

Procjena preostalog zasićenja ugljikovodicima korištenjem metode ugljik/kisik (C/O Carbon/Oxygen)

Remained Hydrocarbon Saturation Evaluation Using C/O (Carbon/Oxygen) Method

dr. sc. Zoran Čogelja
INA–Industrija nafte d.d.
zoran.cogelja@ina.hr

Hrvoje Pavičić
mag. naftnog rudarstva
INA–Industrija nafte, d.d.
hrvoje.pavicic@ina.hr

Zdravko Kosovec
mag. geologije
INA–Industrija nafte, d.d.
zdravko.kosovec@ina.hr



Ključne riječi: identifikacija prostalih i zaobiđenih ugljikovodika, metoda ugljik/kisik, SIGMA metoda, SATG metoda

Key words: Identification of Residual Hydrocarbons, Carbon/Oxygen method, SIGMA Method, SATG method

Sažetak

Uz veliki broj postojećih bušotina na zrelim proizvodnim poljima u Hrvatskoj, kao i potencijalnih budućih proizvodnih bušotina, očita je potreba za mjerenjima u zacijevljenim bušotinama s ciljem procjene preostalih zasićenja, pronalaženja zaobiđenih zaliha i utvrđivanja promjene kontakta između fluida. Takva mjerenja također umanjuju rizik u situacijama kada nisu dostupni podaci iz nezacijevljenog kanala bušotine.

Kao najpraktičnija i najpouzdanija mjerenja u zacijevljenom kanalu bušotine pokazala su se neutronska mjerenja. Za tu svrhu koriste se sonde s umjetnim izvorom (generatorom) neutrona, čija je praktičnost u tome da nisu aktivne do uključenja te daju mnogo jači izvor neutrona od prirodnih radioaktivnih izvora.

Te sonde mogu imati dva moda mjerenja: metoda prihvata neutrona (PNC), tzv. Sigma (S) i mjerenje odnosa ugljika (carbon) i kisika (oxygen).

Za razliku od dosadašnje korištene metode prihvata neutrona (PNC), metoda C/O iako zahtjevnija (potreba vrlo sporog mjerenja brzinom 1 m/min te ponavljanja barem 3 puta zbog statističke sigurnosti) daleko je manje osjetljiva na utjecaj niskog saliniteta slojne vode.

Fizikalni princip mjerenja pulсно-neutronske spektra se temelji na detekciji gama zraka i distribuciji njihove energije. Te gama zrake su rezultat neelastičnih prihvata i interakcije visoko energetskih neutrona generiranih izvorom s prostorom koji okružuje sondu, što uključuje kanal bušotine i blisku formaciju. Neelastične interakcije u mjerenom okolišu proizvode gama zrake s karakteristikama energije vezanim uz specifične materijale koji se nađu u neutronske oblaku emitiranom iz izvora (generatora). Te interakcije su korisne u determinaciji prisutnosti ugljika, kisika, kalcija i silicija.

Odnos ugljika i kisika pomaže u identifikaciji i razlikovanju nafte i vode.

O ugljikovodicima možemo pojednostavljeno razmišljati kao o spoju ugljika i vodika. Uz takvo pojedno-

stavljenje, možemo prikazati molekulu ugljikovodika kao C_xH_y . Drugi uobičajeni fluid u rezervoaru je voda (H_2O). Promatrajući relativne količine prisutnih ugljika i kisika, moguće je determinirati prisustvo nafte i vode kroz kolonu zaštitnih cijevi i unutar kanala bušotine.

Slično tome, sudari neutrona s formacijom i cementom uzrokuju emisije gama zraka s distribucijom energije vezanom uz kalcij i silicij. Detekcija doprinosi energije vezane uz kalcij i silicij omogućava interpretiranje količine cementa iza kolone, vapnenca, pješčenjaka i minerala koji sadrže kalcij i silicij, kao i indikaciju stijenskog veziva koje sadrži kalcij.

Abstract

With the large base of existing wells in mature producing fields in Croatia, as well as the potential for future wells, the need for logging in cased-hole wells for remained hydrocarbon saturation evaluation, finding bypassed pay and changing fluid contacts is clear. This logging also reduces the risk by enabling formation evaluation when open hole logs are not available.

Neutron logging has been proved as the most practical and reliable logging in cased hole wells. For this purpose, we use tools with the artificial neutron source (generator). Its practicality is that it isn't active until it is turned on, and it gives much stronger neutron source than a natural radioactive source.

These tools have two logging modes: Pulse neutron capture (PNC) and carbon and oxygen ratio measurement.

Compared to the previously used pulse neutron capture method, C/O method, although more demanding (very slow logging speed at 1 m/min with at least three logging passes for statistical accuracy) is far less sensitive to low salinity formation water layers.

The operating physics of the pulsed neutron spectrum logging is based on the detection of gamma rays and their associated energy distributions. These gamma rays result from the inelastic capture and interaction of the tool generated, high-energy neutrons within the media surrounding the logging tool, including the wellbore and the near wellbore formation. Inelastic interactions within the logging environment produce gamma rays with energy characteristics related to the specific materials encountered by the nuclear cloud emitted by the downhole neutron generator. These interactions are useful in determining the presence of carbon, oxygen, calcium, and silicon.

The ratio of carbon to oxygen helps identify and distinguish between oil and water. Hydrocarbons are simply speaking chemical compounds of carbon and oxygen. Accepting this simplification a hydrocarbon molecule can be written as C_xH_y . Another usual reservoir fluid is water (H_2O). By observing the relative abundance of carbon and oxygen we can determine the presence of oil and water through casing and within the wellbore.

Similarly, neutron collisions with the formation and cement cause gamma ray emissions with the energy distribution related to calcium and silicon. The detection of the contribution of energy levels related to calcium and silicon enables the interpretation of the quantity of cement behind casing, limestone, sandstone and minerals containing calcium and silicon, as well as the indication of the reservoir cementation containing calcium.

1. Uvod

Za rješavanje problema preostalih zasićenja ugljikovodicima u ležištima u zacičevljenim bušotinama, u Ini se od 1999. godine koristila Pulsno neutronska metoda prihvata neutrona (PNC), tzv. Sigma (S), koja je i razvijena u Ini. Postojeću tehnologiju i opremu za ta mjerenja je posjedovao Crosco kao servisna kompanija. Ta je metoda (S) uvelike ovisna o salinitetu slojne vode (otežano je razlučivanje ugljikovodika i vode niskog saliniteta, dok je kod slojnih voda visokog saliniteta razlučivanje izvrsno). Budući da se na Ininim zrelih poljima uz inače relativno nizak salinitet korištenjem sekundarnih metoda pridobivanja utiskivanjem vode (koja je obično nižeg saliniteta) i CO_2 (EOR) dodatno snižava salinitet, odlučeno je sa servisnom kompanijom uvesti mjerenje koje je neovisno o salinitetu slojne vode pri rješavanju zasićenja ugljikovodicima u bušotinama.

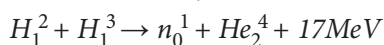
Stoga je u suradnji s vodećim proizvođačem opreme za karotazna mjerenja (Halliburton) i servisne kompanije (Crosco) uvedena nova metoda korištenja Pulsno-neutronske mjerenja na temelju odnosa ugljika i kisika (Carbon/Oxygen) kao nadogradnja dosadašnje korištene tehnologije. Crosco je od Halliburtona nabavio opremu, a INA *software* i obuku za primjenu. Napravljena su tri pokusna mjerenja u suradnji s Halliburtonom (mjerenja i analize), a nakon toga samostalno smo pristupili mjerenjima i analizama izmjerenih podataka. Dobiveni rezultati u suradnji s geolozima i inženjerima za fizikalnu razra-

du doprinose boljem razumijevanju sadašnjeg stanja preostalog zasićenja ugljikovodicima u ležišnoj stijeni.

2. Metodologija karotažnih mjerenja

U svrhu identifikacije preostalih ugljikovodika te praćenja razdjelnice voda / nafta i nafta / plin, u zaci-jevljenim bušotinama koriste se uglavnom neutronska mjerenja. Njihova primjena je vrlo važna u otvore- nom kanalu bušotine, no povećanjem broja postojećih zaci-jevljenih bušotina, promjenom zasićenja ležišta uzrokovanih crpljenjem te samim time i promjenom razdjelnice voda / nafta i nafta / plin, tijekom vremena njihova uloga postaje još važnija. Ona su primjenjiva za mjerenja u zaci-jevljenom kanalu zbog toga što neutroni lako prolaze kroz zaštitne cijevi i cement.

Ta mjerenja mogu biti klasična neutronska mje- renja kod njih se koriste klasični kemijski izvori ne- utrona, ili mjerenja s pulsno-neutronske mjernim uređajem kod kojih pulsirajući izvor ili Minitron proi- zvođači neutrona s velikom kinetičkom energijom. Takvi neutroni u interakciji s formacijom dovode do emisije γ zraka. Ioni deutrija udaraju u metu (tricij), pri čemu dolazi do oslobađanja neutrona i α čestice po izrazu



Pri tome se generira energija od 17 MeV.

Dakle, izvor emitira opaljenja visoko-energetskih neutrona, koji se odmah usporavaju u interakcijama s elementima bušotine i formacije. Vodik (u vodi ili ugljikovodicima) učinkovito usporava neutrone. Atom vodika nema neutron, već samo jedan proton u jezgri. Kako su mase protona i neutrona iste, masa atoma vodika i neutrona su gotovo jednake. Prema zakonu o

očuvanju momenta gibanja, do najvećeg gubitka ener- gije dolazi pri sudarima čestica jednakih masa.

Brzi neutroni ubrzo postanu „termalizirani“. U tom termalnom stanju (0.025 eV) atomi formacije zarobe ili apsorbiraju neutrone te emitiraju karakteristične γ zrake. Analiza tih γ zraka daje detaljan spektar forma- cije i omogućava izračun procjene formacije koja sadrži ugljikovodike (Slika 1.).

Neutronske reakcije koje se pri tome odvijaju su neelastični sudari, elastični sudari i prihvat termalnih neutrona (Slika 2.).

a) Neelastični sudari

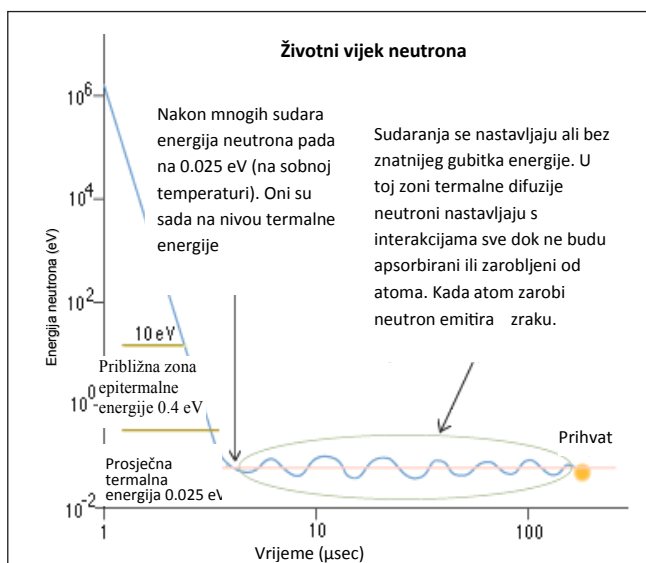
Prve interakcije koje nastaju između brzih neutro- na i atoma u bušotini i formaciji su neelastični sudari. Oni nastaju nakon neutronske opaljenja, dok neutroni imaju energiju > 6 MeV (svi neelastični sudari nastaju u prvih 300 nanosekundi nakon opaljenja). Kada brzi neutron pogodi jezgru, on ju pobudi. Taj sudar uspori neutron, a pobuđena jezgra se nastoji stabilizirati emi- tiranjem γ zraka. Te γ zrake imaju energetsku razinu koja je karakteristična za element koji ju je emitirao (pobuđenu jezgru). Neki elementi koji su česti u for- macijama ležišnih stijena i emitiraju karakteristične γ zrake su C, O, Si i Ca. Mjerenje „neelastičnih“ zraka tih elemenata se koristi u metodi C/O.

b) Elastični sudari

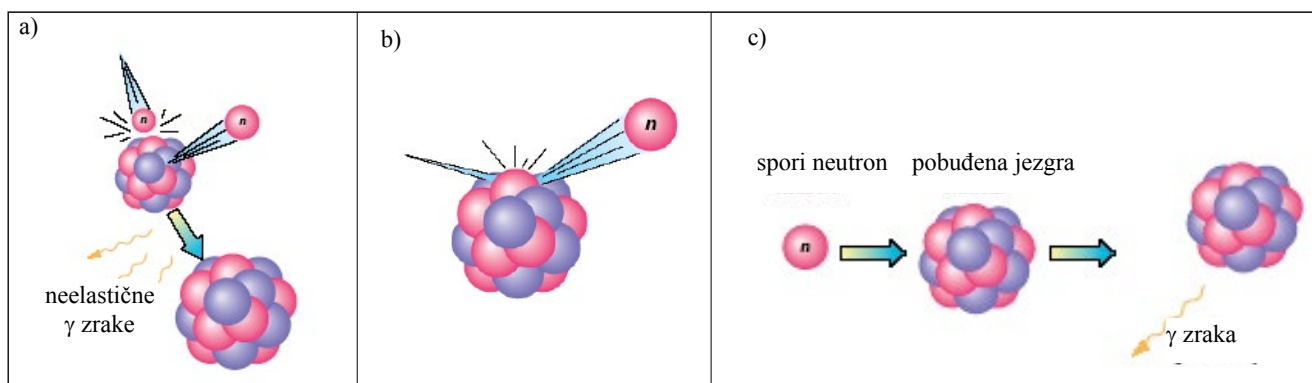
Kada energija padne < 6 MeV, kolizije s jezgrom daju elastične sudare koji još više usporavaju neutron. Iz elastičnih sudara se NE emitiraju γ zrake. Najviše energije neutroni gube u sudarima s atomima vodika. Gubitak energije nastavlja se sudarima sve dok neutron ne dođe u termalno stanje (0.025 eV). Da bi do toga došlo, potrebno je manje sudara s jezgrama vodika ne- go s ostalim elementima. To svojstvo gubitka energije pri elastičnim sudarima s vodikom koristi se kod PNC i C/O mjerenja.

c) Prihvat termalnih neutrona

U nekoliko milisekundi nakon opaljenja, neelastič- no i elastično sudaranje usporavaju neutron do razine termalne energije (< 0.025 eV). Kada dođu na taj ni- vo, neutroni postaju „žrtvom“ neutronske prijehvata ili apsorpcije jezgre te kreiraju izotop tog elementa. Jezgra se vraća u nepobuđeno stanje emitiranjem γ zrake karakteristične za novi izotop. Sinkronizacijom neutronske opaljenja i detekcije γ zraka, te zrake na- stale prijehvatom neutrona mjere se dok izvor ne emitira neutrone. Cl, Ca, Si, H i Fe su elementi koji emitiraju γ zrake. Navedeno se koristi u metodama PNC i C/O.



Slika 1. Životni vijek neutrona



Slika 2. Prikaz neelastičnih sudara (a), elastičnih sudara (b) te apsorpcije termalnih neutrona (c)

Izbor metoda koje se koriste za identifikaciju preostalih ugljikovodika u ležištu, ovisi o predviđenoj vrsti zasićenja, a baziran je na karakteristikama interakcija opisanih u prethodnom tekstu. One su:

- metoda prihvata pulsnih neutrona (Pulsed Neutron Capture – PNC) – Sigma metode, prikazna u literaturi 2. (časopis Nafta i Plin, Volume 38, Number 155/2018, pp. 39-54, Zagreb),
- metoda Ugljik/Kisik (Carbon/Oxygen – C/O).

Karakteristika navedenih metoda jest to da se kod mjerenja neelastičnih sudara (C/O) mjere energetske nivou, dok se kod prihvata termalnih neutrona (S) mjeri pad energije u vremenu (Slika 3.).

3. Primjena metode ugljik/kisik (Carbon/Oxygen – C/O)

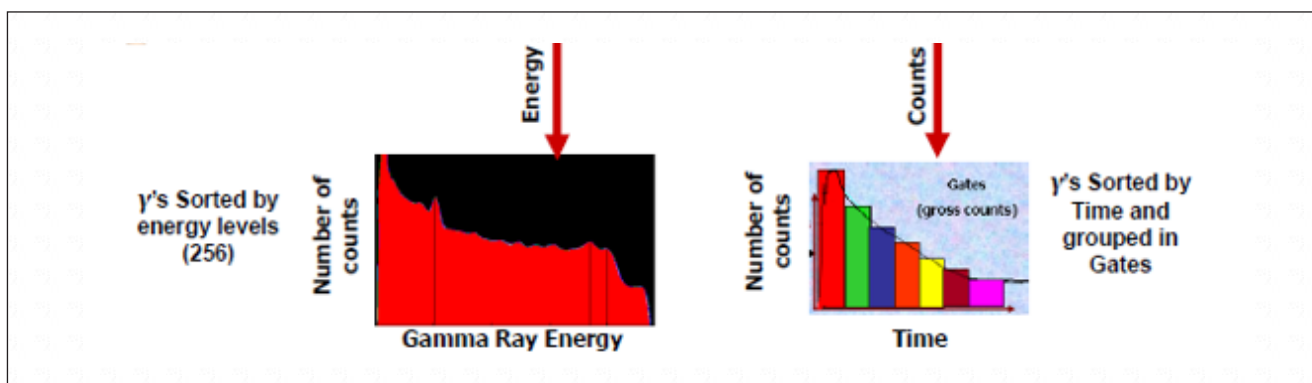
Ovi uređaji su malog promjera, dizajnirani su za mjerenja kroz niz uzlaznih cijevi i često se koriste za mjerenja bez zatvaranja bušotine (bez prekidanja proizvodnje). Kao što je u uvodu spomenuto, za procjenu zasićenja nabavljen je uređaj za mjerenje u uvjetima niskog saliniteta, koji svojim dimenzijama i karakteristikama omogućava mjerenja u bušotinama i bez vađenja ugrađene opreme. Promjer uređaja je 43 mm,

i s njim je moguće obavljati mjerenja u uvjetima do 150° C. Dosadašnja iskustva sugeriraju da je najbolje mjerenja obavljati u uvjetima bez protoka jer je zbog vrlo male brzine mjerenja moguće da se fluid u kanalu bušotine tijekom mjerenja mijenja (u proizvodnim uvjetima), što utječe na sama mjerenja te je vrlo teško obaviti korekcije podataka.

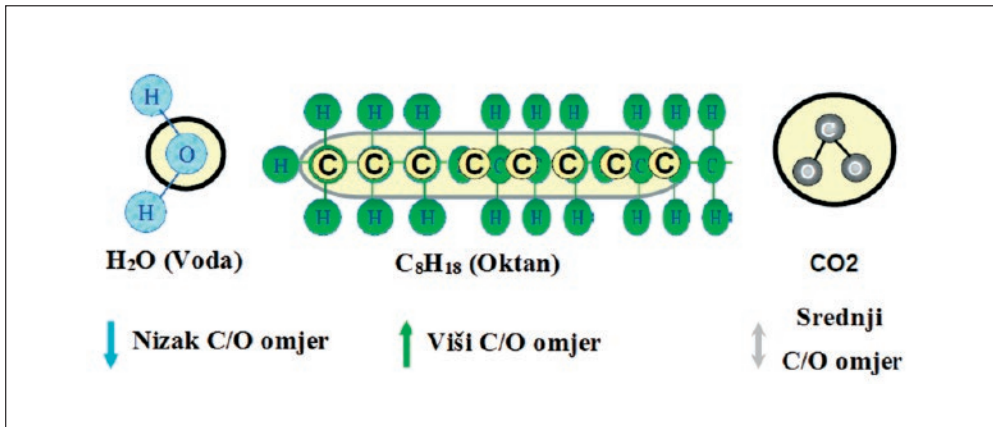
Ova metoda se koristi za kvantitativnu i kvalitativnu procjenu zasićenja – preostalih rezervi ugljikovodika i lociranje kontakata nafta / voda. Budući da zbog svoje prirode ova metoda ne može razlučiti plin od tekućine, uvijek se mjeri u kombinaciji s prihvatom termalnih neutrona (S). Iz toga se mjerenja radi analiza SATG, kojom se određuje prisustvo i količina prisutnog plina u ležištu.

Samo mjerenje je dosta zahtjevno i dugotrajno. Zbog kompleksnosti mjerenja, nužno je obaviti mjerenje C/O tri puta u intervalu od interesa, i to vrlo sporo, brzinom od 1 m/min te dodatno mjerenje S (mjeri se brzinom od 5 m/min).

S obzirom na to da je jedina moguća reakcija neutrona u formaciju sudar s jezgrom atoma, učestalost sudara je ograničena brojem i dimenzijama jezgri. Odnos ugljika i kisika pomaže u identifikaciji i razlikovanju nafte i vode. Ako o ugljikovodicima razmišljamo kao o



Slika 3. Prikaz mjerenja C/O i Sigma metoda



Slika 4.
Omjeri kisika i ugljika
u fluidima u bušotini

spojevima ugljika i vodika, tada možemo prikazati molekulu ugljikovodika kao C_xH_y . Drugi uobičajeni fluid u rezervoaru je voda H_2O . Kao što je već objašnjeno, najveći gubitak energije nastaje pri sudarima neutrona s jezgama atoma vodika. Stoga je veći gubitak energije indikator prisustva vodika u pornom prostoru (zasićenje vodom i ugljikovodicima).

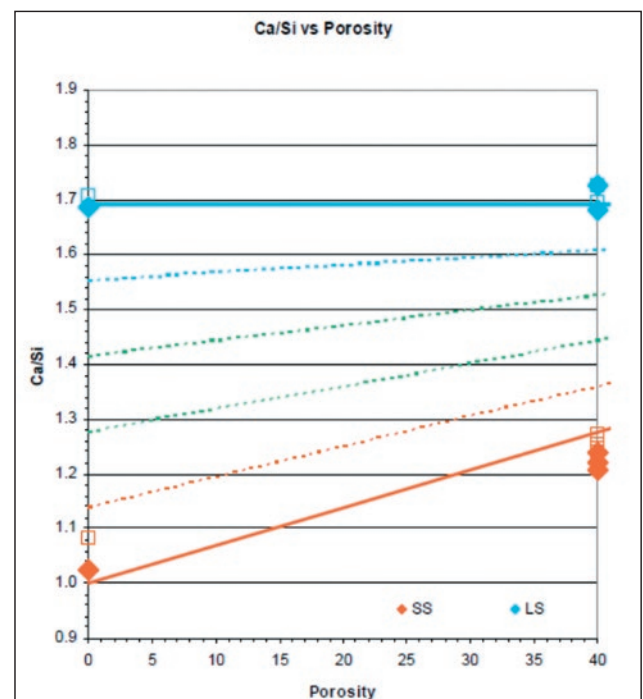
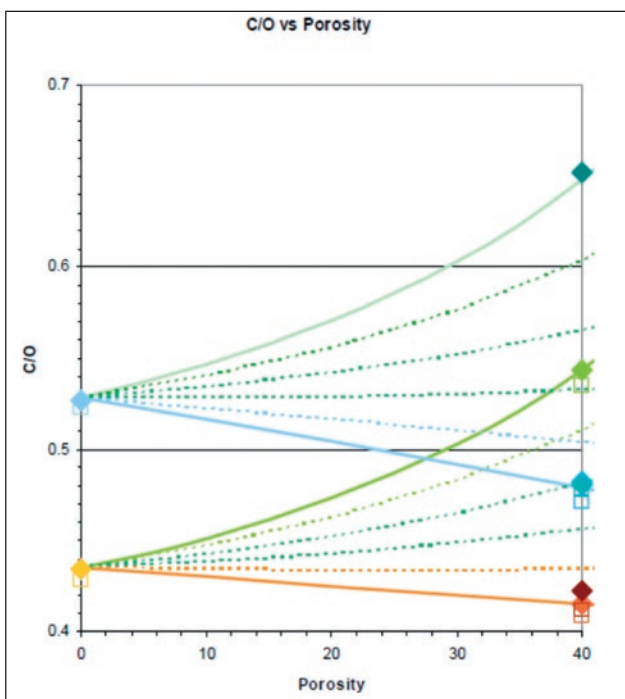
Promatrajući relativne količine prisutnih ugljika i kisika, moguće je determinirati prisustvo nafte i vode kroz kolonu zaštitnih cijevi i unutar kanala bušotine (Slika 4.).

Slično tome, sudari s formacijom i cementom uzrokuju nastanak emisije gama zraka s distribucijom energije vezanom uz kalcij i silicij. Detekcijom doprinosa energije vezane uz kalcij i silicij omogućavaju interpretiranje količine cementa iza kolone, vapnenca,

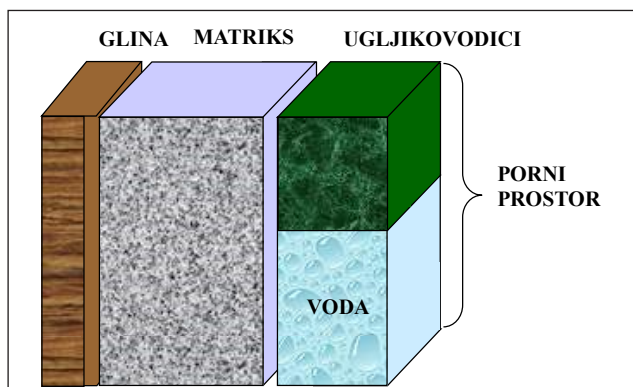
pješčenjaka i minerala koji sadrže kalcij i silicij, kao i indicaciju stijenskog veziva koje sadrži kalcij.

Kako bismo naglasili važnost mjerenja prisutnih minerala i njihov utjecaj na odziv sonde, promotrimo kako izgledaju odnosi minerala i vrste fluida u ležištu za dva najčešća slučaja:

Pješčenjak zasićen vodom:	C/O = vrlo nizak	Ca/Si = vrlo nizak
Pješčenjak zasićen naftom:	C/O = visok	Ca/Si = vrlo nizak
Vapnenac zasićen vodom:	C/O = nizak	Ca/Si = vrlo visok
Vapnenac zasićen naftom:	C/O = vrlo visok	Ca/Si = visok



Slika 5. Predefinirani grafikoni odnosa C/O - porozitet i Ca/Si - porozitet



Slika 6. Prikaz volumena stijene mjenenog Pulsno neutronsom sondom

Stoga se pri analizi mjerenja moraju koristiti različiti predefrirani grafikoni odnosa C/O – porozitet i Ca/Si – porozitet kreirani za svaku bušotinu ovisno o promjeru bušotine, kolone zaštitnih cijevi i saliniteta slojne vode i radnog fluida. Kako bi se ispravno odredilo zasićenje ugljikovodicima treba uzeti u obzir i litološku ovisnost mjerenja (Slika 5.).

U procjeni formacije zasićenje ugljikovodicima (Sh) se obično izražava terminom zasićenja vodom (Sw). Korištenjem kombinacije mjerenja C/O i Sigm moguće je napraviti kvalitativnu i kvantitativnu procjenu zasićenja. Kvalitativna je jednostavna odredba zona zasićenih ugljikovodicima iz odziva karotažnih krivulja. To se uobičajeno radi pri procjeni zasićenja plinom koristeći krivulje omjera brojanja ili procesirane sigma krivulje. Samo u slučaju formacije s vodom visokog saliniteta u rezervoaru, moguće je napraviti tu vrstu interpretacije i za zone zasićene naftom.

Kvantitativna interpretacija zasićenja vodom znači određivanje koji dio pornog prostora je zasićen ugljikovodicima a koji vodom (Slika 6.).

Sonda mjeri volumen stijene koji je sfera između neutronske generatora i neutronske detektora.

Iz ovih razmatranja je vidljivo da su prisutni mnogi parametri koje treba poznavati da bi se napravila realna interpretacija zasićenja. Prije svega treba postojati dobra petrofizikalna interpretacija, ili barem treba izraditi dobru interpretaciju volumena lapora i poroziteta. Najbolje je ako postoji petrofizikalna analiza iz nezacijevljenog kanala bušotine. Uz preciznu petrofizikalnu analizu nužno je i poznavanje svih ostalih parametara koji utječu na mjerenje i interpretaciju. Kao što je već rečeno, najvažniji su volumen kanala bušotine (promjer dlijeta), volumen niza uzlaznih cijevi i njihova debljina, salinitet slojne vode i radnog fluida te tlak u ležištu.

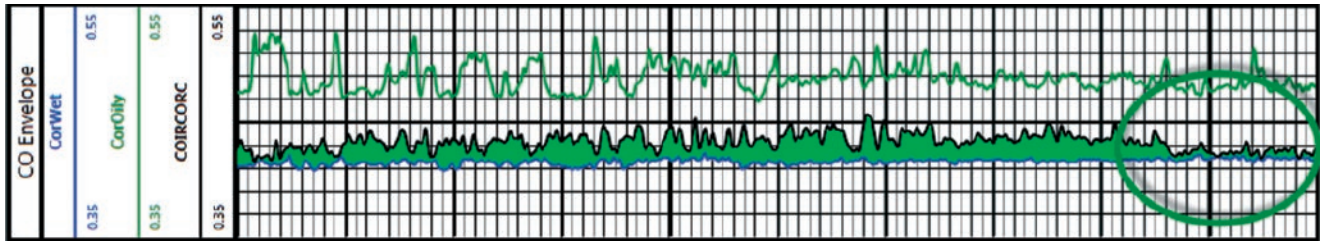
4. Kvantitativna analiza metode ugljik/kisik (carbon/oxygen)

Pri razradi i upravljanju naftno-plinskim poljima osnovne informacije nužne za planiranje radova i proizvodnje su porozitet, zasićenje i debljina ležišne stijene, odnosno koliki dio volumena stijene je zasićen ugljikovodicima na kojoj dubini. Tijekom proizvodnog života bušotina i polja tijekom crpljenja dolazi do promjena stanja zasićenja. Do toga dolazi zbog zamjene proizvedenih ugljikovodika vodom, ili do zapunjavanja pornog prostora utisnutom vodom ili CO₂ u svrhu istiskivanja ugljikovodika. Stoga je nužno pratiti promjene u ležišnoj stijeni, što je moguće jedino Pulsno neutronske metodama.

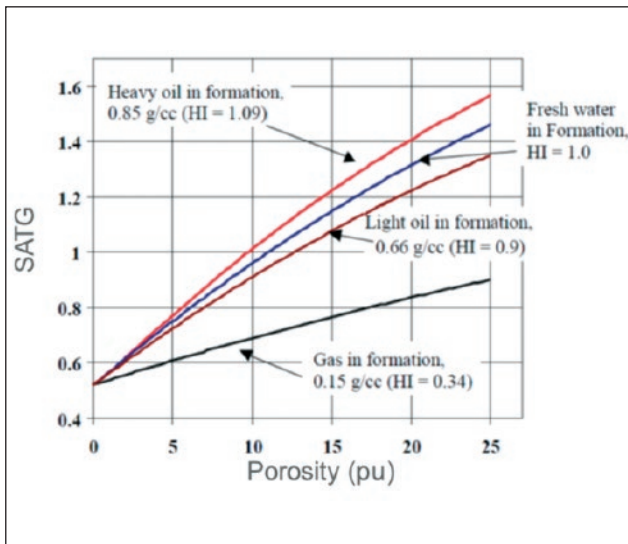
Tijekom proizvodnog vijeka naftnih i plinskih polja, kao posljedica kontinuiranog crpljenja nafte te povremenog crpljenja plina iz plinske kape i njegovog utiskivanja u nju, u ležištima može doći do pomicanja razdjelnica plin / nafta i nafta / voda. Zbog snižavanja tlaka u plinskoj kapi u pojedinim dijelovima polja i pojedinim ležištima, nafta počinje prodirati prema vršnom dijelu ležišta, u dio pornog volumena u kojem je inicijalno bila plinska kapa. Isto tako, u vodonapornom režimu crpljenja nafte dolazi do podizanja akvifera u dio pornog prostora koji je inicijalno bio zasićen naftom, odnosno podizanja razdjelnice nafta / voda. Te se pojave manifestiraju u proizvodnim rezultatima bušotina. Stoga je intencija prije remontnih radova ili u sklopu njih obaviti karotažna mjerenja čija analiza i rezultati daju podatke koji rezultiraju boljim upravljanjem proizvodnjom ugljikovodika (dubine razdjelnice plin / nafta i nafta / voda).

Nakon obavljenih mjerenja, radi se analiza. Osnovni princip pri određivanju zasićenja nafta / voda je taj da se na temelju poroziteta (f) i odnosa Ca/Si, uzimajući u obzir efekt bušotinskog fluida, izračunaju teoretske C/O krivulje za Sw = 100% (CorWet) i Sw = 0% (CorOily). Izmjerene C/O krivulje omjera (ratio) (COIRCORC) se preklapaju sa Sw = 100% (CorWet) krivuljom u zoni u kojoj je rezervoar zasićen vodom. Pomak krivulje COIRCORC u desno (prema CorOily) ukazuje na zasićenje HC (Slika 7.).

Određivanje zasićenja plin / tekućina (nafta ili voda) radi se pomoću SATG metode, koja računa zasićenja S_{gas} i S_{liquid} neovisno o salinitetu. Ta metoda se bazira na odnosu brojanja neelastičnih reakcija i onih iz sporog prihvata izmjerenih detektorom najdublje zahvata (treći detektor). Njom se dobro razlikuju plin i tekućina, ali teže nafta i voda (Slika 8.).



Slika 7. Interpretacija C/O mjerenja



Slika 8. Grafikon zasićenja plin/tekućine iz SATG-a

Stoga se te dvije metode koriste zajedno, tako da se metodom SATG kompenzira loša razlučivost plin/tekućina metode C/O.

5. Primjer mjerenja i interpretacije C/O i SATG

Na slici 9. naznačene su ulazne krivulje korištene u analizi – porozitet i litologija iz petrofizikalne analize mjerenja u nezacijevljenom kanalu bušotine (OH) te izmjerene C/O i PNC krivulje. Na temelju tih podataka, prvo su procesirane izmjerene krivulje te je napravljena analiza S_w , S_o i S_g zasićenja (zasićenja vodom, naftom i plinom).

Prikazana bušotina je prethodno proizvodila iz B5 ležišta. Proizvodila je $1 \text{ m}^3/\text{dan}$ tekućine, s udjelom vode = 59% (2017). Tijekom remontnih radova, nakon C/O, SIGMA i SATG mjerenja i interpretacije, perforirani su i ispitani novi intervali. Iz donje raskrivenih intervala serije "B" tijekom ispitivanja dobiveno je nafte $2,3 \text{ m}^3/\text{dan}$ i slojne vode $8,7 \text{ m}^3/\text{dan}$ dok zasebnim ispitivanjem gornje raskrivenih intervala serije "A" tijekom ispitivanja dobiveno je nafte $3,2 \text{ m}^3/\text{dan}$ i plina $1841 \text{ m}^3/\text{dan}$.

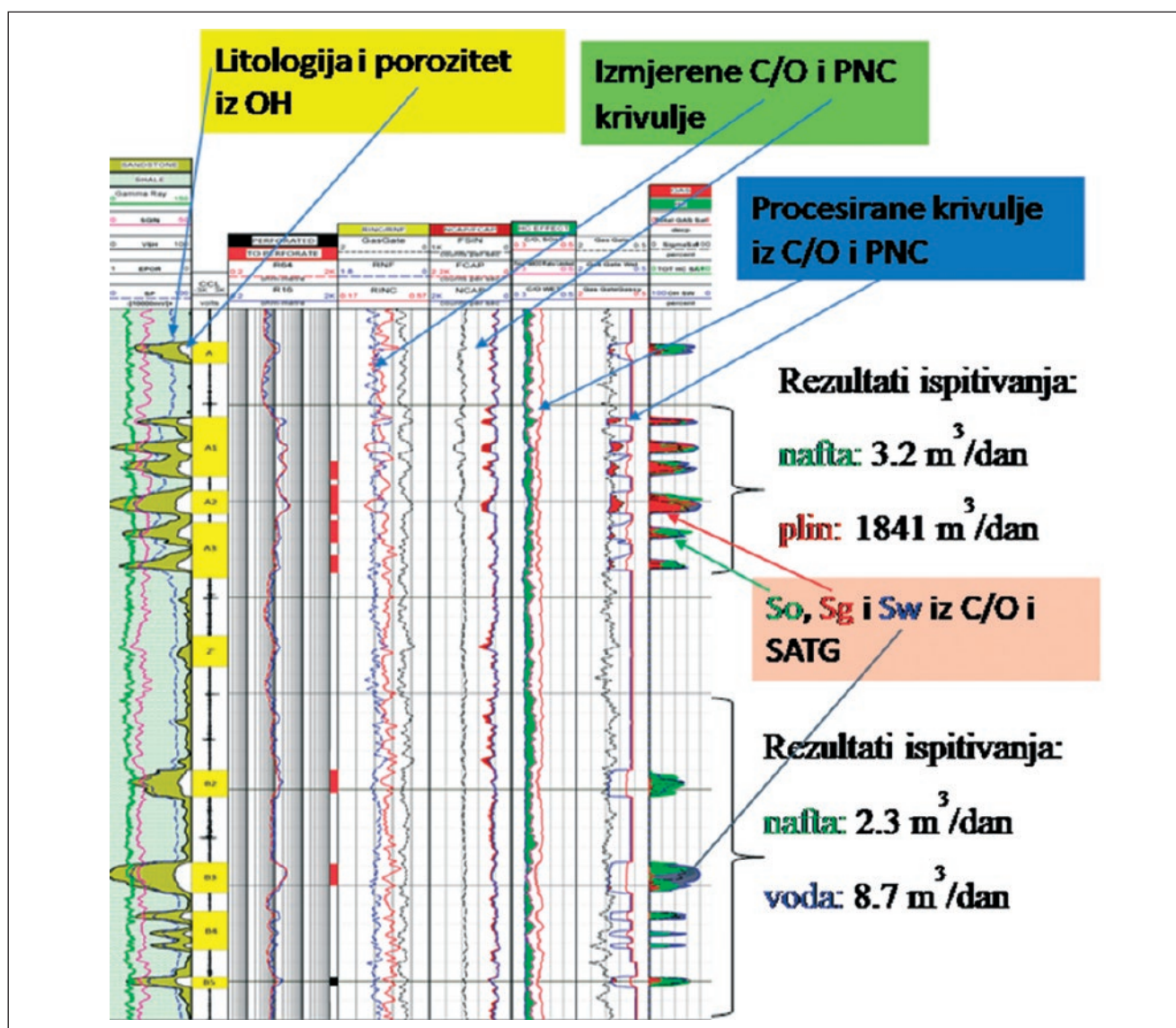
Očito je vrlo dobro poklapanje rezultata analize i rezultata ispitivanja.

Implementacija ove metode započela je u Ini 2019. godine. Prva tri mjerenja su obavljena zajedno sa Halliburton-om, za koje su oni napravili i analize. Nakon toga mjerenja obavlja Croscoc, a analize Inini petrofizičari. Do sada je nakon ova tri uvodna mjerenja obavljeno dvanaest samostalnih mjerenja, od čega su dva u sklopu projekta EOR Žutica, šest u sklopu projekta Additional Development (dvije Žutica, dvije Jamarice-Lipovljani, jedna Šandrovac i jedna Kloštar), dvije u projektu Relaunch of Inactive Wells Žutica, jedna u projektu Screenless Frack Pack Stručec i jedna u projektu Sand Management Jamarice-Lipovljani-Kozarice.

Na temelju rezultata analiza odabrani su ili potvrđeni intervali za perforiranje i ispitivanje (ukupno 167 m), iz kojih je ispitivanjem ukupno dobiveno oko $79 \text{ m}^3/\text{dan}$ nafte i $15.000 \text{ m}^3/\text{dan}$, odbačena su tri planirana intervala perforiranja (11 m) iz kojih bi bila dobivena voda, dok je na jednoj bušotini ustanovljen plići kontakt plin/voda te je dodatno raskriven plići dio ležišta u naftnom zasićenju. Time je skraćeno vrijeme trajanja remonta, ostvarena financijska ušteda i povećan financijski dobitak obavljenih radova.

Pri tome je ostvarena 100-postotna podudarnost rezultata analiza karotažnih mjerenja i ispitivanja, čime je potvrđena pouzdanost i iskoristivost metode za utvrđivanje preostalog zasićenja ležišnih stijena ugljikovodicima te postavljena čvrsta osnova za primjenu metode u budućim projektima. Osim izravnih rezultata u smislu povećanja proizvodnje ugljikovodika, spoznaje stečene ovim mjerenjima i analizama zajedno s drugim izvorima informacija (seizmika, proizvodne količine, tlakovi...) koriste se od strane multidisciplinarnih timova (ležišni inženjeri, razradni geolozi, seizmičari, petrofizičari, proizvodni inženjeri) za praćenje kontakata među fluidima u ležištima, redefiniranje ležišne zonacije, prećenje fronte utisnutog CO_2 kod WAG EOR-a, optimizaciju proizvodnje i planiranje budućih aktivnosti upravljanja poljima.

Očekuje se daljnja primjena ove metode uz radove na optimizaciji polja, u sklopu remontnih radova ili čak



Slika 9. Primjer analize C/O i SATG mjerenja

prije njih kako bi se što kvalitetnije pripremili podaci, te na temelju rezultata analiza odredili optimalni radovi s ciljem povećanja proizvodnje. Osim toga, moguće je korištenje ove metode u sklopu EOR i EOR pilot projekata u svrhu procjene zasićenja ugljikovodicima

i/ili CO₂ u vrijeme mjerenja i praćenja stanja tijekom vremena (time-laps). Druga je mogućnost mjerenja u sklopu utiskivanja vode, također u svrhu procjene zasićenja ugljikovodicima u vrijeme mjerenja i praćenja stanja tijekom vremena (time-laps).

Literatura

1. ČOGELJA, Z.: Identifikacija preostalih ugljikovodika u ležištu karotažom pobudene radioaktivnosti – Unpub. PhD Thesis, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb, Zagreb, 2011, 159 p.
2. ČOGELJA, Z., KOSOVEC, Z., PAVIČIĆ, H., MARIĆ-ĐUREKOVIĆ, Ž.: Use of SIGMA method in the evaluation and characterization of sand A series in the Žutica field, Nafta i Plin, Volume 38, Number 155/2018, pp. 39-54, Zagreb
3. HOTWELL Ges.m.b.H: Pulse Neutron – Neutron System, Klagenfurt, Austria, 2006,
4. RIDER, M. H.: Geological interpretation of well logs: John Wiley and sons, New York NY, 1986, 175 p.
5. SMOLEN, J. J., Cased Hole and Production Log Evaluation, PennWell, Tulsa, USA, 1995.