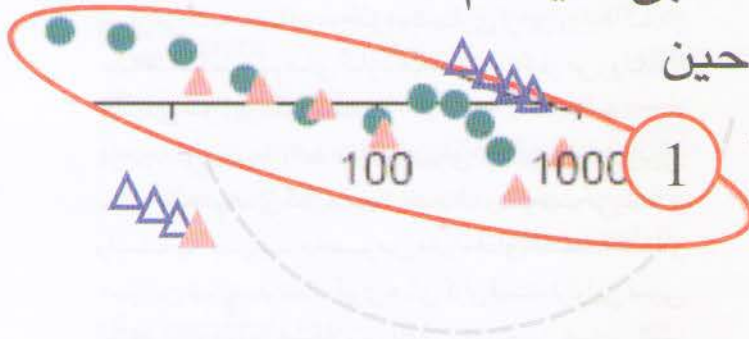




تغییرات تراوایی نسبی سیستم گاز میعانات در حین تولید در شرایط اطراف چاه

مترجم: هادی خلیلی دیزجی
شرکت نفت و گاز پارس

(قسمت اول)



تراوایی نسبی (K_r) در حالت پایا، تاثیر مثبت همسازی را حتی در سرعت‌های بالا تایید کردند. آنها مشاهده نمودند که وجود میعانات در ابتدا تراوایی را به خاطر وجود نیروهای اینرسی کاهش می‌دهد. ولی کم‌کم اثر مثبت همسازی باعث افزایش آن می‌گردد. هندرسون و همکاران میزان تاثیر اینرسی در سرعت‌های بالا را با تفاضل افت فشار پیش بینی شده توسط اثر همسازی، از مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه محاسبه کردند. این اختلاف معادل مقدار افزوده شده در معادله (Forchhemier) می‌باشد که شامل فاکتور اینرسی دوفازی (β_g) است. سپس آنها رابطه را برای محاسبه فاکتور اینرسی دوفازی گسترش دادند و توانستند با ناچیز در نظر گرفتن اثر اینرسی برای فاز مایع مقدار آن را فقط برای گاز محاسبه کنند.

ویتسون (Whitson) و همکاران همچنین رابطه‌ای برای K_{rg} ارائه دادند که به صورت نسبت تراوایی نسبی گاز به میعانات (K_{rg}/K_{rl})، عدد موینگی (N_c) و شامل تاثیر اینرسی در سرعت‌های بالا بود. برای تبیین کمی تاثیر مثبت همسازی، چندین ثابت تجربی وجود دارد که با تطابق مدل خود با اطلاعات محدود منتشر شده، این اعداد ثابت را تعیین کردند.

افت فشار در سرعت‌های بالا از خواص اینرسی در نظر گرفته می‌شود. اثر اینرسی در تراوایی نسبی موثر و β_g مستقر است که خود نیازمند فرمولاسیون جداگانه‌ای برای محاسبه β_g است علاوه بر این، مدل آنها بیشتر برای سیستم‌های Richgas-Condensate مناسب بوده که در آن جریان میعانات حایز اهمیت می‌باشد ($K_{rl} \gg \phi$).
مشکل عمده در محاسبه درست اثر اینرسی در تمامی روابط

فرایند چگالش (Condensation) اطراف چاه در یک مخزن گاز- میعانات، زمانی که فشار به زیر نقطه شبنم می‌رسد، سبب ایجاد منطقه‌ای می‌شود که فازهای گاز و میعانات هر دو جریان می‌یابند. رفتار جریان در این منطقه تحت تاثیر نیروهای لزجت (Viscous) نیروهای موینگی و نیروی اینرسی (Inertia) است.

این امر به همراه حضور میعانات در تمامی خلل، مکانیسم جریان را تعیین می‌کنند که به طور کلی با مکانیسم جریان در سیستم‌های نفت- گاز یا گاز- میعانات در تولید مخزن متفاوت می‌باشد. تعیین دقیق مقادیر تراوایی نسبی گاز- میعانات که برای گمانه‌زنی‌های انتقال دهی Deliverability نیازمند به کارگیری روش‌هایی متفاوت با سیستم‌های قدیمی نفت- گاز در کشش‌های بین سطحی (Interfacial tension) بسیار پایین تراوایی نسبی (K_r) به شدت از مقادیر کشش سطحی و اشباع‌شدگی مخزن تبعیت می‌کند، دانش و همکاران اولین کسانی بودند که افزایش سرعت و همچنین کاهش کشش سطحی را گزارش دادند. این رفتار جریان تاثیر مثبت همسازی نامیده می‌شود. جامع الاحمدی و همکاران اولین کسانی بودند که مکانیسم تاثیر مثبت همسازی را با در نظر گرفتن رقابت نیروهای لزجی و موینگی در مقیاس کوچک (در حد خلل و فرج) جایی که جریان همزمان دو فاز گاز و میعانات با قطع و وصل مسیر جریان گاز، به وسیله میعانات تولید شده وجود دارد را بررسی کردند.

در سرعت‌های بالا non-Darcy flow جایی که نیروهای اینرسی قابل توجه هستند و رقابت این نیروها با اثر همسازی قابل مقایسه‌اند، جریان در منطقه اطراف چاه پیچیده‌تر است. هندرسون (Henderson) و همکاران، در خلل چند اندازه‌گیری

تصحیح می شود. نمودار حالت امتزاج پذیر، نموداری است که با در نظر گرفتن تاثیر اینرسی به دست می آید. تابع درون یابی، رابطه تراوایی نسبی با سرعت و کشش سطحی را بیان می دارد. تراوایی نسبی برای میعانات، به وسیله جریان جزئی به تراوایی نسبی گاز مربوط می گردد. به همین جهت نیاز به محاسبه مجدد تراوایی نسبی برای میعانات از میان می رود.

ساختار رابطه سازی

در یک سیستم جریان دوفازی می توان از معادله جریان تکفازی استفاده کرد، مشروط بر این که به جای تراوایی موثر (K_e) از تراوایی مطلق (K) و به جای فاکتور اینرسی مغز (β_z) برای هر کدام از فازهای سیال از فاکتور اینرسی برای سیستم تک فازی (β) استفاده شود که خواهیم داشت:

$$\left[\nabla P = \frac{\mu}{k_e} V + \beta \rho |V|V \right]_j \quad j = L, g \quad (1)$$

که اندیس L برای میعانات، g نشانگر گاز است. با تغییرات در این معادله خواهیم داشت:

$$\left\{ V = \frac{k \nabla P}{\mu} \left(\frac{k_e / k}{1 + \frac{\beta \rho k_e}{\mu} |V|} \right) = \frac{k \nabla P}{\mu} A \right\}_j \quad (2)$$

بامقایسه قانون دارسی (Darcy) برای جریان دوفازی با معادله (2) می توان نتیجه گرفت که A_j معادل K_r برای هر کدام از فازهاست. به طور کلی ما تمایل داریم تفاوتی بین تراوایی نسبی در سرعت های کم و مقادیر آن در سرعت های بالا، جایی که تاثیرات همسازی و اینرسی قابل توجه هستند قابل نشویم. بنابراین از این پس واژه K_r به جای A در معادلات به کار خواهد رفت، مگر آنکه غیر از این بیان شود. در رابطه ای که براساس جریان جزئی به دست آمده، تراوایی نسبی گاز طبق رابطه (3) بین منحنی پایه و منحنی سیالات امتزاج پذیر درون یابی می شود:

$$k_{rg} = Y_g k_{rgb} + (1 - Y_g) k_{rgm} \quad (3)$$

این روش ساده درون یابی، مورد توجه بسیاری از محققان بوده زیرا اثر همسازی را روی K_r سیستم های گاز میعانات، در مقادیر مختلف اعداد موینگی (N_e) بیان می دارد و امکان دریافت اطلاع مستقیم از تغییرات تراوایی نسبی را فراهم می سازد و مناسب ترین رابطه برای کالیبره کردن حجم عظیمی از داده های آزمایشگاهی است. اشکال عمده روابطی از این

گزارش شده، نیاز آنها برای حدس درست، β_g است. روابط زیادی برای محاسبه β_g در مقالات وجود دارد. این روابط تغییرات β_g را براساس اشباع شدگی گاز (S_g) و یا K_{rg} بیان می کنند. با این وجود، بسیاری از این روابط که در مطالعات سیستم های گاز- میعانات به کار می روند، تا حدودی سوال برانگیز است.

در مجموع کلیه روابط موجود برای تخمین تراوایی نسبی برای سیستم های گاز- میعانات فاقد عمومیت می باشد و وابسته به ضرایب مخصوص مغزهای استفاده شده و همچنین نیازمند اندازه گیری های گران قیمت تراوایی نسبی است. علاوه بر این مشکلات زیادی برای تعیین همزمان تاثیر همسازی و اثر اینرسی که در گستره وسیعی از سرعت تغییر می کنند وجود دارد. بنابراین اهمیت و هدف این کار مضاعف می شود.

(1) به دست آوردن رابطه ای که تاثیرات مثبت همسازی و منفی اینرسی را همزمان بر پایه زمینه فیزیکی محکمی بیان کند.
(2) فراهم آوردن اطلاعات قابل اعتماد بر حسب تغییرات تراوایی نسبی در شرایط نزدیک چاه بدون نیاز به اندازه گیری های پیچیده و گران.

نتایج به دست آمده اخیر نشان می دهد که اگر به جای روش مرسوم که همان استفاده از مقدار اشباع به عنوان کمیت مستقل، از جریان جزئی (Fractional Flow) استفاده شود مقادیر تراوایی نسبی گاز میعانات در نمونه مغزها با مشخصات متفاوت بسیار شبیه به هم خواهد بود. با این اوصاف تعداد محدودی از منحنی های سنگ برای مطالعات مخزن کافی خواهد بود. به علاوه جریان جزئی با ترکیبات موجود در مایع و فشار موجود قابل شناسایی است که هر یک، از جمله اطلاعاتی به شمار می رود که برای یک مخزن به آسانی در دسترس است در حالی که درجه اشباع سیال بستگی به خواص سنگ دارد. از این رو از یک پایگاه داده ها که مقادیر تراوایی نسبی سیستم های گاز- میعانات در آن ثبت شده بود، برای ایجاد یک رابطه کلی که شامل مجموع تاثیرات همسازی و اینرسی به عنوان تابعی از جریان جزئی باشد، استفاده شد. در این روش جدید، تراوایی نسبی گاز در منحنی سیال بین یک حالت پایه و حالت امتزاج پذیر درون یابی می شود. نمودار حالت پایه در مقادیر بالای کشش سطحی و سرعت پایین اندازه گیری می شود. (داده هایی که عموماً اندازه گیری می گردند) سپس با در نظر گرفتن تاثیر اینرسی به وسیله رابطه ای که در این کار به دست می آید،

با مساوی قرار دادن سمت راست معادله (1) برای حالت فاز گاز امتزاج پذیر و حالت تک فازی ($\nabla P_{sm} = \nabla P_{gm}$) و صرف نظر از بخش اینرسی (قسمت دوم) در حال فعلی و جایگذاری معادله (7) در معادله (9) خواهیم داشت:

$$k_{egm} = kGTR \quad (10)$$

بامساوی قرار دادن سمت راست معادله (1) برای حالت فاز گاز امتزاج پذیر و حالت تکفازی ($\nabla P_{sm} = \nabla P_{gm}$) و این بار با در نظر گرفتن بخش اینرسی (قسمت دوم) و جایگذاری معادله 7 در معادله 10 خواهیم داشت:

$$\beta_{gm} = \frac{\beta}{[GTR]^2} \quad (11)$$

با جمع معادلات (10)، (11) با معادله (2) که برای حالت گاز امتزاج پذیر نوشته شده اند خواهیم داشت:

$$k_{rgm} = \left(\frac{GTR}{1 + \beta \rho_m \left(\frac{k}{\mu_m} \right) |V|_{sm}} \right) \quad (12)$$

در معادله (12) خواص مورد نیاز برای سیال اعم از ویسکوزیته (μ_m) و چگالی (ρ_m) به آسانی در دسترس نیست ولی ما می دانیم که هرگاه فشار به پایین تر از نقطه شبنم برسد، چگالی و ویسکوزیته فاز گاز کمتر از مقادیرشان در نقطه شبنم خواهد بود که این مقادیر نیز با مقدار آنها در نقطه بحرانی جایی که سیالات امتزاج پذیرند متفاوت می باشد، در یک مطالعه حساسیت نسبت به پارامترها، مشخص شد که میانگین حسابی خواص سیالات برای حالت گاز و میعانات در کلیه فشارها تقریب خوبی از مقدار متوسط آنها در نقطه شبنم، در بازه وسیعی از فشار زیر نقطه شبنم است. به عبارت دیگر، مقادیر متوسط، تقریباً در تمامی بازه فشار با هم برابرند و میزان انحراف آنها از مقدار متوسط با نزدیک شدن به نقطه شبنم کمتر می شود. این خواص متوسط تخمین زده شده در نقطه شبنم برای سیستم های دو فازی، خود دارای مقادیری نزدیک به مقدار حقیقیشان در حالت بحرانی دارند، شرایط بحرانی نیز می تواند با تغییر ترکیب مواد و تغییر فشار اشباع مایع به دست آید.

منحنی تراوایی نسبی پایه برای گاز (K_{rgb})

منحنی تراوایی نسبی پایه، یک منحنی به دست آمده در کمترین سرعت ممکن و واقع بینانه ترین مقادیر کشش

دست از دشواری آنها برای حصول مقدار صفر برای تراوایی در مقادیر اشباع شدگی کمتر S_{gr} نشأت می گیرد که این مشکل هم با تنظیم منحنی حالت امتزاج پذیر با استفاده از اشباع باقیمانده گاز بر طرف می شود در اینجا چون رابطه براساس جریان جزیی به دست آمده است که ما را از حصول مقدار صفر برای K_r در نقاط انتهایی، جایی که یکی از فازها از حرکت باز مانده است، مطمئن می سازد، این ایراد رفع شده است.

جریان جزیی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته، نسبت نرخ جریان گاز به نرخ کل جریان بوده و مطابق رابطه زیر تعریف می شود:

$$GTR = \frac{Q_g}{Q_g + Q_L} = \frac{V_g}{V_L + V_g} \quad (4)$$

جایگذاری رابطه (2) در رابطه (4) مقدار GTR را براساس تابعی از μ, K_r برای دو فاز بیان می کند:

$$GTR = \frac{\left[\frac{k_r}{\mu} \right]_g}{\left[\frac{k_r}{\mu} \right]_L + \left[\frac{k_r}{\mu} \right]_g} \quad (5)$$

و با یافتن مقدار K_{rl} از رابطه فوق داریم:

$$k_{rl} = \left[\frac{\mu_L k_{rg}}{\mu_g} \right] \left[\frac{1 - GTR}{GTR} \right] \quad (6)$$

بنابراین زمانی که K_{rg} به صورت تابعی از GTR و به طور جداگانه مشخص شود، استفاده از این رابطه مقادیر متناظر K_{rl} را برای همان مقدار GTR به دست می دهد.

منحنی تراوایی نسبی گاز امتزاج پذیر: (K_{rgm})

در شرایطی که گاز قابل امتزاج باشد، خواص سیال برای دو فاز یکسان است:

$$\rho_m = \rho_{sm} = \rho_{gm} \quad \& \quad \mu_m = \mu_{sm} = \mu_{gm} \quad (7)$$

و 'm' بیانگر حالت امتزاج پذیر (miscible) و 'sm' نشانگر حالتی است که گاز و مایع امتزاج پذیر، به عنوان فاز واحد در نظر گرفته می شود که از میان مغزه جریان می بایند:

$$k = k_{cm} \quad \& \quad \beta = \beta_{sm} \quad (8)$$

از رابطه (4) V_{gm}, V_{sm} طبق رابطه زیر به هم مربوط می شوند:

$$V_{gm} = V_{sm} GTR \quad (9)$$

جدول ۱- اطلاعات تست پایه‌ای برای مغزه های Clashach در شرایط مختلف

Index	S_{wi} %	k /mD	$k(S_{wi})$ /mD	IFT /mNm ⁻¹	β /m ⁻¹	$\beta(S_{wi})$ /m ⁻¹
1	0	553	---	0.852	1.035E8	---
2	0	553	---	0.149	1.035E8	---
3	0	553	---	0.036	1.035E8	---
4	0	600	---	0.149	5.990E7	---
5	0	600	---	0.036	5.990E7	---
6	33	553	245	0.852	1.035E8	4.580E8
7	21	553	446	0.852	1.035E8	1.395E8*
8	21	553	446	0.149	1.035E8	1.395E8*
9	15	440	400	0.852	1.035E8	1.151E8*
10	15	440	400	0.149	1.035E8	1.151E8*
11	15	440	400	0.008	1.035E8	1.151E8*

اشباع آب غیر متحرک و $k(S_{wi})$ و $k(S_{wi})$ به ترتیب نفوذپذیری و فاکتور اینرسی مغزه در S_{wi} می باشد و $\beta(S_{wi})$ محاسبه شد، معادله ۱۷

جدول ۲- اطلاعات تست پایه ای برای مغزه های Berea در شرایط مختلف

Index	S_{wi} %	k /mD	$k(S_{wi})$ /mD	IFT /mNm ⁻¹
12	0	110	---	0.852
13	0	110	---	0.149
14	0	110	---	0.036
15	0	116	---	0.008
16	26	110	92	0.852
17	26	110	92	0.448
18	26	110	92	0.149
19	26	110	92	0.036
20	26	110	92	0.008

برای نمونه مغزه Berea $\beta/m^{-1}=1.870E8$ به طور تجربی اندازه گرفته شد و $\beta(S_{wi}=26\%)/m^{-1}=2.286E8$ که با استفاده از معادله ۱۷ محاسبه شد. ز بیرویس جدول ۱ را ببینید.

سطحی است، $(K_{rgb})_{meas}$ که پس از آن برای دخالت اثر اینرسی در سرعت های بالا، دستکاری شده است. مشکل عمده در نظر گرفتن تاثیر اینرسی، فقدان اطلاعات کافی در مورد فاکتور β Forchhemier در حالت دو فازی (β_g) در معادله (1) است. گزینه های مختلفی بررسی شد و رویه ای که برای حالت امتزاج پذیری اعمال شده بود، برای حالت پایه نیز مورد پذیرش واقع شد. افت فشار ناشی از اینرسی با استفاده از مقدار β برای تک فازی، سرعت کل V_T و مجموع کل ممنوم های جریان مطابق رابطه زیر محاسبه شد:

$$\nabla P_{mer} = \beta(\rho|V|)_g + (\rho|V|_L)|V_T| \quad (13)$$

با جایگذاری سرعت مایع با استفاده از تعریف GTR معادله (2) و جایگذاری ρ_L با مقدار ρ_{ave} خواهیم داشت:

$$\nabla P_{mer} = \beta[\rho_g GTR + \rho_L(1 - GTR)]|V_T| V_T = \beta \rho_{ave} |V_T| V_T \quad (14)$$

بعد از تغییرات ریاضی اندک در معادله (14) مطابق آنچه که برای به دست آوردن معادله (12) انجام شد، K_{rgb} در حالت تاثیر اینرسی به صورت زیر بیان می شود:

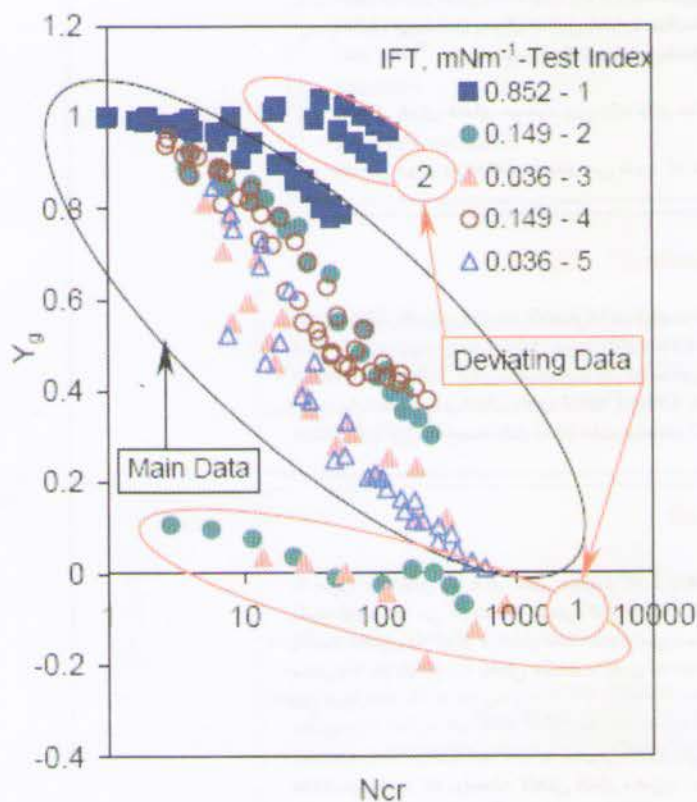
$$(k_{rgb})_{mer} = \frac{(k_{rgb})_{meas}}{1 + \frac{\beta \rho_{ave} k(k_{rgb})_{meas} |V_T|}{GTR \mu_g}} \quad (15)$$

که $(K_{rgb})_{meas}$ تراوایی نسبی پایه اندازه گیری شده در سرعت پایین (بدون دخالت اینرسی) می باشد. شایان ذکر است، اگرچه آنالیز فوق برای $S_{wi}=0$ به کار رفته ولی روابط بالا برای حالتی که $S_{wi} > 0$ نیز معتبر است که در این صورت باید به جای (K) از $K_g(S_{wi})$ و به جای β از $\beta_g(S_{wi})$ استفاده شود. مضافاً این که به علت تغییر خواص سنگ (β, K) در رابطه (12)، (15) منحنی های حالت پایه و حالت امتزاج پذیر تراوایی نسبی برحسب GTR برای هر نمونه مغزه در هر مقدار سرعتی وجود خواهد داشت.

معادله سازی برای Y_g

برای یافتن ضابطه تابع Y_g به گونه ای که در معادله (3) به کار رفته است، از مقادیر آزمایشگاهی مغزه های ماسه سنگی Berea, Clashach استفاده شد. اطلاعات قابل توجهی در شرایط مختلف برای این دو مغزه در این آزمایشگاه وجود داشت. جداول (1)، (2) به طور خلاصه داده های اصلی

عظیمی از داده‌ها از یک روند همگرا ولی بسیار پراکنده تبعیت می‌کنند همچنین در این شکل دوروند نیز دیگر به چشم می‌خورد.



مقایسه نتایج مغزه Clashach در Y_g در برابر N_{cr} با $S_{wi}=0\%$

بیست آزمایش اندازه‌گیری را که روی این دو نمونه مغزه انجام شده است نشان می‌دهد. فقط یک عامل اینرسی $\beta(S_{wi})$ اندازه‌گیری شده وجود داشت که متعلق نمونه مغزه Clashach با درصد اشباع آب 33% بود (آزمایش 6 جدول 1). برای تخمین مقادیر $\beta(S_{wi})$ برای سایر مغزه‌ها، فرمولاسیون (Coles & Hartman) مورد استفاده واقع شد. آنها پیشنهاد کردند که صورت عمومی تابع β به صورت تابعی از $\beta(S_{wi})$, S_{wi} به شکل زیر باشد:

$$\beta_{eff} = C k_{eff}^B \phi_{eff}^A \quad (16)$$

که در آن مقادیر A, B, C به ترتیب 1.88, 0.448, 1.07E12 و K بر حسب ϕ_{mD} بر حسب نسبت β بر حسب f_{r-1} است. با به کارگیری رابطه (16) برای نمونه‌های خشک $S_{wi}=0$ و نمونه‌های مرطوب $S_{wi}>0$ و حذف ثابت C خواهیم داشت:

$$\beta(S_{wi}) = \beta \left[\frac{k}{k(S_{wi})} \right]^{1.88} [1 - S_{wi}]^{0.448} \quad (17)$$

با به کارگیری معادله 17 برای آزمایش شماره 6, $\beta(S_{wi})$ با حدود 13% کمتر از آنچه که انتظار داشتیم به دست می‌دهد. بنابراین $\beta(S_{wi})$ های گزارش شده همگی از رابطه (17) به دست آمده‌اند.

معادله مناسبی که در روش درون‌یابی برای پیش‌بینی K_r در سیستم‌های میعان‌یافته موجود است، وابسته به نسبت عدد موینگی (نسبت عدد موینگی در شرایط موجود به مقدار این عدد در شرایط پایه) $(N_{cr} = N_c / N_{c_base})$ با ثابت‌های منحصر به مغزه و متفاوت برای فازهای گاز و میعانات می‌باشد. که عدد موینگی طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$N_c = \frac{k \Delta P}{\phi \sigma L} = \frac{k |\nabla P|}{\phi \sigma} \quad (18)$$

شکل (1) Y_g محاسبه شده را بر حسب نسبت عدد موینگی (N_{cr}) برای مغزه‌های خشک Clashach (آزمایش‌های 1 تا 5). مقادیر Y_g برای هر سری K_{rg} به دست آمده در آزمایشگاه با بازآرایی معادله (3) قابل محاسبه است:

$$Y_g = \frac{(k_{rg})_{meas} - k_{rgm}}{(k_{rgb})_{iner} - k_{rgm}} \quad (19)$$

که $(K_{rgb})_{meas}$ تراوایی نسبی اندازه‌گیری شده برای فاز گازی در کتشف سطحی دلخواه بوده و K_{rgm} , $(K_{rgb})_{iner}$ در سرعت و GTR دلخواه به ترتیب توسط معادلات (12), (15) محاسبه شده‌اند. داده‌ها در این شکل نشان می‌دهند که توده

منبع: M. Jamiolahmady, A. Danesh, G. Henderson & G. D. Tehrani: "Variations of Gas-Condensate Relative Permeability with Production Rate at Near Wellbore Conditions". SPE 83960, offshore Europe 2003.