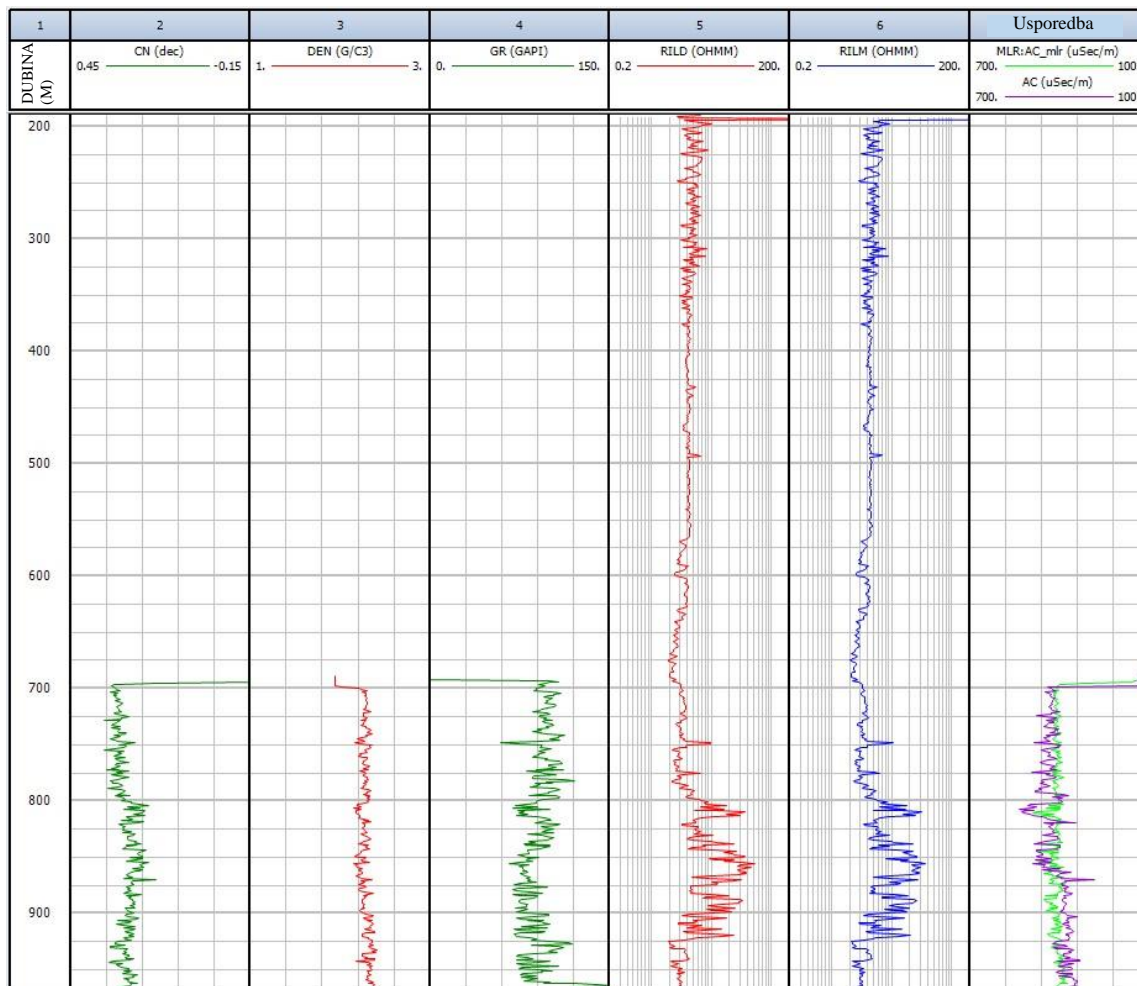
Slika 4-23. Simulacija multilinearom regresijom za bušotinu B-6 modelom od B-1 i B-2

Broj podataka:		22802
Koeficijent korelacije ( $R^2$ ):		0,87273
Ulazna krivulja	Koeficijent	Normalizirani koeficijent
Konstanta	845.04575776	0.51858895
CN	377.8334459	0.05974321
DEN	-268.80865265	0.41196317
GR	0.26414369	0.00970469

Slika 4-24. Tablica koeficijenata za prvu simulaciju u bušotini B-6

Odabrani model daje zadovoljavajuće rezultate, odstupanja između simulirane i mjerene krivulje *AC* jesu značajna, no pikovi su uglavnom istog karaktera i koeficijent korelacije je visok (slika 4-24).

Ukoliko se za bušotinu B-6 koriste samo njeni ulazni podaci - *CN*, *DEN*, *GR*, *RILM* (otpornost mjerena induktivnom sondom srednjeg zahvata) i *RILD* (induktivnom sondom dubokog zahvata), dobit će se model prikazan na Slici 4-25.



Slika 4-25. Simulacija multilinearom regresijom za bušotinu B-6

Broj podataka:		2813
Koeficijent korelacije ( $R^2$ ):		0.49726
Ulazna krivulja	Koeficijent	Normalizirani koeficijent
Konstanta	93.28870318	0.17330105
CN	540.00951933	0.25631742
DEN	46.70195403	0.19687302
GR	0.3133991	0.05256343
RILD	-8.58706382	0.1261404
RILM	14.55401358	0.19480466

Slika 4-26. Tablica koeficijenata za drugu simulaciju u bušotini B-6

Rezultati za dobiveni model lošiji su nego za prehodni, odstupanja jesu manja, no pikovi se uglavnom ne podudaraju. Koeficijent korelacije je nizak (slika 4-26).



## 5. SINTETSKI SEIZMOGRAM

Sintetski seizmogram jednodimenzionalni je, dvodimenzionalni ili trodimenzionalni izračunati seizmogram za pretpostavljeni geološki model. Geološki model je definiran gustoćom pojedinih slojeva i brzinom elastičnih valova u njima, a podaci su dobiveni pomoću bušotinskih mjerenja. Osnovna namjena mu je usporedba s površinskim seizmičkim podacima u svrhu pridruživanja refleksa s 2D ili 3D seizmičkih profila stratigrafskim i litološkim granicama, a koristan je i kod analize poroznosti, posebno kod definiranja ležišnih parametara. Vrlo je značajan u interpretaciji kako bi se uz pomoć stvarnih mjerenih podataka karakteriziralo granice slojeva i povezalno čime su prouzročene određene promjene u seizmičkom signalu. Pojave poput tzv. bijelih mrlja (eng. *Bright spots*) koje su izravna indikacija zasićenja plinom najjasnije se uočavaju upravo na sintetskom seizmogramu. Ulazni podaci, osim površinskih seizmičkih, jesu karotaža gustoće i zvučna karotaža, a njihovim se množenjem dobije akustična impedancija:

$$Z = \rho \cdot V \quad (5-1)$$

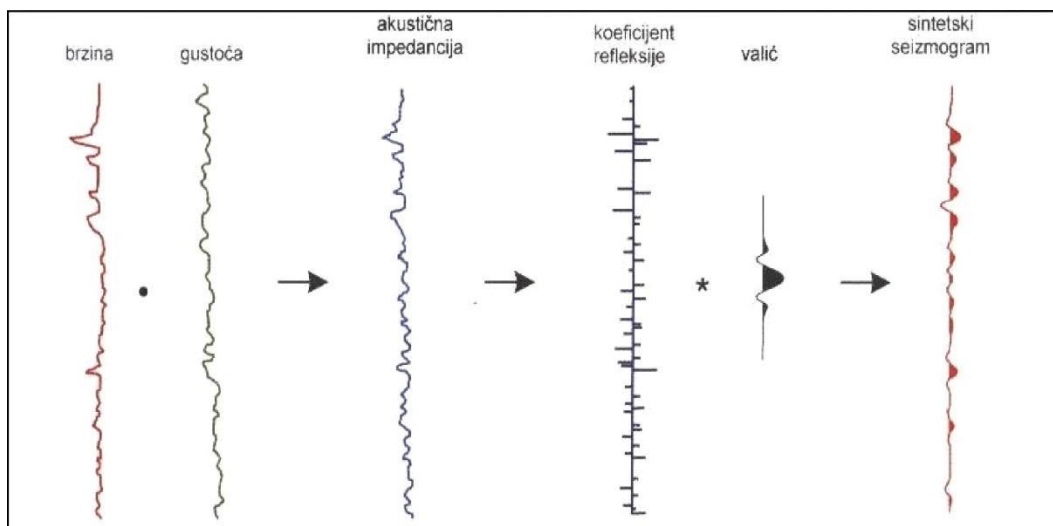
gdje je  $Z$  akustična impedancija,  $\rho$  gustoća stijene, a  $V$  brzina P-vala.

Koeficijent refleksije na granici dvaju slojeva dobije se pomoću njihovih impedancija:

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (5-2)$$

gdje je  $Z_1$  akustična impedancija sloja iznad granice, a  $Z_2$  akustična impedancija dubljeg sloja ispod granice.

Koeficijent refleksije govori nam koliki se udio energije reflektirao od granice, odnosno koliki udio je propušten kroz granicu (Šumanovac, 2012). Konvolucijom koeficijenata refleksije s ulaznim valom za svaki interval uzorkovanja i njihovim zbrajanjem u objedinjeni trag dobije se sintetski seizmogram (Slika 5-1). Ulazni val ili valiće je jednodimenzionalni impuls koji prikazuje oblik refleksa koji se dobije od jednog reflektora s pozitivnim koeficijentom refleksije, u slučaju okomitog upadnog vala. Njegov polaritet i frekvencija nam trebaju biti poznati ili se izdvaja iz samih seizmičkih podataka.

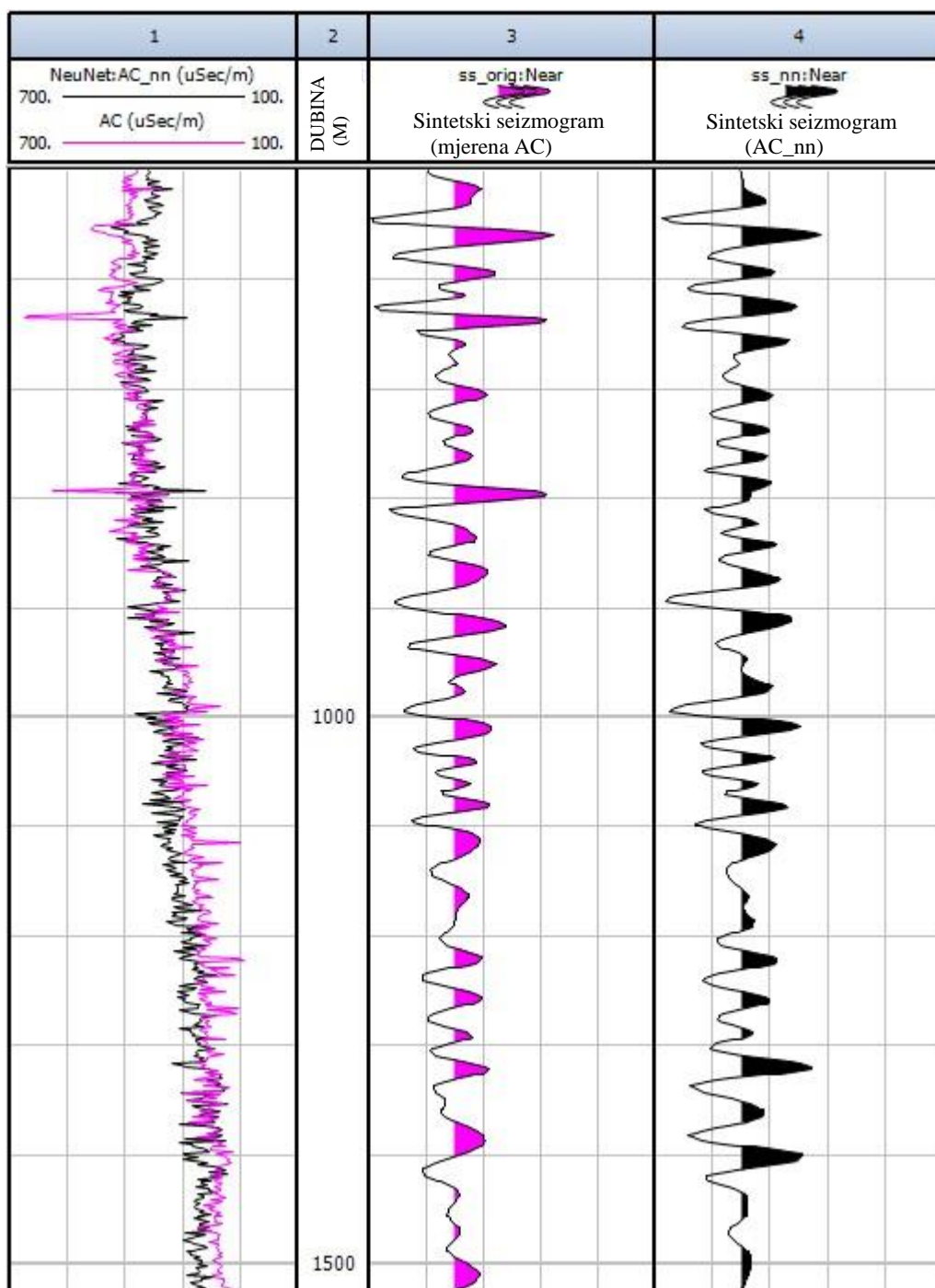


Slika 5-1. Shema izračunavanja sintetskog seizmograma (Orešković, 2017)

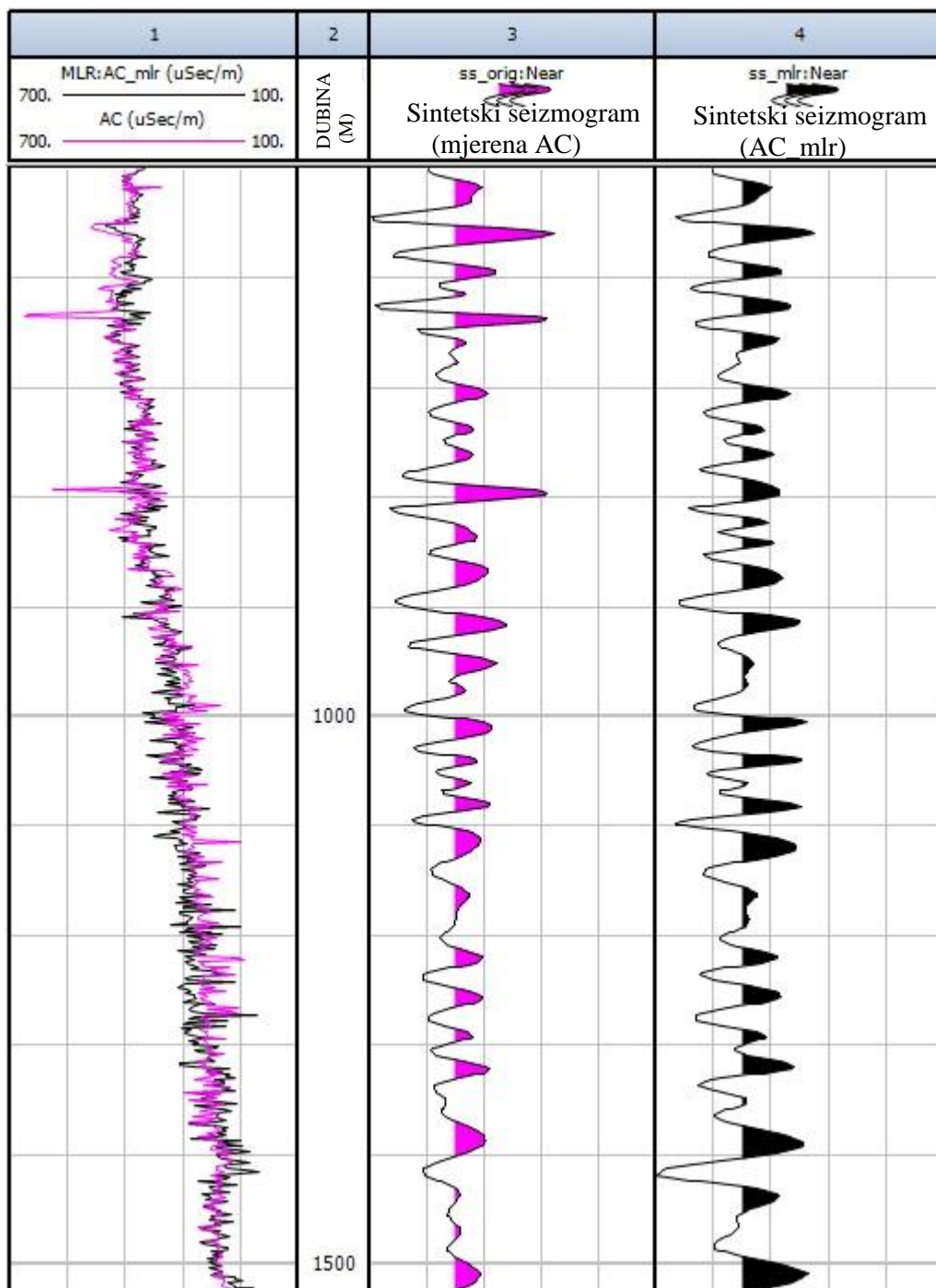
Sintetski seizmogrami ovdje su izračunati u programu *Interactive Petrophysics*, s ciljem usporedbe izračunatog pomoću mjerene zvučne karotaže i dobivenog korištenjem simulirane zvučne karotaže. Prije generiranja sintetskog seizmograma potrebno je načiniti određene korekcije. Pošto je potrebno imati zvučnu karotažu za S-val, nju se izračuna koristeći krivulju P-vala. Ovo je potrebno zbog toga što se u softveru *Interactive Petrophysics* koeficijenti refleksije računaju ovisno o kutu upada  $R(\theta)$  i pri tome se koristi aproksimacija Zoeppritzove jednadžbe koju su razvili Aki i Richards (1980). Krivulju zvučne karotaže prethodno je potrebno kalibrirati, odnosno primijeniti zakon brzina čime se zvučnu karotažu korigira na vrijednosti vremena putovanja vala izvedene iz podataka zakona brzina. Zakon brzina (eng. *Check Shot*) pokazuje promjenu brzine širenja elastičnog vala s dubinom, koja je potrebna za pretvorbu bušotinskih podataka u vremensko mjerilo. Primjenjuje se zakon brzina koji je mjereno za bušotinu koja se analizira, a ukoliko nije mjereno za određenu bušotinu, može se koristiti i onaj dobiven u obližnjim ili bušotinama sličnog litostratigrafskog slijeda kako bi se za nju uskladilo vremensko s dubinskim mjerilom. U ovom slučaju kalibracija je urađena koristeći jedan mjereno zakon s obzirom da se raspolagalo mjerenim podacima samo za nju. Podaci (eng. *checkshot data*) se unose u obliku parova vrijednosti izmjerenih intervalnih brzina za pripadne dubine. Podaci o gustoći stijena potrebni za izračun impedancija proizlaze iz mjerene karotaže gustoće (*DEN*). Iz akustičnih impedancija računa se koeficijent refleksije za svaki sloj u podzemlju. Nadalje, koeficijenti refleksije formiraju serije refleksa koji se mogu prikazati u vremenskom ili dubinskom mjerilu. Odziv podzemlja je tada skup impulsa s amplitudom proporcionalnom koeficijentu

refleksije za svaki reflektor i vremenu pojavljivanja jednakom dvostrukom vremenu ili jednostrukom vremenu putovanja reflektiranog vala. Seizmički trag dobiva se konvolucijom ulaznog valića sa serijom refleksa. Izdvojenim valićem iz seizmičkih podataka se nije raspolagalo pa je korišten Rickerov valić nulte faze s frekvencijom 28 Hz i vremenskim intervalom uzorkovanja od 4 ms. Valić nulte faze ima najveću vrijednost energije u nultom vremenu pa će stoga u toj točki i njegova amplituda biti maksimalna.

Sintetski seizmogram za bušotinu B-1 prvo je izračunat koristeći mjerenu krivulju zvučne karotaže, a potom onu simuliranu neuronskom mrežom (slika 5-2) te multilinearom regresijom (slika 5-3) koristeći i *CN* kao ulaznu krivulju.



Slika 5-2. Sintetski seizmogram za bušotinu B-1 izračunat pomoću mjerene krivulje (AC) i krivulje simulirane neuronskom mrežom (AC\_nn)



Slika 5-3. Sintetski seizmogram izračunat iz mjerene krivulje AC i krivulje simulirane multilinearnom regresijom (AC\_mlr)

U prvom stupcu uspoređene su mjerene (ružičasto) i simulirane (crno) krivulje zvučne karotaže, dubina je prikazana u drugom, sintetski seizmogram za mjerenu krivulju nalazi se u trećem stupcu, dok četvrti prikazuje sintetski seizmogram za simuliranu zvučnu karotažu. Uočljivo je da se tragovi odlično preklapaju polaritetima, dok su prisutna mjestimično odstupanja u veličini amplituda. Kod nižih amplituda ona su dosta manja.

Na primjeru bušotina smještenih u Savskoj depresiji, usporedba sintetskih seizmograma uz mjerenu i simuliranu zvučnu karotažu pokazuje da se sintetski seizmogram može uspješno konstruirati upotrebom simulirane zvučne karotaže. U bušotinama u kojima nije mjerena zvučna karotaža ili nije mjerena kontinuirano, ali su izmjerene druge karotažne krivulje kao što su prirodna gama-radioaktivnost, električna otpornost i gustoća moguće je izračunati akustične impedancije simulacijom zvučne karotaže u dubinskom intervalu u kojem su izmjerene sve ostale krivulje.

Sintetski seizmogram je nešto bolji, odnosno sličniji onom izračunatom pomoću mjerene AC krivulje kod simulacije neuronskim mrežama, dok onaj dobiven pomoću AC iz multilinearne regresije na većim dubinama mjestimično daje zamjetno veće amplitude.

## 6. ZAKLJUČAK

Krivulje zvučne karotaže (AC) mjerene su u svim bušotinama, u nekima samo na određenim intervalima. Cilj ovog rada bio je na temelju drugih karotažnih podataka, a koji su u dobro definiranim međusobnim (uglavnom linearnim) odnosima, predvidjeti krivulju zvučne karotaže kao da uopće ne raspolažemo njenim podacima, tj. mjerena krivulja nam je služila za usporedbu. Na intervalima gdje ona nije mjerena, korišteni alati nisu simulirali krivulju AC jer na tim intervalima nedostaju ili sve ili dio ostalih krivulja koje su potrebne za model. Na primjeru karotažnih podataka polja Stružec u Savskoj depresiji demonstrirana je uspješnost i perspektivnost metoda strojnog učenja u naftnogeološkim istraživanjima.

Vizualnom usporedbom mjerenih i simuliranih krivulja zvučne karotaže čak i na prvi pogled može se zaključiti da postoji dobro preklapanje, odnosno moguće je razlučiti slojeve s različitim intervalnim brzinama P-valova. Ipak, može se reći da su bolji rezultati postignuti metodom neuronske mreže, a posebno za bušotinu B-1 u kojoj se najjasnije vide intervali s vrlo izraženim zonama (pikovima) viših, odnosno nižih intervalnih brzina P-valova. Navedeni pikovi na nekim su mjestima na simuliranoj krivulji suprotnog trenda od onih na mjerenoj, no jasno nam daju do znanja da se na tim dubinama događaju značajne promjene u svojstvima naslaga su detaljnije analizirane kako bi se utvrdio njihov uzrok. U ovom slučaju te su se promjene mjestimično mogle pripisati zasićenju ugljikovodicima, sukladno informacijama iz stručne dokumentacije u kojoj su nabušeni intervali detaljno opisani. Također, kvalitetnije simulacije krivulje AC dobivene su u bušotinama u kojima se raspolagalo podacima kompenzirane neutronske karotaže.

Bušotina B-6 nije sadržavala krivulje klasične karotaže otpornosti te se metodom multilinearne regresije probalo simulirati njenu zvučnu karotažu koristeći, uz kompenziranu neutronska, karotažu gustoće i karotažu prirodne gama-radioaktivnosti, podatke o otpornosti dobivene induktivnom sondom srednjeg te dubokog zahvata što nije dalo zadovoljavajuće rezultate. Uspješnijom simulacijom pokazala se ona kod koje je korišten regresijski model dobiven podacima iz bušotina B-1 i B-2, što je i logično s obzirom da one sadrže daleko više podataka.

Sintetski seizmogrami korišteni su kao metoda validacije kvalitete simuliranih krivulja AC, i to za bušotinu B-1 jer ima najbolje podudaranje mjerenih i simuliranih krivulja. Kod sva tri sintetska seizmograma (izračunata iz mjerene AC krivulje, AC simulirane neuronskom mrežom i AC simulirane multilinearom regresijom) jasno se uočava podudaranje, tj. slijed

amplituda je jednak i refleksi istog predznaka uglavnom su na jednakim dubinama, a razlike su većinom u amplitudama, posebice na većim dubinama.



## 7. LITERATURA

### Objavljeni radovi:

Aki, K. & Richards, P. (1980): Quantitative Seismology, Theory and Methods, Freeman, San Francisco.

Ala, M. (2016): Petroleum geology: Log interpretation Course. Imperial College London, London, UK

Ćorić, S., Pavelić, D., Rögl, F., Mandić, O., Vrabac, S., Avanić R., Jerković L., Vranjković, A. (2009): Revised Middle Miocene datum for initial marine flooding of North Croatian Basins (Pannonian Basin System, Central Paratethys). *Geologia Croatica* 62 (2009): 31-43.

Darling, T. (2005): Well Logging and Formation Evaluation. Gulf Professional Publishing, Houston, TX, SAD

Ellis, D., Singer, J. (2007): Well Logging for Earth Scientists: 2nd Edition, Springer, Dordrecht, The Netherlands

Faust, L (1953): A Velocity Function Including Lithologic Variation, *Geophysics*, Vol. 18, No. 2, 1953, pp. 271-288

Gardner, G., Gardner, L. W., Gregory., A. R. (1974): Formation velocity and density—The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics* 39: 770-780.

Guntoro, T., Putri, I., Bahri, A. (2013): Petrophysical Relationship to Predict Synthetic Porosity Log, Search and Discovery Article #41124, AAPG Annual Convention and Exhibition, Pittsburgh, Pennsylvania

Jahromi, H., Jorge, A. (2019): Data science applications in oil and gas exploration: an in-depth perspective. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*. 172. 1-43. 10.1680/jener.18.00021.

Joshi, D., Patidar, A.K., Mishra, A., Agarwal, S., Pandey, A., Dewangan, B., Choudhury, T. (2021): Prediction of sonic log and correlation of lithology by comparing geophysical well log data using machine learning principles. *GeoJournal*. <https://doi.org/10.1007/s10708-021-10502-6>

Kaufman, A., Itskovich, G. (2017): *Basic Principles of Induction Logging: Chapter Eight - Electromagnetic Field of a Vertical Magnetic Dipole in Cylindrically Layered Formation*, Pages 249-288. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands

Lunt, M. (2013): *Introduction to statistical modelling: linear regression, Rheumatology*, 54. 7, 10.1093/rheumatology/ket146, Oxford, UK

Luthi, S. (2013). *Geological Well Logs: Their Use in Reservoir Modeling*. Springer, The Netherlands. 10.1007/978-3-662-04627-2.

Malvić, T., Cvetković, M. (2009): *Neuronski alati u geologiji ležišta ugljikovodika*. Hrvatsko geološko društvo, Geomatematički odsjek, Zagreb

Orešković, J. (2017): *Bušotinska karotaža, interna skripta za predmet, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb*

Pavelić, D. (2001): Tectonostratigraphic model for the North Croatian and North Bosnian Sector of the Miocene Pannonian Basin System. *Basin Research*, 12, 359 - 376

Serra, O. (1984): *Fundamentals of Well Log Interpretation: 1, The Acquisition of Logging Data*, Elsevier, Amsterdam, 423p.

Simpson, D. (2017): *Well-Bore Construction (Drilling and Completions), Practical Onshore Gas Field Engineering*, Chapter 2, Pages 85-134. Gulf Professional Publishing, Houston, TX, SAD

Šumanovac, F. (2012): Osnove geofizičkih istraživanja. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb

Interactive Petrophysics User Manual (2013), Senergy Software Ltd

### **Neobjavljeni radovi:**

Krklec N., Novoselec E., Ivčić K., Brnada S., Nagl B., Hrženjak V., Jeras Z. (2013): Interpretacija 3-D seizmike naftno-plinskog polja Stružec, Fond struč. dok. INA- Industrija nafte, Zagreb

Žužul, V., Smontara, N., Šušnjar, I. (2011): Elaborat o rezervama ugljikovodika eksploatacijskog polja Stružec, naftno-plinsko polje Stružec, Fond struč. dok. INA- Industrija nafte, Zagreb.

### **Internetski izvori:**

[Prediction of P-Sonic Log in the Volve Oil Field using Machine Learning | by Yohanes Nuwara | Towards Data Science](#) 11.7.2022. 13:47