

Tretman relativnih propusnosti u svrhu pripreme za primjenu u simulacijskom modelu ležišta ugljikovodika

A. Feigl

PREGLEDNI ČLANAK

Mjerenje relativnih propusnosti i njihova analiza i modifikacija pomoću odgovarajućih modela relativnih propusnosti predstavljaju jedan od temelja za izradu simulacijskih modela ležišta i njihovu verifikaciju. Uz to je vezan pažljiv izbor tih krivulja uz uvjet da postoji statistički dovoljno relevantan skup sličnih krivulja za odabrano ležište ili za pojedine tipove stijena unutar istog ležišta. Da bi se te krivulje mogle pravilno primijeniti pri simulaciji ležišta, prethodno je potrebno dobro poznavanje svih parametara ležišne stijene, tj. šupljikavosti, apsolutnih i efektivnih propusnosti, zasićenja, itd. Svrha ovog rada je prikaz postupaka mjerenja krivulja relativnih propusnosti i metoda analize eksperimentom dobivenih podataka pomoću različitih modela koji opisuju te podatke da bi se mogli što kvalitetnije primijeniti kod numeričke simulacije ležišta. Vezano uz to, u završnom dijelu ovog rada je kroz konkretan primjer izložen postupak analize i obrade podataka relativnih propusnosti u svrhu pripreme za model ležišta ugljikovodika.

Ključne riječi: ležište ugljikovodika, model ležišta, relativna propusnost, numerička simulacija, tip stijene

1. UVOD

U ovom radu je kroz nekoliko poglavlja ukratko prikazano koji su izvori podataka za dobivanje krivulja relativnih propusnosti i načini na koji se ti podaci mjere i analiziraju. Prikazano je i kako se te krivulje pomoću modela relativnih propusnosti interpretiraju i modificiraju sa svrhom nastavka njihovog korištenja u sklopu izrade integriranog modela ležišta ugljikovodika. Pri tome je pažnja posvećena tome da konačan oblik pojedinih setova krivulja relativnih propusnosti bude u skladu s određenim parametrima koji karakteriziraju pojedine tipove ležišnih stijena u okviru jedinstvenog, ali i heterogenog, ležišta ugljikovodika. S namjerom da se to potkrijepi, tablično je i u obliku dijagrama prikazana obrada podataka relativnih propusnosti u sklopu mjerenja na šest uzoraka ležišne stijene iz različitih dijelova istog ležišta ugljikovodika.

2. IZVORI PODATAKA O RELATIVNIM PROPUSNOSTIMA

Postoje različiti postupci i metode mjerenja relativnih propusnosti kao i njihovih međusobnih omjera. Od slijedećih metoda koje će biti ukratko prikazane u nastavku, prva se temelji na mjerenju proizvodnih podataka s polja i direktnom izračunavanju omjera relativnih propusnosti iz istih, dok se preostale izvode u laboratoriju pomoću eksperimenata na uzorcima ležišne stijene, tj. jezgrama.

2.1. Proizvodna mjerenja

Ovdje je dat skraćeni izvod koji se odnosi na dobivanje relativnih propusnosti iz proizvodnih podataka.⁶ Na osnovi proizvodnih podataka moguće je izračunati omjere efektivnih odnosno relativnih propusnosti

korištenjem Darcyevog zakona za radijalno protjecanje. Poznavanjem PVT odnosa fluida moguće je kod različitih tlakova definirati udjele slobodnog i otopljenog plina u ukupnoj proizvodnji plina prema slijedećoj jednadžbi:

proizvedeni plin = slobodni plin + naftni plin

odnosno

$$R_p = R + R_s \quad (1)$$

U skladu s jednadžbom (1) i korištenjem omjera jednadžbi za radijalno protjecanje plina i nafte:

$$R_p = \frac{k_{rg} \mu_o B_o}{k_{ro} \mu_g B_g} + R \quad (2)$$

jednadžba (2) se može prilagoditi za računanja omjera relativnih propusnosti za plin i naftu:

$$\frac{k_{rg}}{k_{ro}} = (R_p - R_s) \frac{B_g \mu_g}{B_o \mu_o} \quad (3)$$

Zasićenje naftom koje odgovara ovom omjeru relativnih propusnosti određuje se prema materijalnom uravnoteženju:

$$S_o = \left(1 - \frac{N_p}{N}\right) \frac{B_o}{B_{oi}} (1 - S_{wi}) \quad (4)$$

te je odgovarajuće ukupno zasićenje kapljevnom prema jednadžbi (5):

$$S_L = S_w + (1 - S_{wi}) \left(\frac{N - N_p}{N_p} \right) \left(\frac{B_o}{B_{oi}} \right) \quad (5)$$

Nakon ovog proračuna ovisnost između k_{rg}/k_{ro} , iz jedn. (3), i S_L , iz jedn. (5), ucrtava se u log-lin dijagram s k_{rg}/k_{ro}

na logaritamskoj skali. Vrijednosti k_{rg}/k_{ro} mogu se koristiti da se provjeri točnost relativne propusnosti dobivene na osnovi iskustvenih odnosno laboratorijskih postupaka.⁵

2.2. Laboratorijska mjerenja na jezgrama

Laboratorijska mjerenja relativnih propusnosti mogu se podijeliti u tri osnovne skupine: nestacionarna i stacionarna mjerenja direktno na jezgrama, te indirektno preko mjerenja na jezgrama kapilarnog tlaka. Važno je napomenuti da se spomenute metode mjerenja izvode na različitim laboratorijskim aparaturama.⁶ Osnovne razlike u pristupu i načinu mjerenja između navedenih metoda bit će spomenute u nastavku teksta.

2.2.1. Nestacionarne metode

Nestacionarna mjerenja relativnih propusnosti mogu se izvesti brže nego stacionarna, ali je matematički opis tih mjerenja znatno kompleksniji.⁶ Za izračunavanje udjela vode u kapljevitini na izlaznom kraju jezgre koristi se kombinacija Darcyevog zakona i jednadžbe koja definira kapilarni tlak u diferencijalnom obliku i koja uzima u obzir gravitacijski efekt, a naziva se jednadžba za proračun udjela vode u protoku s gravitacijskim članom.^{5,6} Ovdje će biti prikazana varijanta te jednadžbe za slučaj horizontalnog protjecanja i pri zanemarivom kapilarnom tlaku, a takvi se uvjeti smatraju zadovoljenim kod primjene ove metode mjerenja:

$$S_{w,av} - S_w = f_{o2} \cdot Q_w \quad (6)$$

Q_w i $S_{w,av}$ se mogu mjeriti tijekom eksperimenta, a f_{o2} se može odrediti iz nagiba krivulje ovisnosti između Q_w i $S_{w,av}$. Prema definiciji je:

$$f_{o2} = \frac{q_o}{q_o + q_w} \quad (7)$$

Kombinacijom te jednadžbe i Darcyevog zakona proizlazi da je:

$$f_{o2} = \frac{1}{1 + \frac{\mu_o / k_{ro}}{\mu_w / k_{rw}}} \quad (8)$$

Pošto su viskoziteti μ_o i μ_w poznati, to se omjer relativnih propusnosti k_{ro}/k_{rw} može odrediti iz jedn. (8). Sličan izraz može se izvesti za slučaj istiskivanja nafte plinom.

Kod izvođenja eksperimenata za određivanje relativne propusnosti prema nestacionarnoj metodi mjerenja, pažnju treba obratiti na slijedeće:

1. Gradijent tlaka kroz jezgru treba biti dovoljno velik da minimalizira kapilarne efekte;
2. Razlika tlaka kroz jezgru treba biti dovoljno malena u usporedbi s ukupnim radnim tlakom tako da je utjecaj kompresibiliteta zanemariv;
3. Jezgra mora biti homogena; i
4. Tijekom testa tlačnu silu i karakteristike fluida treba održavati konstantnim.

Ova metoda najčešće se koristi za određivanje omjera efektivnih (relativnih) propusnosti k_{rw}/k_{ro} , k_{rg}/k_{ro} i k_{gw}/k_{ro} .

2.2.2. Stacionarne metode

Više različitih metoda i autora se spominje koji su izvodili pokuse na jezgrama stacionarnim postupkom.⁶ Osnovna je postavka stacionarne metode da se kroz zadanu jezgru protiskuje fiksirani omjer fluida (npr. vode i nafte) dok se ne postignu uravnoteženja zasićenja i tlaka. Nakon postignutog uravnoteženja zabilježe se brzine protjecanja dviju faza, zatim se izmjeri zasićenje. Nakon toga se postupak ponavlja do uravnoteženja pri većoj brzini protjecanja druge faze, te se dobivaju podaci kod nove vrijednosti zasićenja. Postupak se ponavlja kod sve viših vrijednosti zasićenja dok se ne dobije dovoljan broj točaka za konstrukciju krivulja relativnih propusnosti. Osim mjerenja zasićenja vaganjem jezgre postoje brže i spretnije alternative, npr. mjerenjem električnog otpora jezgre, a postoje i druge metode.

Kod stacionarnih metoda mjerenja relativnih propusnosti primarnu brigu treba posvetiti uklanjanju ili barem smanjenju gradijenta zasićenja do kojeg dolazi zbog utjecaja kapilarnog tlaka na izlaznom kraju jezgre, a koji se u engleskom izvorniku naziva *outflow boundary effect*, ili skraćeno *end-effect*. To se postiže na više načina, a to čini jednu od osnovnih razlika između stacionarnih metoda mjerenja.⁶ Skraćeni naziv end-efekt se udomaćio u našoj praksi, te se i ovdje koristi u nastavku teksta.

2.2.3. Indirektno iz mjerenja krivulja kapilarnog tlaka

Postupci koji se koriste za izračunavanje relativnih propusnosti iz podataka mjerenja kapilarnog tlaka temelje se na drenažnim procesima gdje nemoćiva faza (plin) istiskuje moćivu (nafta ili voda).⁶ Zbog toga su ovi pokusi ograničeni na ležišta gdje je način proizvodnje na osnovi procesa koji se odvija u drenažnom smjeru protjecanja. Premda se ove metode obično ne preferiraju za generiranje krivulja relativnih propusnosti, ipak se koriste u slučajevima kad je uzorak jezgre premlen za pokus protjecanja, ali dovoljno velik za utiskivanje žive. Isto tako se koriste za jezgre s premlenom propusnošću za pokuse protjecanja, ili za slučajeve gdje je kapilarni tlak izmjeren ali jezgra više nije na raspolaganju za pokuse protjecanja.

Proces utiskivanja žive kao nemoćive faze u prethodno ispražnjenu jezgru je uobičajeni postupak za indirektno dobivanje krivulja relativnih propusnosti mjerenjem kapilarnog tlaka. Živa se utiskuje u mjerenim količinama i pri sve većim tlakovima. Obično je dovoljno približno 20 točaka mjerenja parova vrijednosti (P_c , S_{Hg}) da bi se dobila kompletna krivulja kapilarnog tlaka potrebna za izračunavanje krivulja relativnih propusnosti. Nekoliko autora je razvilo slične jednadžbe za izračunavanje krivulja relativnih propusnosti.⁶ Ovdje su prikazane jednadžbe koje su nastale kombiniranjem Burdineove i Purcellove jednadžbe za moćivu i nemoćivu fazu:

$$k_{rwt} = \left(\frac{S_L - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \right)^2 \frac{\int_{S_{wi}}^{S_L} dS_w / P_c^2}{\int_{S_{wi}}^1 dS_w / P_c^2} \quad (9)$$

$$k_{mwt} = \left(\frac{S_L - S_L}{1 - S_{wi}} \right)^2 \frac{\int_{S_L}^1 dS_w / P_c^2}{\int_{S_{wi}}^1 dS_w / P_c^2} \quad (10)$$

Izvod ovih jednadžbi je objašnjen i prikazan u knjizi Amyxa i dr.²

2.2.4. Centrifugalne metode

Nakon što se uzorci ležišne stijene jednoliko zasite s jednom ili dvije kapljevine (npr. s naftom i vodom), postavljaju se u držače jezgri u automatskoj centrifugi.⁶ Tijekom centrifugiranja iz jezgre se izdvajaju kapljevine koje se nakupljaju u prozirnim posudama spojenim s držačima jezgri. Istovremeno s centrifugiranjem mjere se proizvedene količine pojedinih kapljevina. Radovi u kojima su, zajedno s izvodima, jednadžbe potrebne za izračunavanje krivulja relativnih propusnosti iz rezultata mjerenja dobivenih centrifugalnim metodama, navedeni su u literaturi Honarpoura i dr.⁶

Premda se centrifugalne metode ne koriste često, imaju izvjesne prednosti u odnosu na stacionarne metode, a to je da se mogu izvesti znatno brže od njih. Osim toga, tijekom mjerenja centrifugom ne dolazi do problema formiranja tzv. viskoznih prstiju, koji znaju nastati kad se mjeri nestacionarnim metodama. S druge strane, centrifugalne metode su podložne problemu kapilarnog end-efekta, te nema mogućnosti da se odredi relativna propusnost nadiruće faze (npr. vode).⁶

3. MODELI RELATIVNIH PROPUSNOSTI

Dugogodišnja eksperimentalna mjerenja krivulja relativnih propusnosti u laboratoriju na jezgrama stvorila su potrebu da se ti fizikalni procesi opišu pomoću jednadžbi.⁶ Poznavanjem fizikalnih procesa, parametara koji se mjere i koji utječu na sam tijek eksperimenta, kao i korištenjem matematičkih i statističkih metoda uz pomoć kompjutera, veliki broj autora došao je do različitih jednadžbi. Te jednadžbe koje opisuju fizikalne procese protjecanja kroz jezgru i koje time nastoje opisivati stvarno protjecanje u ležištu ugljikovodika, nazivaju se modeli relativnih propusnosti. Osnovne podjele tih modela temelje se na slijedećim premisama:

1. Da li se mjere dvofazni ili trofazni procesi protjecanja, odnosno da li se odgovarajućim jednadžbama opisuju dvofazne ili trofazne krivulje relativnih propusnosti;
2. Koja je kombinacija dvofaznih fluida predmet ispitivanja (nafta-voda, plin-nafta ili plin voda);
3. Koje su eksperimentalne metode korištene i u kojim p, T uvjetima (laboratorijskim ili slojnim) za dobivanje krivulja relativnih propusnosti, a koje su zatim poslužile kao osnova za opis procesa pomoću modela relativnih propusnosti;
4. Koliki su međupovršinska napetost i močivost, odnosno kut močivosti, sistema u kojem se odvija proces protjecanja;
5. U kojem smjeru se protjecanje mjeri: u smjeru isušivanja (*drainage*) ili u smjeru upijanja (*imbibition*);

6. Na kakvom litološkom tipu jezgre se pokus izvodi: karbonatne stijene, vezani ili nevezani pješčenjaci, dolomiti, konglomerati, stijene s frakturama, itd.; i
7. Na kojim se teoretskim osnovama i metodama proračuna temelji dobivena relacija: na fizikalnoj zakonitosti, statističko-iskustvenoj relaciji ili kombinaciji prvih dviju.

Ova posljednja sedma točka vodi do slijedeće podjele koja obuhvaća najveći broj modela relativnih propusnosti:

1. Kapilarni modeli, koji se temelje na pretpostavci da se porozna sredina sastoji od snopa kapilarnih cjevčica s različitim promjerima i čija je duljina veća od duljine uzorka jezgre (s prisutnim efektom zavojitosti odnosno tortuoziteta);
2. Statistički modeli se kao i kapilarni opisuju sa snopom kapilarnih cjevčica sa slučajnom razdiobom različitih promjera. Ovi se modeli opisuju s velikim brojem tankih presjeka okomitih na smjer pružanja kapilarnih cjevčica. Poredak i raspodjela ovih presjeka smatra se slučajnom;
3. Iskustveni (empirijski) modeli se temelje na empirijski dobivenim relacijama koje opisuju eksperimentalno određene relativne propusnosti; i
4. Mrežni modeli se najčešće temelje na modeliranju protjecanja fluida kroz poroznu sredinu korištenjem mreže električnih otpornika kao analognog modela. U ovu grupu modela može se ubrojiti i matematičke modele s kojima se na kompjuteru može simulirati protjecanje kroz jezgru.

Kompleksnost višefaznog protjecanja kroz poroznu sredinu i različite manjkavosti metoda mjerenja (npr. zanemarivanje end-efekta ili ignoriranje efekta histereze) dovode samo do približnih jednadžbi krivulja relativnih propusnosti. U nastavku su prikazana tri različita modela relativnih propusnosti koji su u svjetskoj praksi poznati i vrlo često korišteni, a od kojih su prva dva također i modeli za trofazne krivulje relativnih propusnosti.

3.1. Coreyev model

Rad Coreya i njegovih suradnika koji opisuje mjerenje i interpretaciju trofaznih relativnih propusnosti spada među prve značajnije radove iz ovog područja.⁴ Taj rad se često citira u literaturi i posebno cijeni stoga što je on kod svojih eksperimenata uzeo u obzir i *end-efekt* i efekt histereze. U tom radu su krivulje relativnih propusnosti prikazane u ternarnim dijagramima koji su u vrijeme objavljivanja bili u velikoj mjeri novost. Na tri različita ternarna dijagrama prikazane su krivulje jednakih trofaznih relativnih propusnosti, odnosno izoperme za naftu, vodu i plin. Izoperme za vodu i plin prikazane su kao pravci analogni linijama jednakog zasićenja, dok su izoperme za naftu izračunate prema slijedećoj jednadžbi:

$$k_{ro} = \frac{(S_L - S_w)^3}{(1 - S_{Lr})^4} (S_w + S_L - 2S_{Lr}) \quad (11)$$

Izvod jednadžbe (11) prikazan je i objašnjen u Coreyevom izvornom radu.⁴ Prema ternarnom dijagramu za naftu, sl. 4 u tom radu, vidi se da se izoperme, izračunate prema jedn. (11), dobro slažu s točkama eksperimentalno mjerenih vrijednosti relativne propusnosti za naftu, k_{ro} . Coreyev rad predstavlja praktičnu metodu za proračun propusnosti za naftu i vodu u trofaznom sistemu prema mjerenim relativnim propusnostima za plin.

3.2. Stoneov model

Stone je postavio metodu za određivanje trofazne relativne propusnosti koja se temelji na statističkom modelu vjerojatnosti.¹¹ Podaci potrebni za izračunavanje relativne propusnosti za naftu, k_{ro} , dva su seta dvofaznih relativnih propusnosti u sistemima voda-nafta s vrijednostima k_{rw} i k_{row} , i plin-nafta s vrijednostima k_{rg} i k_{rog} . Efekti histereze su, koliko je to bilo moguće, uzeti u obzir korištenjem odgovarajućih dvofaznih podataka. Osnovna postavka Stoneove metode je da su relativna propusnost za močivu fazu (voda) i relativna propusnost za nemočivu fazu (plin) funkcije jedino od vlastitih vrijednosti zasićenja za vodu i plin. Istovremeno, relativna propusnost za fazu srednje odnosno prijelazne močivosti (za naftu) ponaša se znatno složenije, a model statističke vjerojatnosti koristi se sa setovima dvofaznih podataka da bi predvidio njezino ponašanje. U jednadžbama (12) i (13) su prikazana normalizirana zasićenja fluidima koja su definirana na način da tretiraju zasićenje vezanom vodom, S_{wir} , i preostalo zasićenje naftom, S_{or} , kao zasićenja koja predstavljaju nepokretne fluide:

$$S_o^* = \frac{S_o - S_{or}}{1 - S_{wir} - S_{or}} \quad (\text{za } S_o \geq S_{or}) \quad (12)$$

i:

$$S_w^* = \frac{S_w - S_{wir}}{1 - S_{wir} - S_{or}} \quad (\text{za } S_w \geq S_{wir}) \quad (13)$$

Treba obratiti pažnju da je:

$$S_g^* = \frac{S_g}{1 - S_{wir} - S_{or}} \quad (14)$$

i:

$$S_g^* + S_w^* + S_o^* = 1 \quad (15)$$

Kad je normalizirano zasićenje naftom $S_o^* = 100\%$, k_{ro} je također 100%, ali smanjivanje S_o^* (povećavanjem zasićenja vodom i/ili plinom) uzrokuje smanjenje k_{ro} koje je veće nego smanjenje S_o^* . β_w definiran kao faktor s kojim se množi S_o^* da bi se uklonila disproporcionalnost u smanjivanju između k_{ro} i S_o^* zbog prisutnosti pokretne vode, i uvodi se pretpostavka da je β_w samo funkcija zasićenja vodom. Na sličan način je definiran i faktor $\beta_g = \beta_g(S_g^*)$. Pretpostavlja se da su kombinacije protjecanja nafta-voda i plin-nafta međusobno nezavisni događaji, tako da se može definirati jednadžba (16) kao relacija između relativne propusnosti za naftu i normaliziranog zasićenja naftom na slijedeći način:

$$k_{ro} = S_o^* \cdot \beta_w \cdot \beta_g \quad (16)$$

Vrijednosti faktora β_w , koji je u funkciji zasićenja vodom, dobiju se iz eksperimentom mjerenih k_{row} vrijednosti postavljanjem u jedn. (16) da je $\beta_g = 1$ i $S_g^* = 0$. Kad se iz tako modificirane jednadžbe (16) izluči β_w , dobiva se:

$$\beta_w = \frac{k_{row}}{1 - S_w^*} \quad (\text{iz dvofaznih podataka}) \quad (17)$$

Pretpostavlja se da je u jedn. (17) k_{row} samo u funkciji zasićenja vodom, kao što se i određuje kod dvofaznih eksperimenata. Na sličan način može se izvesti jednadžba za faktor β_g kao funkcija od S_g^* iz eksperimentom utvrđenih k_{rog} vrijednosti:

$$\beta_g = \frac{k_{rog}}{1 - S_g^*} \quad (\text{iz dvofaznih podataka}) \quad (18)$$

Jednadžbe od (12) do (18) definiraju relativnu propusnost za naftu u trofaznom sistemu. Pojam o identičnim mikroskopskim raspodjelama fluida u okolišu dvofaznih međupovršina je temelj za pretpostavku da je faktor β_w u funkciji samo zasićenja vodom, dok je β_g u funkciji samo zasićenja plinom. Isto tako predodžba da su voda i plin prostorno odvojeni vodi nas do pretpostavke da su zavisnosti protjecanja nafte o vodi ili o plinu dva nezavisna fenomena. Zbog toga je teorija vjerojatnosti vezana uz pretpostavku da je vjerojatnost blokiranja protjecanja nafte vodom, plinom ili s obadva fluida jednaka umnošku tih faktora, $\beta_w \cdot \beta_g$, te je k_{ro} tako i definiran u jednadžbi (16). Ovaj model vjerojatnosti je provjeren na eksperimentalnim podacima nekoliko prethodno objavljenih radova od poznatih autora iz tog područja (Coreya, Daltona i Sarafa) i pokazao je dobro slaganje s mjerenim vrijednostima.¹¹

Osim prethodno opisanog članka, Stone je kasnije objavio još jedan rad u kojem je revidirao rezultate prikazane u prvom radu.¹² U tom radu je dao novu jednadžbu, tzv. jednadžbu za predviđanje trofazne relativne propusnosti koja se temelji na teoriji protjecanja kroz kanaliće:

$$k_{ro} = (k_{row} + k_{rw}) \cdot (k_{rog} + k_{rg}) - (k_{rw} + k_{rg}) \quad (19)$$

U istom radu je prikazan izvod te jednadžbe, a data je i teoretska osnova objašnjenjima. Da bi se pojasnio način na koji se dobiju podaci potrebni za uvrštavanje u ovu jednadžbu, i kako se ti podaci koriste za izradu ternarnog dijagrama, potrebno je objasniti slijedeće. Ako su date određene vrijednosti S_w i S_g u trofaznom sistemu, onda se S_w koristi za dobivanje k_{rw} i k_{row} vrijednosti iz podataka dvofaznog sistema voda-nafta; dok se S_g koristi za dobivanje k_{rg} i k_{rog} vrijednosti iz podataka dvofaznog sistema plin-nafta. Relativne propusnosti za plin i naftu, k_{rg} i k_{rw} , direktno se uvrštavaju u trofazni sistem, dok se trofazna relativna propusnost za naftu, k_{ro} , izračunava prema jednadžbi (19). U ovom novijem radu Stone je objasnio da je poboljšao svoj model vjerojatnosti prikazan u prethodnom radu. Relativne propusnosti predviđene pomoću ovog modela pokazale su još bolje slaganje s eksperimentalnim podacima. Da bi to potkrijepio, ponovno je koristio podatke istih autora (Coreya, Daltona i Sarafa).¹² Osim toga, u ovom radu je koristio i podatke preostalog zasićenja naftom,

S_{or} , od Holmgrena i Morseja da bi dodatno procijenio valjanost jednadžbe (19).¹²

3.3. Chiericiev model

Chierici je u svojem radu koristio 4- i 5-parametarske jednadžbe za dobivanje krivulja relativnih propusnosti sistema plin-nafta sa smjerom procesa u pravcu isušivanja (*drainage*), i sistema voda-nafta sa smjerom procesa u pravcu upijanja (*imbibition*).³ Ove su krivulje, kao što autor napominje, postigle dobro slaganje s eksperimentalnim podacima, posebno kod početnih i završnih točaka, bolje nego Coreyev model i polinomne aproksimacije. Osnovna je karakteristika Chiericievog modela da neki od parametara u tom modelu imaju fizikalno značenje, dok se drugi mogu odrediti pomoću nelinearne regresije primijenjene na podatke eksperimentalno dobivenih točaka, te se mogu podesiti (adustirati) u svrhu predstavljanja pseudorelativnih krivulja relativnih propusnosti. U jednadžbama u nastavku su oznake koje je Chierici koristio u svojem radu.³

Za sistem plin-nafta sa smjerom procesa u pravcu isušivanja predložio je slijedeće jednadžbe:

$$k_{ro} = e^{-A \cdot R_g^L} \quad (20)$$

i:

$$k_{rg} = e^{-B \cdot R_g^{-M}} \quad (21)$$

gdje su A , B , L i M pozitivni brojevi, dok je R_g normalizirano zasićenje prema jednadžbi:

$$R_g = \frac{S_g - S_{gc}}{1 - S_{iw} - S_g} \quad (22)$$

pri čemu je:

$$S_g - S_{gc} = 0 \text{ za } S_g \leq S_{gc}$$

Jednadžbe (20) i (21) su 4-parametarske jednadžbe u kojima iskustveni koeficijenti A , L , S_{gc} i S_{iw} služe za određivanje funkcionalne ovisnosti $k_{ro}(S_o)$, dok iskustveni koeficijenti B , M , S_{gc} i S_{iw} služe za određivanje funkcionalne ovisnosti $k_{rg}(S_g)$. Samo S_{gc} i S_{iw} imaju fizikalno značenje. Vrijednosti iskustvenih koeficijenata A , L , B i M određuju se pomoću nelinearne regresije primijenjene na setove eksperimentalno mjerenih točaka. Praksa je pokazala da je bolje da se postupak regresije za dobivanje koeficijenata A , L , B i M ne primijeni direktno na jednadžbe (20) i (21), nego na njihove logaritamske oblike:

$$-\ln k_{ro} = A \cdot R_g^L \quad (23)$$

$$-\ln k_{rg} = B \cdot R_g^{-M} \quad (24)$$

U nastavku su prikazane jednadžbe za sistem voda-nafta sa smjerom procesa u pravcu upijanja koje su pokazale da vrlo dobro opisuju eksperimentom dobivene točke, uključujući i ponašanje kod početnih i završnih točaka:

$$k_{ro}^* = e^{-A \cdot R_w^L} \quad (25)$$

$$k_{rw}^* = e^{-B \cdot R_w^{-M}} \quad (26)$$

gdje su A , B , L i M pozitivni brojevi, dok su:

$$R_w = \frac{S_w - S_{iw}}{1 - S_{or} - S_w} \quad (27)$$

$$k_{rw}^* = \frac{k_{rw}}{k_{rw}(S_{or})} \quad (28)$$

i

$$k_{ro}^* = \frac{k_{ro}}{k_{ro}(S_{iw})} \quad (29)$$

Jednadžbe (25) i (26) su 5-parametarske jednadžbe, gdje iskustveni koeficijenti A , L , S_{iw} , S_{or} i $k_{ro}(S_{iw})$ služe za izračunavanje funkcionalne ovisnosti $k_{ro}(S_o)$, dok iskustveni koeficijenti B , M , S_{iw} , S_{or} i $k_{rw}(S_{or})$ služe za izračunavanje funkcionalne ovisnosti $k_{rw}(S_w)$. Od ovih koeficijenata jedino S_{iw} , S_{or} , $k_{ro}(S_{iw})$ i $k_{rw}(S_{or})$ imaju fizikalno značenje, te se za statistički homogene zone ležišta njihove vrijednosti mogu odrediti korištenjem korelacija. Vrijednosti iskustvenih koeficijenata A , L , B i M određuju se primjenom nelinearne regresije na setove eksperimentalno mjerenih točaka. U ovom se slučaju, kao i u prethodnom, jednadžbe (25) i (26) logaritmiraju da bi se postiglo bolje usklađenje krivulja s mjerenim točkama. Ovo je posebno važno za dobivanje dobrog usklađenja u blizini početnih i završnih točaka krivulja, gdje se s prije korištenim metodama ne uspijeva u dovoljnoj mjeri približiti mjerenim točkama.³

4. PRIMJER OBRADJE PODATAKA PRIJE UNOŠENJA U MODEL LEŽIŠTA

Prije nego li se podaci relativnih propusnosti unesu u simulacijski model ležišta ugljikovodika, osobitu pažnju treba posvetiti analizi i odabiru krivulja dobivenih na osnovi laboratorijskih mjerenja. Ako za jedno određeno heterogeno ležište, odnosno određenu heterogenu litologiju, postoji dovoljan broj korektno mjerenih i analiziranih krivulja, može se pristupiti njihovoj statističkoj obradi. U nastavku je prikazan primjer koji prikazuje obradu podataka relativnih propusnosti.

4.1. Sažeti prikaz mjerenja na jezgrama

Laboratorijska mjerenja relativnih propusnosti sistema nafta-voda izvedena su na šest uzoraka jezgara. Vrsta jezgrovane stijene je konsolidirani pješčenjak i svi uzorci pripadaju istom ležištu, odnosno istoj ili sličnoj litologiji, što će u nastavku teksta biti pojašnjeno. Mjerenja su obavljena metodom porozne pločice koja spada među prethodno opisane stacionarne metode mjerenja na jezgrama. Uzorci su vraćeni u originalno stanje pod vakuumom s pročišćenom mineralnom naftom čiji je viskozitet 20 mPa·s. Svaki uzorak je postavljen u hidraulički držač jezgre i zaplavljen s naftom dok nije uklonjen sav zarobljeni plin (ovim mjerenjima su prethodila mjerenja relativnih propusnosti sistema plin-nafta). Nakon toga je ponovno mjerena efektivna propusnost za naftu. Mjerenja su izvedena istiskivanjem nafte pomoću sintetizirane slane vode čiji su sastav i fizikalne osobine jednake ili vrlo slične stvarnoj slojnoj vodi. Prirasti volumena proizvedene nafte i vode zabilježeni su u funkciji vremena i pokusi su završeni

Tablica 1. Podaci relativnih i normaliziranih relativnih propusnosti za uzorak br. 1 u ovisnosti o zasićenju vodom i normaliziranom zasićenju vodom⁷

S_w [dijelovi jedinice]	S_w^N [dijelovi jedinice]	$k_{row}=k_{row}^N$ [dijelovi jedinice]	$(k_{row}^N)_{av}$ [dijelovi jedinice]	k_{rw} [dijelovi jedinice]	k_{rw}^N [dijelovi jedinice]	$(k_{rw}^N)_{av}$ [dijelovi jedinice]
0,153	0,000	1,000 0	1,000 0	0,000 0	0,000 0	0,000 0
0,233	0,168	0,425 0	0,419 8	0,088 0	0,162 7	0,140 9
0,291	0,290	0,231 0	0,203 3	0,130 0	0,240 3	0,256 5
0,364	0,443	0,095 0	0,071 9	0,227 0	0,419 6	0,409 0
0,386	0,489	0,065 0	0,051 4	0,270 0	0,499 1	0,456 1
0,406	0,532	0,049 0	0,037 6	0,305 0	0,563 8	0,499 3
0,434	0,590	0,032 0	0,024 4	0,351 0	0,648 8	0,560 3
0,466	0,658	0,022 0	0,015 2	0,410 0	0,757 9	0,630 8
0,527	0,786	0,008 2	0,006 8	0,491 0	0,907 6	0,767 2
0,552	0,838	0,005 0	0,004 8	0,518 0	0,957 5	0,823 7
0,578	0,893	0,003 1	0,003 1	0,540 0	0,998 2	0,882 9
0,629	1,000	0,000 0	0,000 0	0,541 0	1,000 0	1,000 0

Tablica 2. Podaci relativnih i normaliziranih relativnih propusnosti za uzorak br. 2 u ovisnosti o zasićenju vodom i normaliziranom zasićenju vodom⁷

S_w [dijelovi jedinice]	S_w^N [dijelovi jedinice]	$k_{row}=k_{row}^N$ [dijelovi jedinice]	$(k_{row}^N)_{av}$ [dijelovi jedinice]	k_{rw} [dijelovi jedinice]	k_{rw}^N [dijelovi jedinice]	$(k_{rw}^N)_{av}$ [parts of unit]
0,178	0,000	1,000 0	1,000 0	0,000 0	0,000 0	0,000 0
0,305	0,381	0,085 0	0,111 2	0,116 0	0,666 7	0,346 7
0,392	0,643	0,025 0	0,016 8	0,132 0	0,758 6	0,615 1
0,433	0,766	0,011 0	0,007 6	0,144 0	0,827 6	0,745 8
0,468	0,871	0,003 4	0,003 8	0,157 0	0,902 3	0,859 0
0,490	0,937	0,000 88	0,001 8	0,171 0	0,982 8	0,930 9
0,511	1,000	0,000 0	0,000 0	0,174 0	1,000 0	1,000 0

Tablica 3. Podaci relativnih i normaliziranih relativnih propusnosti za uzorak br. 3 u ovisnosti o zasićenju vodom i normaliziranom zasićenju vodom⁷

S_w [dijelovi jedinice]	S_w^N [dijelovi jedinice]	$k_{row}=k_{row}^N$ [dijelovi jedinice]	$(k_{row}^N)_{av}$ [dijelovi jedinice]	k_{rw} [dijelovi jedinice]	k_{rw}^N [dijelovi jedinice]	$(k_{rw}^N)_{av}$ [dijelovi jedinice]
0,069	0,000	1,000 0	1,000 0	0,000 0	0,000 0	0,000 0
0,236	0,300	0,184 0	0,190 9	0,082 0	0,148 3	0,266 1
0,296	0,408	0,101 0	0,092 7	0,129 0	0,233 3	0,372 9
0,338	0,483	0,063 0	0,053 9	0,187 0	0,338 2	0,449 4
0,364	0,530	0,044 0	0,038 2	0,231 0	0,417 7	0,497 3
0,390	0,576	0,035 0	0,027 0	0,283 0	0,511 8	0,545 7
0,431	0,650	0,024 0	0,016 0	0,346 0	0,625 7	0,622 8
0,544	0,853	0,006 0	0,004 4	0,463 0	0,837 3	0,839 4
0,579	0,916	0,003 0	0,002 5	0,507 0	0,916 8	0,907 7
0,626	1,000	0,000 0	0,000 0	0,553 0	1,000 0	1,000 0

nakon što je omjer k_{rw}/k_{ro} premašio vrijednost 100. Nakon toga je izmjerena efektivna propusnost za vodu. U tablicama od 1 do 6 prikazani su podaci dobiveni pokusima na jezgrama.

4.2. Prosječne krivulje iz laboratorijskih podataka

Ovdje će biti ukratko prikazano praktično korištenje metode nelinearne regresije primijenjene na mjerene podatke u svrhu dobivanja prosječnih krivulja relativnih

propusnosti. Za dobivanje srednje funkcionalne ovisnosti ovdje prikazanih podataka korištena je metoda obrade podataka relativnih propusnosti Sigmunda i McCafferya¹⁰ koja uz tri prethodno prikazana, poznata i često korištena modela, predstavlja još jedan kvalitetan i u praksi potvrđeni model relativnih propusnosti. U nastavku su sve prikazane oznake u skladu s oznakama korištenim u spomenutom radu.¹⁰ Ta se metoda temelji na određivanju srednjih normaliziranih krivulja k_{row}^N i k_{rw}^N u funkciji normaliziranog zasićenja vodom, S_w^N . Na

Tablica 4. Podaci relativnih i normaliziranih relativnih propusnosti za uzorak br. 4 u ovisnosti o zasićenju vodom i normaliziranom zasićenju vodom⁷

S_w [dijelovi jedinice]	S_w^N [dijelovi jedinice]	$k_{row}=k_{row}^N$ [dijelovi jedinice]	$(k_{row}^N)_{av}$ [dijelovi jedinice]	k_{rw} [dijelovi jedinice]	k_{rw}^N [dijelovi jedinice]	$(k_{rw}^N)_{av}$ [dijelovi jedinice]
0,122	0,000	1,000 0	1,000 0	0,000 0	0,000 0	0,000 0
0,184	0,160	0,211 0	0,438 6	0,244 0	0,366 9	0,133 7
0,190	0,176	0,189 0	0,402 1	0,251 0	0,377 4	0,147 9
0,252	0,336	0,102 0	0,151 0	0,305 0	0,458 6	0,301 5
0,366	0,630	0,026 0	0,018 3	0,419 0	0,630 1	0,602 4
0,405	0,731	0,012 0	0,009 4	0,476 0	0,715 8	0,709 0
0,437	0,814	0,005 7	0,005 7	0,522 0	0,785 0	0,797 5
0,461	0,876	0,002 9	0,003 6	0,569 0	0,855 6	0,864 6
0,470	0,899	0,002 3	0,002 9	0,583 0	0,876 7	0,889 8
0,509	1,000	0,000 0	0,000 0	0,665 0	1,000 0	1,000 0

Tablica 5. Podaci relativnih i normaliziranih relativnih propusnosti za uzorak br. 5 u ovisnosti o zasićenju vodom i normaliziranom zasićenju vodom⁷

S_w [dijelovi jedinice]	S_w^N [dijelovi jedinice]	$k_{row}=k_{row}^N$ [dijelovi jedinice]	$(k_{row}^N)_{av}$ [dijelovi jedinice]	k_{rw} [dijelovi jedinice]	k_{rw}^N [dijelovi jedinice]	$(k_{rw}^N)_{av}$ [dijelovi jedinice]
0,112	0,000	1,000 0	1,000 0	0,000 0	0,000 0	0,000 0
0,209	0,299	0,221 0	0,191 5	0,157 0	0,219 3	0,005 7
0,222	0,340	0,168 0	0,147 5	0,201 0	0,280 7	0,008 4
0,246	0,414	0,110 0	0,088 9	0,240 0	0,335 2	0,017 4
0,283	0,528	0,062 0	0,038 7	0,322 0	0,449 7	0,049 0
0,315	0,627	0,032 0	0,018 8	0,398 0	0,555 9	0,107 3
0,333	0,682	0,019 0	0,012 9	0,450 0	0,628 5	0,159 8
0,353	0,744	0,011 0	0,008 7	0,502 0	0,701 1	0,241 0
0,377	0,818	0,005 6	0,005 5	0,576 0	0,804 5	0,379 3
0,402	0,895	0,002 5	0,003 1	0,648 0	0,905 0	0,585 3
0,417	0,941	0,001 2	0,001 7	0,683 0	0,953 9	0,746 5
0,436	1,000	0,000 0	0,000 0	0,716 0	1,000 0	1,000 0

Tablica 6. Podaci relativnih i normaliziranih relativnih propusnosti za uzorak br. 6 u ovisnosti o zasićenju vodom i normaliziranom zasićenju vodom⁷

S_w [dijelovi jedinice]	S_w^N [dijelovi jedinice]	$k_{row}=k_{row}^N$ [dijelovi jedinice]	$(k_{row}^N)_{av}$ [dijelovi jedinice]	k_{rw} [dijelovi jedinice]	k_{rw}^N [dijelovi jedinice]	$(k_{rw}^N)_{av}$ [dijelovi jedinice]
0,103	0,000	1,000 0	1,000 0	0,000 0	0,000 0	0,000 0
0,178	0,182	0,290 0	0,388 0	0,092 0	0,146 0	0,153 8
0,198	0,231	0,212 0	0,292 6	0,140 0	0,222 2	0,199 4
0,235	0,320	0,125 0	0,167 2	0,171 0	0,271 4	0,286 3
0,293	0,461	0,045 0	0,063 2	0,233 0	0,369 8	0,427 2
0,367	0,641	0,019 0	0,017 0	0,333 0	0,528 6	0,613 2
0,430	0,794	0,007 3	0,006 4	0,430 0	0,682 5	0,775 7
0,472	0,896	0,002 9	0,003 1	0,501 0	0,795 2	0,885 9
0,495	0,951	0,001 2	0,001 4	0,539 0	0,855 6	0,946 8
0,515	1,000	0,000 0	0,000 0	0,630 0	1,000 0	1,000 0

slikama 1 i 2 su, zajedno od svih šest prethodno opisanih uzoraka, prikazane točke mjerenih vrijednosti k_{row} ili k_{rw} u funkciji zasićenja. Ti uzorci imaju različite početne i završne točke zasićenja, te je zbog toga na slikama uočljivo znatnije rasipanje među parovima vrijednosti (k_{row}, S_w) i (k_{rw}, S_w) . Zbog toga su vrijednosti zasićenja i relativnih propusnosti normalizirane prema jedn. (31), koja je slična prethodno prikazanoj jednadžbi (13):

$$S_w^N = S_e = \frac{S_w - (S_w)_{\min}}{(S_w)_{\max} - (S_w)_{\min}} \quad (31)$$

i prema prethodno prikazanim jednadžbama (28) i (29). Na dobivene parove vrijednosti (S_w^N, k_{rw}^N) i (S_w^N, k_{row}^N) primjenjuje se regresiona analiza prema slijedećim modelima relativnih propusnosti za močivu fazu:¹⁰

Tablica 7. Podaci za dijagram ovisnosti zasićenja vezanom vodom i preostalog zasićenja naftom o apsolutnoj propusnosti - k_{air} o parametru $(k_{air}/\phi)^{1/2}$ i o indikatoru zone protjecanja - F_{zi} ^{1,7,10}

Uzorak br.	S_{wir} [dijelovi jedinice]	S_{orw} [dijelovi jedinice]	k_{air} [$10^{-3} \mu m^2$]	$k_0(S_{wir})$ [$10^{-3} \mu m^2$]	ϕ [dijelovi jedinice]	$(k_{air}/\phi)^{1/2}$ [μm]	F_{zi}
1	0,153	0,371	194	133	0,212	30,25	3,531
2	0,178	0,489	3,9	0,23	0,119	5,72	1,331
3	0,069	0,374	787	519	0,171	67,84	10,327
4	0,122	0,491	356	236	0,145	49,55	9,174
5	0,112	0,564	117	74	0,159	27,13	4,505
6	0,103	0,485	13	8,1	0,143	9,53	1,794

$$k_{rw}^* = k_{rw}^N = \frac{(S_e)^{e_w} + A \cdot S_e}{1 + A} \quad (32)$$

i za nemoćivu:

$$k_{ro}^* = k_{ro}^N = \frac{(1 - S_e)^{e_{nw}} + B \cdot (1 - S_e)}{1 + B} \quad (33)$$

Parovi normaliziranih vrijednosti (k_{row}^N , S_w^N) i (k_{rw}^N , S_w^N) prikazani su na slikama 3 i 4 gdje je uočljiva dobra korelativnost među podacima, što je potvrda iste litološke pripadnosti i ujedno kriterij za odabir uzoraka za statističku obradu. To je bila osnova za primjenu regresione analize zajednički na svih 6 odabranih uzoraka spomenutih u prethodnom potpoglavlju. Kao rezultat regresione analize dobivaju se osrednjene normalizirane krivulje $k_{row}^N(S_w^N)$ i $k_{rw}^N(S_w^N)$ prikazane u lin-log dijagramu na istim slikama.

4.3. Konstrukcija krivulja relativnih propusnosti na temelju poznatih početnih i završnih točaka zasićenja

Krivulje relativnih propusnosti $k_{row}(S_w)$ i $k_{rw}(S_w)$ određuju se na osnovi poznavanja trenda ovisnosti početnih (S_{wir}) i završnih (S_{orw}) točaka zasićenja u funkciji: 1. apsolutne propusnosti - k (k_{air}), 2. parametra $(k/\phi)^{1/2}$ ili 3. indikatora zone protjecanja - F_{zi} ¹⁰. Jednadžba indikatora zone protjecanja je:

$$F_{zi} = \frac{R_{qi}}{\phi_z} = \frac{0,0316 \cdot \sqrt{\frac{f}{\phi}}}{\left(\frac{\phi}{1 - \phi} \right)} \quad (34)$$

Faktor 0,0316 je prisutan jer je uzeto u obzir da se u jednadžbu (34) propusnosti uvrstavaju u $10^{-3} \mu m^2$.

U tablici 7 prikazani su podaci potrebni za određivanje prosječnih trendova mjerenih završnih točaka zasićenja u funkciji tri prethodno objašnjena parametra. Na slici 5 su u lin-log dijagramu prikazani pravci određeni pomoću eksponencijalne regresije na 6 kombinacija ovisnosti objašnjenih u legendi slike. Nakon toga se odabere kombinacija k (k_{air}), $(k/\phi)^{1/2}$ ili F_{zi} koja pokazuje najbolju korelaciju na osnovi regresione analize, R^2 , te se na osnovi odabrane kombinacije napravi podjela na statističke razrede tzv. hidrauličkih tipova ležišne stijene (*HT*) unutar iste litološke pripadnosti, ali s različitim k i ϕ . Prema sredinama odabranih statističkih razreda *HT*

očitaju se iz dijagrama na sl. 5 parovi vrijednosti (S_{wir} , S_{orw}), koji su potrebni za denormalizaciju prema S_w^N u prethodnom odjeljku opisanih $k_{row}^N(S_w^N)$ i $k_{rw}^N(S_w^N)$ krivulja. Nakon toga se na istom principu, koji ovdje nije detaljnije opisan, denormaliziraju krivulje i prema relativnim propusnostima, k_{row}^N i k_{rw}^N . Na osnovi toga dobiju se familije krivulja relativnih propusnosti s različitim početnim i završnim točkama koje opisuju različite hidrauličke tipove (*HT*), odnosno tipove stijene (*RT*), a služe za unos u simulacijski model ležišta.

5. ANALIZA PRISTUPA TRETMANU RELATIVNIH PROPUSNOSTI U SIMULACIJSKIM PROGRAMIMA

Pojedini hidraulički tip stijene, *HT*, ili tip stijene, *RT* (rock type), predstavljen je u modelu ležišta s jednim setom krivulja relativnih propusnosti i kapilariteta. Model može sadržavati jednu ili više *HT* (*RT*), ovisno o manje ili više izraženoj heterogenosti kolektora odnosno kompleksnosti građe ležišne stijene. U Black Oil simulatoru može biti definirano do 40 različitih tipova stijena.⁸ Unutar svakog *RT* seta krivulja u simulatoru se može kreirati odnosno pohraniti tri tipa krivulja:

- korelacijske krivulje, koje se automatski generiraju uz korištenje različitih modela regresije prema industrijskim standardima,
- laboratorijske krivulje, koje predstavljaju direktna mjerenja na jezgrama, ili iz mjerenja proizvodnih podataka, i
- simulacijske krivulje, koje se koriste u simulaciji.

Nakon što su podaci unešeni u model, s bilo kojim od ova tri tipa krivulja može se manipulirati na različite načine. Može ih se mijenjati grafički ili promjenom brojčanih podataka u tablicama. Isto tako je moguće na istom grafu radi komparacije istovremeno prikazati različite tipove krivulja. Osim toga, može se kopirati iz jednog u drugi tip krivulja. Tretman efekta histereze također je moguć kod krivulja relativnih propusnosti, kao i kod krivulje kapilarnog tlaka.

Za kreiranje sistema trofaznog protjecanja, koji se generira automatski prema odabranom modelu Stonea, npr. Stonea II, i koji se zapravo koristi u simulacijskom modelu ležišta, potrebna su dva različita seta krivulja relativnih propusnosti: voda-nafta i plin-kapljevina.⁹ Nakon što su dvofazni setovi podataka relativnih propusnosti unešeni, mogu se pomoću simulatora

generirati trofazne relativne propusnosti. Opis korištenja različitih verzija Stoneovih modela trofaznog protjecanja detaljnije je prikazan u SimBest II priručniku,⁹ dok je teoretska osnova ukratko objašnjena u središnjem dijelu ovog rada.^{11,12}

ZAKLJUČAK

Primjena znanja sažeto prikazanog u ovom radu može korisno poslužiti u boljem razumijevanju važnosti koju treba posvetiti pripremi i analizi podataka koji se unose u modele ležišta ugljikovodika. Jedan od bitnijih i delikatnijih dijelova kompleta inicijalizacijskih ulaznih podataka, koji čine model ležišta, upravo predstavljaju krivulje relativnih propusnosti jer njihov oblik znatno utječe na simulaciju proizvodnog ponašanja ležišta ugljikovodika. Stoga će sveukupno poznavanje ovog segmenta znanosti dobro doći u fazi simulacije nazvanoj usklađivanje historijata, gdje će kvaliteta ulaznih podataka doći do izražaja. U slučaju dobro definiranih krivulja relativnih propusnosti faza usklađivanja historijata ne bi trebala biti mukotrpa, te će samo male korekcije unešenih krivulja voditi do pouzdane verifikacije modela ležišta.

POPIS OZNAKA

A	=	empirijski koeficijent u jednadžbi za relativnu propusnost
B	=	empirijski koeficijent u jednadžbi za relativnu propusnost
B_g	=	volumetrički faktor za plin
B_o	=	volumetrički faktor za naftu
B_{oi}	=	početni volumetrički faktor za naftu
f_{o2}	=	udio nafte u protoku tekuće faze na izlaznom kraju jezgre, dio jed.
F_{zi}	=	indikator zone protjecanja
HT	=	hidraulički tip stijene [<i>hydraulic (flow) unit</i>]
k	=	apsolutna propusnost, $10^{-3} \mu\text{m}^2$
k_g	=	efektivna propusnost za plin, $10^{-3} \mu\text{m}^2$
k_o	=	efektivna propusnost za naftu, $10^{-3} \mu\text{m}^2$
k_{rg}	=	relativna propusnost za plin, dio jed.
k_{ro}	=	relativna propusnost za naftu u trofaznom sistemu fluida, dio jed.
$k_{ro}(S_w)$	=	relativna propusnost za naftu kod početnog zasićenja vodom, dio jed.
k_{rog}	=	relativna propusnost za naftu u dvofaznom sistemu nafta-plin, dio jed.
k_{row}	=	relativna propusnost za naftu u dvofaznom sistemu nafta-voda, dio jed.
k_{rw}	=	relativna propusnost za vodu, dio jed.
$k_{rw}(S_{or})$	=	relativna propusnost za naftu kod preostalog zasićenja naftom, dio jed.
k_{ro}^*	=	normalizirana relativna propusnost za naftu, dio jed.
k_{rw}^*	=	normalizirana relativna propusnost za vodu, dio jed.
k_{rw}^N	=	normalizirana relativna propusnost za močivu fazu, dio jed.
k_{rwn}^N	=	normalizirana relativna propusnost za nemočivu fazu, dio jed.
L	=	empirijski koeficijent u jednadžbi za relativnu propusnost
M	=	empirijski koeficijent u jednadžbi za relativnu propusnost
N	=	početne rezerve nafte, m^3

N_p	=	količina proizvedene nafte, m^3
P_c	=	kapilarni tlak, Pa
q_o	=	količina nafte u protoku, cm^3/s
q_w	=	količina vode u protoku, cm^3/s
Q_w	=	kumulativna količina utisnute vode, $1/(\text{porni volumen})$
R	=	omjer slobodnog plina i nafte
R_g	=	normalizirano zasićenje plinom, dio jed.
R_p	=	omjer ukupnog proizvedenog plina i nafte
R_{qi}	=	indeks kvalitete ležišta, μm
R_s	=	omjer otopljenog (naftnog) plina i nafte
R_T	=	tip stijene (rock type)
R_w	=	normalizirano zasićenje vodom, dio jed.
S_e	=	normalizirano zasićenje močivom fazom, dio jed.
S_g	=	zasićenje plinom, dio jed.
S_{gc}	=	kritično zasićenje plinom, dio jed.
S_g^*	=	normalizirano zasićenje plinom, dio jed.
S_w	=	početno zasićenje vodom, dio jed.
S_L	=	zasićenje tekućom fazom, dio jed.
S_{Lr}	=	rezidualno zasićenje tekućom fazom, dio jed.
S_o	=	zasićenje naftom, dio jed.
S_{or}	=	rezidualno zasićenje naftom, dio jed.
S_{onw}	=	rezidualno zasićenje naftom u dvofaznom sistemu nafta-voda, dio jed.
S_o^*	=	normalizirano zasićenje naftom, dio jed.
S_w	=	zasićenje vodom ili močivom fazom, dio jed.
$S_{w,av}$	=	prosječno zasićenje vodom, dio jed.
S_{w2}	=	zasićenje vodom na izlaznom kraju jezgre, dio jed.
S_{wi}	=	početno zasićenje vodom, dio jed.
S_{wir}	=	nesmanjivo zasićenje vodom (zasićenje vezanom vodom), dio jed.
S_w^*	=	normalizirano zasićenje vodom, dio jed.
S_w^N	=	normalizirano zasićenje močivom fazom, dio jed.
$(S_w)_{max}$	=	maksimalno zasićenje močivom fazom, dio jed.
$(S_w)_{min}$	=	minimalno zasićenje močivom fazom, dio jed.
β_g	=	faktor koji uračunava blokiranje nafte plinom
β_w	=	faktor koji uračunava blokiranje nafte vodom
ε_w	=	parametar u jednadžbi za relativnu propusnost močive faze
ε_{nw}	=	parametar u jednadžbi za relativnu propusnost nemočive faze
μ_g	=	viskozitet plina, $\text{mPa}\cdot\text{s}$
μ_o	=	viskoznost nafte, $\text{mPa}\cdot\text{s}$
μ_w	=	viskoznost vode, $\text{mPa}\cdot\text{s}$
ϕ	=	šupljikavost, dio jed.
ϕ_z	=	omjer pornog volumena i volumena zrnaca



Autor:

Alan Feigl, mr. sc. Ekspert za razradu ležišta, INA-Industrija nafte d.d., SD Istraživanje i proizvodnja nafte i plina - Naftaplina, Sektor za upravljanje i inženjering polja, Služba za praćenje i nadzor ležišta, PJ za ležišni inženjering, Šubičeva 29, 10000 Zagreb, Hrvatska
Tel.: + 385 1 459-2282
Fax: + 385 1 459-2224
E-mail: alan.feigl@ina.hr

UDK: 553.982 : 553.28 : 519.876.5

553.982 ležišta nafte i plina
553.28 vrsta ležišta, tip stijena
519.876.5 matematičko modeliranje, simulacija