

## بررسی صحت نتایج گزارش‌های دریافتی از آزمایشگاه‌های PVT

مجتبی خزاعی<sup>۱</sup>، کارشناس ارشد مهندسی مخازن مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران

### چکیده

تأیید نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی سیال مخزن یکی از وظایف مهندس مخزن است. این نتایج در بسیاری از مراحل ارزیابی و توسعه میدان نظیر تعیین میزان هیدروکربن درجا، پیش‌بینی تولید از مخزن و همچنین شبیه‌سازی رفتار مخزن، نقش کلیدی را ایفا می‌کند. به گونه‌ای که برآورد نادرست از پارامترهای سیال مخزن می‌تواند باعث عدم طراحی مناسب زیرساخت‌ها، تجهیزات سرچاهی و واحدهای بهره‌برداری شده و برداشت سودآور هیدروکربن را با مشکل جدی مواجه کند. به همین دلیل، نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی سیال مخزن باید با دقت بررسی شده و در صورت مشاهده اشکال در نتایج یا عدم همخوانی<sup>۱</sup> با دیگر اطلاعات موجود، جهت بررسی مجدد نمونه یا آزمایش‌های انجام شده اقدام تصحیحی انجام شود. روش‌های متعددی برای بررسی صحت خصوصیات و میزان اجزاء مولی حاصل از نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی سیال‌های نفتی و گازی وجود دارد که از مهمترین و کاربردی‌ترین روش‌ها می‌توان به روش موازنه<sup>۲</sup> مواد و روش هافمن<sup>۳</sup> اشاره کرد. در این مقاله به توضیح و چگونگی بکارگیری روش‌های فوق و همچنین روش‌های دیگر مانند روش باکلی<sup>۴</sup> برای بررسی دیگر خواص سیال مخزن می‌پردازیم.

### اصلاحات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۰۶/۲۵

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۱۰/۲۷

### واژگان کلیدی:

موازنه مواد، صحت سنجی نتایج، همخوانی داده‌ها

### مقدمه

صحت نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های سیال مخزن را در این مقاله بررسی می‌کنیم.

#### ۱- بررسی شرایط نمونه‌گیری و پارامترهای اندازه‌گیری شده اولیه

قبل از ارزیابی نتایج گزارش، باید شرایط نمونه‌گیری را بررسی کرد. برخی از این بررسی‌ها مانند تعداد نمونه‌های گرفته شده، سرچاهی یا ته چاهی بودن نمونه‌ها، وضعیت پایداری شرایط تفکیک‌کننده در هنگام نمونه‌گیری سرچاهی و فشار باز شدن سیلندرهای حاوی نمونه حتماً باید مدنظر قرار گیرد. در صورت وجود نمونه‌های متعدد، باید فشار اشباع نمونه‌ها نزدیک به هم باشد و با وجود حداقل سه نمونه می‌توان نمونه‌هایی که بیشترین همخوانی را با یکدیگر دارند، در آزمایش‌ها استفاده کرد. برای نمونه‌های ته چاهی (سیال نفتی)، باید بررسی کرد که فشار مخزن از فشار اشباع سیال بالاتر باشد تا نمونه تک فاز وارد نمونه‌گیر شود. به علاوه، اگر فقط دو نمونه سیال در دسترس باشد، نمونه‌ای باید انتخاب شود که فشار سیال درون نمونه‌گیر به فشار مخزن در عمق نمونه‌گیری نزدیک‌تر است. برای نمونه‌های سرچاهی، نمونه‌ای باید انتخاب شود که در دمای شرایط تفکیک، فشار اشباع سیال درون نمونه‌گیر به فشار تفکیک‌گر در هنگام نمونه‌گیری نزدیک‌تر است. همچنین باید توجه کرد که نمودار فازی گاز و نفت در فشار و دمای تفکیک‌گر با یکدیگر تلاقی کند [۱]. میزان سولفید هیدروژن ثبت شده سرچاهی در عملیات لایه‌آزمایی با میزان نمونه‌ها باید تقریباً با هم برابر

معمولاً پس از حفاری هر چاه، نمونه‌گیری از سیال مخزن انجام می‌شود تا با بررسی نمونه‌های به دست آمده، بتوان رفتار سیال مخزن و دیگر پارامترهای وابسته به سیال مانند میزان تقریبی ضریب بازیافت از مخزن را تخمین زد. بهترین زمان نمونه‌گیری، در اوایل عمر مخزن و بلافاصله پس از حفر چاه اکتشافی است تا بتوان با به دست آوردن اطلاعات اولیه دقیق، برنامه‌ریزی توسعه میدان را انجام داد. نمونه‌گیری معمولاً به دو صورت ته چاهی و سرچاهی انجام می‌شود که ترجیح برای نمونه‌های نفتی به صورت نمونه‌گیری ته چاهی و برای نمونه‌های گاز تر و گاز میعانی به صورت سرچاهی است.

کنترل و بررسی دقت نتایج گزارش شده توسط آزمایشگاه یکی از مهم‌ترین گام‌های تعیین خصوصیات نمونه‌ای است که برنامه‌ریزی توسعه میدان بر مبنای آن انجام خواهد شد. منابع وارد شدن خطا در نتایج آزمایش‌های خواص سیالات مخزن می‌تواند طیف گسترده‌ای از عوامل نظیر خطای انسانی، خطای گرد کردن یا برش ارقام، محدود بودن دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری یا کالیبره نبودن آنها را شامل شود. برای بررسی صحت نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی سیال‌های هیدروکربنی و نتایج گزارش شده توسط آزمایشگاه‌ها، روش‌هایی وجود دارد تا بتوان به عنوان یک عامل کنترل‌کننده، از دقت نسبی نتایج به دست آمده اطمینان حاصل کرد. اکثر این روش‌ها بر پایه معادلات ریاضی موازنه مواد و همچنین آگاهی از روند تغییرات خصوصیات سیال با تغییر دما و فشار توسعه یافته‌اند. برخی از متداول‌ترین روش‌های موجود برای بررسی

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (khazaei@gmail.com)

### ۳. استفاده از روش موازنه مواد

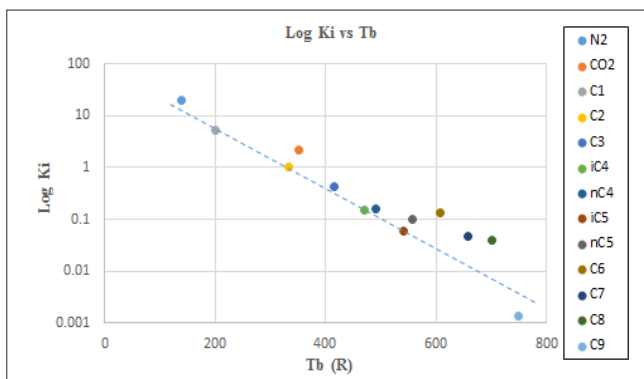
روش موازنه مواد در سال ۱۹۸۳ توسط Whiston و Torp به صورت ساده و قابل درک بیان شد. این روش یکی از بهترین و کاربردی ترین روش های بررسی صحت نتایج ترکیب مجدد سیال<sup>۸</sup> است که به تنهایی می تواند صحت نتایج آزمایش ها را تأیید یا رد کند و اصطلاحاً از آن به عنوان دقیق<sup>۹</sup> بودن آزمایش یاد می شود. براساس این روش، مجموع مول های موجود در فازهای گاز و مایع هر جزء بعد از فرآیند تفکیک، با میزان مولی اولیه آن جزء قبل از تفکیک برابر است [۴]. این رابطه را برای یک مول از سیال در فشار و دمای معین می توان به شکل زیر نشان داد.

$$z_i = x_i \times L + y_i \times V \quad (1)$$

که در آن  $Z_i$  برابر با میزان مولی جزء مربوطه قبل از فرآیند فلش بوده و  $L$  و  $V$  به ترتیب تعداد مول های مایع و گاز است. همچنین  $x_i$  و  $y_i$  به ترتیب برابر با درصد مولی جزء مورد نظر در فاز مایع و گاز است.

$$L + V = 1 \quad (2)$$

بنابراین با دانستن میزان هر جزء در فاز مایع و گاز و نسبت گاز به نفت تولیدی (حالت نفتی) و میعانات به گاز تولیدی-CGR (حالت گاز میعانی و گاز تر)، مقدار هر جزء محاسبه می شود. معمولاً برای نمونه های نفتی با دو مرحله جداسازی، در مرحله اول میزان مایع تانک ذخیره و گاز خروجی آن با نسبت گاز تانک ذخیره ترکیب شده و ترکیب مایع تفکیک گر ساخته می شود. در صورت همخوانی قابل قبول این نتایج با موارد گزارش شده، در مرحله دوم مایع و گاز تفکیک گر با نسبت تصحیح شده گاز به نفت تفکیک کننده در شرایط آزمایشگاه ترکیب شده و ترکیب سیال مخزن ساخته می شود. این فرآیند موازنه مواد پس رونده<sup>۱۰</sup> نامیده می شود. در صورت وجود نمونه نفتی ته چاهی و عدم نیاز به انجام فرآیند ترکیب مجدد سیال مخزن، دقت بیشتری در همخوانی نتایج موازنه مواد با آمار آزمایشگاهی مورد انتظار است. در این حالت می توان از رابطه موازنه مواد پیش رونده<sup>۱۱</sup> استفاده کرد [۵]. به دلیل حساسیت بالاتر محاسبه موازنه مواد در حالت پیش رونده نسبت به



۱ | نمودار دمای جوش هر جزء در برابر لگاریتم ثابت تعادل

باشند. چرا که برخی ظروف نمونه گیری برای نگهداری سیال دارای سولفید هیدروژن مناسب نیست و ممکن است بدنه ظرف مقداری از سولفید هیدروژن را جذب کرده و میزان آن را در ترکیب سیال مخزن کاهش دهد. برای جلوگیری از این خطا، در مواردی که سیال مخزن دارای سولفید هیدروژن است باید از ظرف های نمونه گیری مخصوص سولفید هیدروژن استفاده کرد.

در گام بعد میزان حجم خروجی از نمونه با میزان گنجایش سیلندر مقایسه می شود. هر گونه کاهش در حجم سیال خروجی می تواند به دلیل وجود نشست در ظرف نمونه گیری باشد و برای بررسی آن میزان هوا<sup>۵</sup> و اکسیژن موجود در ظرف نمونه گیری اندازه گیری می شود. در حالت معمول، میزان اکسیژن صفر است. اولویت انتخاب، با نمونه هایی است که میزان هوای کمتری همراه دارد [۱].

### ۲- میزان تجمعی ترکیب سیال مخزن<sup>۶</sup>

اولین مرحله بررسی گزارش ترکیب سیال مخزن، بررسی میزان تجمعی ترکیب سیال است که برابر با واحد یا ۱۰۰ درصد است. اگر چه این مورد بسیار بدیهی به نظر می رسد، اما همیشه به عنوان اولین گام کنترل کیفیت میزان اجزاء یک سیال هیدروکربنی باید مدنظر قرار گیرد. هر چند در حال حاضر با بکارگیری نرم افزارهای پردازش اعداد، امکان بروز خطاهایی از این دست نزدیک به صفر است، اما در هنگام بررسی گزارش های قدیمی این بررسی باید انجام شود. در صورت کمتر بودن میزان تجمعی ترکیب اجزاء تشکیل دهنده سیال مخزن، باید از آزمایشگاه خواسته شود که میزان گزارش شده برای تمام اجزاء دوباره بررسی شده و مشخص شود که کدام یک از اجزاء به صورت نادرست گزارش شده است. در صورت عدم موفقیت در تعیین میزان دقیق ترکیب اجزاء<sup>۷</sup>، می توان از نرمال سازی داده ها استفاده کرد که البته خود عامل ایجاد خطا خواهد بود. اگر جمع درصد مولی اجزاء به ۱۰۰ درصد نزدیک است، روش نرمال سازی خطای قابل توجهی را ایجاد نمی کند. برای تشخیص تقریبی منبع خطا می توان از نمودار لگاریتم ثابت تعادل ( $K_i$ ) در برابر دمای جوش هر جزء استفاده کرد [۲]. براساس مطالعه Brinkmand و Sicking، نمودار نیمه لگاریتمی مقادیر ثابت تعادل در برابر دمای جوش اجزاء موجود در سیال به صورت خط تقریباً راست است [۳]. بنابراین ترکیب هر کدام از اجزای هیدروکربنی که دارای انحراف یا فاصله بیشتری از خط راست رسم شود، می تواند انتخاب مناسبی برای اعمال تصحیح باشد. شکل ۱- نمونه ای از نمودار پیشنهادی فوق را نشان می دهد. این روش هم برای سیالات نفتی و هم برای سیالات گازی قابل استفاده است.

میعانی و گاز تر نیز همین روش انجام می‌شود. البته این روش با فرض دقت و صحت میزان نسبت گاز به نفت یا گاز به میعان اندازه‌گیری شده است که براساس آن می‌توان نتایج فرآیند ترکیب مجدد را با نتایج گزارش شده مقایسه کرد. بدیهی است در صورت وجود خطا در میزان GOR یا CGR، میزان به دست آمده برای ترکیب اولیه سیال دارای خطا است.

از آنجا که ترکیب سیال مخزن توسط روش کروماتوگرافی<sup>۱۳</sup> اندازه‌گیری می‌شود، وجود اختلاف اعداد محاسبات و اندازه‌گیری شده، نشان دهنده وجود خطا در میزان اندازه‌گیری شده GOR و CGR است. این امکان در اکثر نرم‌افزارهای تجاری شبیه‌سازی رفتار سیال وجود دارد. جدول ۱- نتایج به دست آمده از فرآیند ترکیب سیال مخزن با نرم‌افزار اکسل و مقایسه آن با نتایج گزارش شده برای یک سیال نفتی را نشان می‌دهد. وجود میزان خطا در نتایج ترکیب مجدد سیال، نشان‌دهنده خطا در نسبت گاز به نفت اندازه‌گیری شده در آزمایش است.

#### ۴. روش ترسیم موازنه مواد<sup>۱۴</sup>

این روش با وجود تشابه با روش موازنه مواد، میزان دقیق نسبت گاز به نفت (میعانات به گاز) برای انطباق<sup>۱۵</sup> مقدار هر کدام از اجزاء با میزان گزارش شده را مشخص می‌کند. از آنجایی که نسبت گاز به نفت (میعانات به گاز) در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شود، می‌توان میزان خطای موجود در آن را نسبت به حالت ایده‌آل تعیین کرد. برای رسم نمودار فوق برای F مول از ترکیب سیال قبل و بعد از فرآیند فلش معادله ۳- برقرار است:

$$F \times z_i = x_i \times L + Y_i \times V \quad (3)$$

با بازنویسی معادله ۳- دستیابی به معادله ۴- و رسم  $y_i/z_i$  بر حسب  $x_i/z_i$ ، در صورت مطابقت بین داده‌ها، خط راستی با شیب  $(L/V)$  و عرض از مبدا  $F/V$  به دست خواهد آمد.

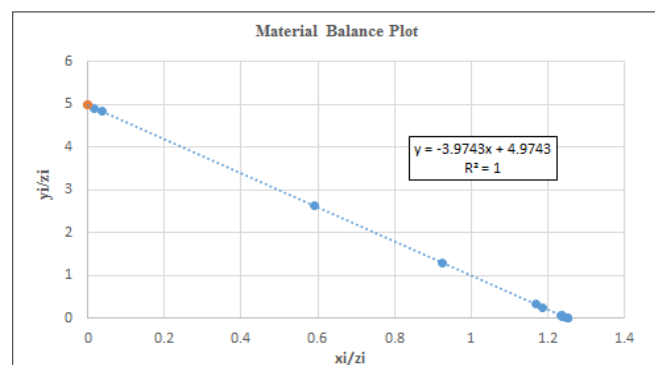
$$\frac{y_i}{z_i} = \left(\frac{L}{V}\right) \frac{x_i}{z_i} + \frac{F}{V} \quad (4)$$

مشاهده هرگونه انحراف از خط راست، نشان‌دهنده عدم انطباق بین داده‌ها و وجود اشکال در یک یا چند مورد از داده‌های ورودی است. البته به دلیل استفاده از نرم‌افزارهای تجاری محاسبه اجزا هیدروکربنی توسط آزمایشگاه‌ها، تقریباً همه نمونه‌ها بر روی خط راست قرار می‌گیرند، اما در صورتی که اجزاء هر فاز اندازه‌گیری شود، نقاط ممکن است بالاتر یا پایین‌تر از خط راست ترسیم شوند. برای محاسبه میزان دقیق نسبت گاز به نفت از قدر مطلق عکس شیب به دست آمده در نمودار فوق استفاده می‌شود. این پارامتر در معادله ۵- محاسبه می‌شود که نیازمند وزن مولکولی و چگالی سیال است.

وجود خطا در داده‌ها، معمولاً برای پیدا کردن خطا در اطلاعات از این روش استفاده می‌شود. در روش پیش‌رونده با انجام عملیات آزادسازی<sup>۱۶</sup> ترکیب سیال مخزن به ترکیب مایع و گاز تفکیک‌کننده مرحله اول و سپس با انجام دوباره فرآیند آزادسازی برای سیال تفکیک‌گر، به ترکیب مایع و گاز تفکیک‌کننده دوم (یا مخزن ذخیره) می‌رسیم [۵]. این فرآیند می‌تواند برای تمامی مراحل تفکیک‌بکار رود. برای نمونه‌های گاز

گزارش شده ترکیب اولیه سیال مخزن پس از فرآیند ترکیب مجدد و مقایسه با میزان

Components	ترکیب اولیه سیال مخزن (GC)	ترکیب سیال اولیه مخزن (Recombination)	Error (%)
H2S	0.00	0.00	0
N2	0.18	0.18	4.59
CO2	1.04	0.99	4.59
C1	8.61	8.22	4.59
C2	4.81	4.59	4.51
C3	3.58	3.42	4.42
iC4	0.90	0.88	1.88
nC4	3.66	3.65	0.35
iC5	3.34	3.37	-0.77
nC5	3.51	3.54	-0.86
C6	8.88	8.97	-1.09
C7	4.20	4.24	-1.09
C8	4.23	4.27	-1.07
C9	6.16	6.23	-1.15
C10	۳.۵۶	3.60	-1.16
C11	3.80	3.84	-1.16
C12+	39.56	40.01	-1.16



نمودار موازنه مواد مایع تفکیک‌گر برای یک مخزن گازی میعانی

(۵)

$$GOR \left( \frac{SCF}{STB} \right) = \frac{1 \text{ lbMole}}{\text{Slope (lbMole)}} \times \frac{379.5 \text{ SCF}}{\text{lbMole}} \times \frac{1 \text{ lbMole}}{MW \text{ lb}} \times \frac{\text{LiquidDensity (lb)}}{\text{ft}^3} \times \frac{5.615 \text{ ft}^3}{STB}$$

مقدار GOR گزارش شده با عدد محاسبه شده از معادله-۵ مقایسه و میزان خطای آن مشخص می‌شود. بهترین حالت خطای کمتر از ۵ درصد است. خطاهای بالا در این پارامتر می‌تواند نشان‌دهنده اشکال در اندازه‌گیری چگالی مایع یا وزن مولکولی باشد [۷و۶]. البته نمودار بالا فقط برای اجزاء هیدروکربنی رسم می‌شود و اجزاء غیر هیدروکربنی مانند نیتروژن و سولفید هیدروژن نباید در رابطه فوق وارد شوند.

این روش را می‌توان برای سیالات نفتی و گازی استفاده کرد. شکل-۲ نمودار موازنه مواد را برای سیال مخزن با ترکیب جدول-۱ نشان می‌دهد (براساس معادله-۴). با استفاده از میزان چگالی و جرم مولکولی مایع و معادله-۵ میزان نسبت گاز به نفت ترکیب اولیه سیال مخزن محاسبه و در نرم افزار موازنه مواد استفاده می‌شود. نتایج این محاسبات را در جدول-۲ می‌توان دید. با بکارگیری این روش نتیجه ترکیب سیال مخزن با میزان به دست آمده از کروماتوگرافی یکسان خواهد بود.

#### ۵- بررسی روند تغییرات Yi و Ki

بررسی تغییرات ثابت تعادل<sup>۱۶</sup> و اجزاء مولی گاز با تغییرات فشار، یکی از اصلی‌ترین و اولین گام‌های بررسی صحت نتایج آزمایش<sup>۱۷</sup> CVD است. این روش در سال ۱۹۸۱ توسط Bashbush [۸] پیشنهاد و در آن مقادیر میزان اجزاء فاز بخار (yi) و ثابت تعادل (Ki) در نمودارهای نیمه لگاریتمی در برابر فشار رسم می‌شود. نمودارها باید به صورت خطوط تقریباً افقی بوده و دارای روند تقریباً موازی باشند. هرگونه مقادیر منفی، کوهانک<sup>۱۸</sup> و تلاقی با دیگر نمودارها برای هر یک از اجزاء، نشان‌دهنده خطای احتمالی در محاسبه میزان اجزای مولی است.

معمولاً ترتیب قرارگیری نمودار ثابت تعادل از بالا، نیتروژن و پس از آن به ترتیب متان، دی‌اکسید کربن، اتان یا سولفید هیدروژن است. محل قرارگیری اتان و سولفید هیدروژن به دمای مخزن و ترکیب سیال بستگی دارد. پس از نمودارهای بالا، دیگر اجزاء براساس روند افزایشی وزن مولکولی یا دمای جوش نرمال قرار می‌گیرد. البته مقادیر ثابت تعادل برای ایزو بوتان و ایزوپنتان از مقادیر آن برای حالت نرمال بالاتر است. ترتیب قرارگیری نمودارهای ثابت تعادل بر حسب فشار در جدول-۳ آمده است.

اگر نمودار مشابه برای ترکیب فاز گاز رسم شود، ترتیب قرارگیری هر جزء با توجه به میزان درصد مولی آن جزء مشخص می‌شود. مشابه با نمودار ثابت تعادل، روند تغییرات باید به صورت خطی و با روند

مونوتونیک بوده و کوهانک در نمودار مشاهده نشود (شکل-۴).

اگرچه در آزمایش تخلیه در حجم ثابت (CVD)، در هر مرحله فشاری ترکیب اجزاء مختلف گاز خروجی مشخص و گزارش می‌شود، اما ترکیب فاز مایع مشخص نیست و بنابراین نمی‌توان ثابت‌های تعادل را به دست آورد. Bashbush روشی را براساس موازنه مواد ارائه کرده است که می‌توان با بکارگیری آن، میزان اجزاء فاز مایع در هر مرحله

۲ | نتایج محاسبات تصحیح نسبت گاز به نفت گزارش شده با استفاده از روش موازنه مواد ترسیمی

پارامتر	مقدار	واحد
شیب نمودار	-۳/۹۷۴۳	
جرم مولکولی مایع	۳۲۰	lb/lb Mole
چگالی مایع	۵۸	lb/ft <sup>3</sup>
GOR گزارش شده	۹۱/۸۲	SCF/STB
GOR محاسبه شده	۹۸/۱۷	SCF/STB
میزان خطا در GOR	۵/۲۵	%

۳ | موقعیت قرارگیری خطوط ثابت تعادل برای اجزاء سیال در نمودار Log Ki بر حسب فشار

موقعیت قرارگیری	جزء سیال
۱ (بالاترین)	N <sub>2</sub>
۲	C <sub>1</sub>
۳	CO <sub>2</sub>
۴	C <sub>2</sub>
۵	H <sub>2</sub> S
۶	C <sub>3</sub>
۷	i-C <sub>4</sub>
۸	n-C <sub>4</sub>
۹	i-C <sub>5</sub>
۱۰	n-C <sub>5</sub>
۱۱	C <sub>6</sub>
۱۲ (پایین‌ترین)	C <sub>7+</sub>

$$\log P \times K_i = A_0 + A_1 \times F_i \quad (6)$$

$$F_i = \frac{\left(\frac{1}{T_{bi}} - \frac{1}{T}\right)}{\left(\frac{1}{T_{bi}} - \frac{1}{T_{ci}}\right)} \times \log \frac{P_{ci}}{P_{sc}} \quad (7)$$

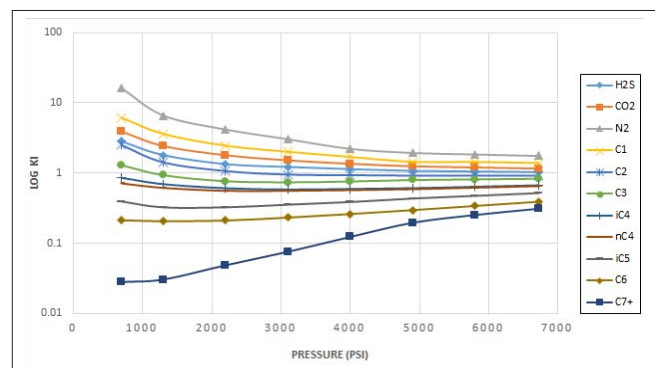
در نمودار نیمه لگاریتمی  $\log(K_i \times P_{sp})$  برحسب  $F_i$ ،  $A_1$  شیب خط و  $A_0$  عرض از مبدا است. همچنین  $T_b$  دمای جوش،  $T_c$  دمای بحرانی،  $T$  دمای آزمایش،  $P_c$  فشار بحرانی هر جزء و  $P_{sc}$  فشار شرایط استاندارد است. برای اجزاء هیدروکربنی C1 تا C6 در تمامی فشارها، باید خط راست عبوری از مقادیر  $\log(K_i \times P_{sp})$  برحسب فاکتور هافمن ( $F$ )، کمترین میزان انحراف را داشته باشد. همچنین اجزاء غیرهیدروکربنی سبک نیز باید رفتاری شبیه اجزاء سبک هیدروکربنی داشته، اما ممکن است بر روی خط راست قرار نگیرد. به علاوه، معمولاً بوتان و پنتان اینزو و نورمال در یک طرف خط راست قرار می‌گیرند. همچنین برای اجزاء سنگین‌تر در فشارهای پایین، نمودار انحنای کمی به سمت پایین خواهد داشت، ولی انحنای زیاد می‌تواند به دلیل وجود خطا در میزان گزارش شده برای ترکیب سیال بخصوص بخش‌های سنگین فاز گاز باشد. اگر نقاط رسم شده دارای اختلاف زیادی نسبت به خط راست و میزان همبستگی آنها برای اندازه‌گیری شیب خط راست عبوری پایین بود، باید شرایط تفکیک‌گر را هنگام نمونه‌گیری بررسی کرد. زیرا عدم پایداری شرایط تفکیک‌گر می‌تواند منجر به عدم تعادل اجزای موجود در سیال و بروز خطا در میزان ثبت شده برای آنها شود. این روش را می‌توان برای انواع مخازن هیدروکربنی (بجز گاز خشک) استفاده کرد. شکل ۶- یک نمونه نمودار سیال را نشان می‌دهد که قرار گرفتن نقاط روی یک خط راست نشان‌دهنده کیفیت مناسب داده‌های به دست آمده از فرآیند فلش سیال تفکیک‌گر است.

البته برخی محققان روش پیشنهادی هافمن را با عدم استفاده از فشار تفکیک‌گر استفاده کرده‌اند. در مطالعات Akpabio و همکاران [۶] و Lawrence و همکاران [۷]، فاکتور هافمن بدون تغییر نسبت به حالت

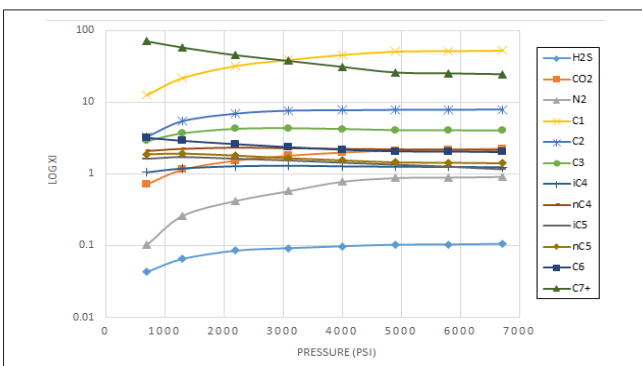
از آزمایش تخلیه در حجم ثابت و ثابت تعادل را محاسبه کرد [۸]. این روش به صحت مقادیر گزارش شده برای فاز بخار بسیار حساس است و هرگونه خطا در میزان گزارش شده برای مقادیر  $Y_i$  منجر به تولید مقادیر منفی برای فاز مایع خواهد شد. پس از محاسبه مقادیر  $X_i$  می‌توان ثابت تعادل را محاسبه کرده و نمودارهای تغییرات هر دو پارامتر را رسم کرد. روند تغییرات هر جزء از فاز مایع باید خطی و بدون کوهانک و تقاطع با نمودار دیگر اجزاء باشد (شکل ۵-). در شکل ۵- تقاطع بین خطوط مربوط به متان و جزء  $C_{7+}$  نشان‌دهنده وجود خطا در مقدارهای اندازه‌گیری شده در میزان مولی فاز مایع یکی از این دو جزء یا هر دو آن است. این روش برای مخازن گازی هم قابل استفاده است.

### ۶- روش ترسیمی Hoffman-Crump<sup>۱۹</sup>

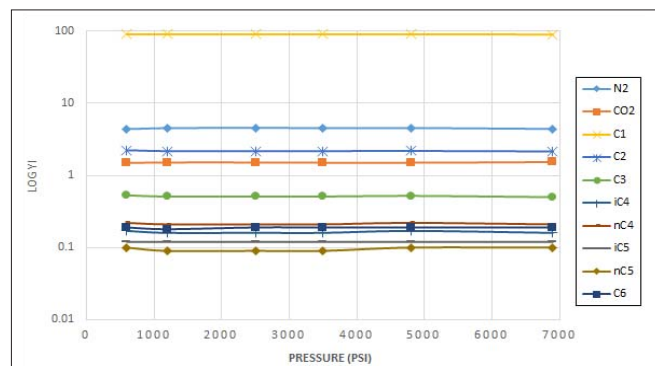
هافمن و همکاران (۱۹۵۳) روش ترسیمی را ارائه کردند که به صورت کیفی صحت میزان اجزاء مایع و بخار در فرآیند ترکیب مجدد در تفکیک‌کننده را بررسی می‌کند. این روش با استفاده از مقادیر K-Value هر جزء ( $K_i$ ) و میزان دما و فشار بحرانی و همین‌طور دمای جوش آن جزء قابل استفاده است. روابط ۶ و ۷ محاسبات انجام شده توسط هافمن را نشان می‌دهد [۹].



شکل ۳ | نمودار Log Ki بر حسب فشار در آزمایش CVD



شکل ۴ | نمودار Log Xi بر حسب فشار در آزمایش CVD



شکل ۵ | نمودار Log Yi بر حسب فشار در آزمایش CVD

خط راست می‌تواند دلیل وجود خطا در نتایج گزارش شده برای میزان ترکیب فاز گاز، مایع و یا هر دو باشد. شکل ۸- نمودار مذکور را نشان می‌دهد. این روش را می‌توان برای انواع مخازن هیدروکربنی استفاده کرد.

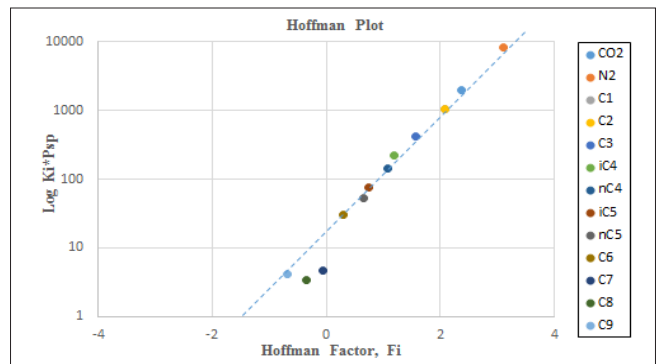
#### ۸- مقایسه میزان مایع تولیدی در آزمایش‌های CCE<sup>+</sup> و CVD

آزمایش‌های اصلی که بر روی نمونه‌های گاز میعانی و گاز تر انجام می‌شوند، آزمایش‌های انبساط در ترکیب ثابت (CCE) و تخلیه در حجم ثابت (CVD) است. به علاوه، پارامتر دیگری که می‌تواند برای کنترل کیفیت این آزمایش‌ها استفاده شود، مقایسه میزان مایع چگالش شده در هر مرحله فشاری است. البته باید توجه داشت که حجم مرجع این دو آزمایش می‌تواند یکسان یا متفاوت باشد. معمولاً حجم مرجع مورد استفاده برای آزمایش CVD، حجم نقطه شبنم است. اما حجم مرجع آزمایش CCE می‌تواند، حجم نقطه شبنم یا حجم کل و یا هر دو باشد [۷]. در صورت رسم مقادیر مایع چگالش شده در این دو آزمایش در یک نمودار با مرجع حجم نقطه شبنم، میزان چگالش شده در آزمایش CCE از مقادیر CVD بیشتر است. البته این مقایسه اطلاعات چندانی را به دست نمی‌دهد، اما در صورت کمتر بودن مقادیر CCE از CVD می‌توان از وجود خطا در مقادیر ثبت شده اطلاع یافت. برای به دست آوردن اطلاعات تکمیلی، باید مقادیر مایع چگالش شده در آزمایش CCE با مرجع حجم کل در برابر مقادیر چگالش شده در آزمایش CVD با مرجع حجم نقطه شبنم رسم شود. در این حالت باید میزان چگالش شده در آزمایش CVD از آزمایش CCE بیشتر باشد. چرا که در هر مرحله از آزمایش CVD، مقداری از گاز که دارای ترکیبات سبک است از حجم آزمایش خارج می‌شود و سیال باقیمانده نسبت به سیال موجود در محفظه آزمایش CCE که گاز سبکی از آن خارج نشده است دارای ترکیب غنی تری است و می‌تواند مقدار بیشتری از مایع را به نسبت حجم خود

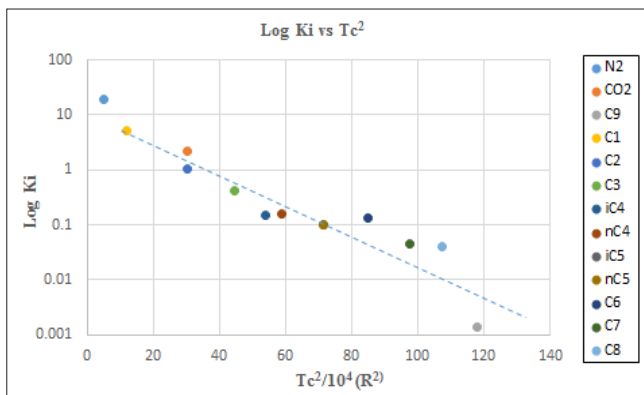
پیشنهادی توسط هافمن روی محور افقی قرار می‌گیرد ولی بجای  $\text{Log} K_i \times P_{sp}$  در محور عمودی، پارامتر  $\text{Log} K_i$  رسم می‌شود. روش فوق بر مبنای اصول مشابه با اصول بیان شده توسط هافمن به دست آمده است. شکل ۷- نمونه‌ای از داده‌های بررسی شده با این روش را نشان می‌دهد. در این نمودار نیز به استثناء اجزاء سنگین که دارای انحراف کمی از خط راست هستند، بقیه داده‌ها روی یک خط راست قرار گرفته و اشکالی در نتایج ثبت شده مشاهده نمی‌شود. این روش برای سیالات نفتی و گازی قابل استفاده است.

#### ۷- روش ترسیمی Campbell-Buckley

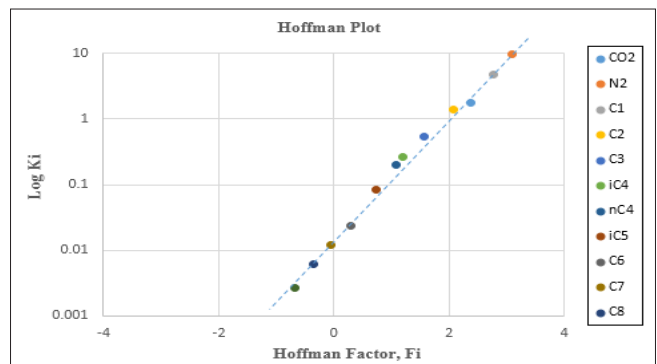
بر اساس مطالعه Buckley و همکاران، برای داده‌های فاقد خط نمودار لگاریتم ثابت تعادل ( $K_i$ ) بر حسب مجذور دمای بحرانی ( $T_c^2$ ) سیال مخزن، یک خط راست است. برای اجزاء هیدروکربنی، نمودار نیمه لگاریتمی  $K_i$  بر حسب مجذور دمای بحرانی، به شکل خط راستی با شیب منفی است که برای اجزاء سنگین تر انحراف از خط راست به سمت پایین دیده می‌شود [۶]. اگرچه محتمل است که نقاط کاملاً بر خط برازش شده قرار نگیرند، اما اختلاف قابل توجه بین نقطه رسم شده و



شکل ۶ | نمودار هافمن-کرامپ برای یک مخزن گازی میعانی (حالت اصلی)



شکل ۸ | نمودار باکلی برای یک مخزن گازی میعانی



شکل ۷ | نمودار هافمن-کرامپ برای یک مخزن گازی میعانی، روش Lawrence و Akpabio

۹- مقایسه روند تغییرات چگالی فاز بخار در آزمایش‌های CCE و CVD

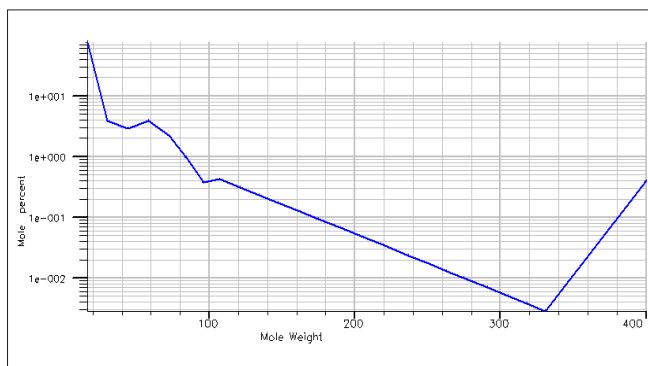
چگالی فاز بخار گزارش شده در آزمایش CCE به فشارهای بالاتر از فشار اشباع و در آزمایش CVD به فشارهای پایین تر از فشار اشباع مرتبط است. روند تغییرات میزان چگالی فاز بخار با تغییر فشار در این دو آزمایش باید همخوانی داشته باشد. در صورتی که داده‌های فوق در کنار هم رسم شوند، انتظار می‌رود که روند افزایش میزان چگالی فاز بخار در آزمایش CCE در ادامه روند افزایش چگالی برای آزمایش CVD باشد [۷].

بعضی آزمایشگاه‌ها داده‌های چگالی فاز بخار در آزمایش CVD را گزارش نکرده و فقط اطلاعات z-factor را گزارش می‌کنند. با داشتن مقادیر Z می‌توان دانسیته گاز را با استفاده از معادله ۹- در واحد دانسیته مولی محاسبه و با ضرب آن در جرم مولکولی (MW) به دانسیته جرمی تبدیل کرد. عدم همخوانی بین این اطلاعات، نشان دهنده خطا حداقل در یکی از آزمایش‌ها (یا هر دو) است. البته این روش، آزمایش دارای خطا را مشخص نمی‌کند. همچنین مشاهده مقادیر منفی در داده‌های چگالی سیال، نشان‌دهنده عدم اختصاص زمان کافی برای ایجاد تعادل فازها در هر مرحله از آزمایش CVD است. نمونه‌ای از این رفتار در شکل ۱۰- نشان داده شده است.

$$\rho = \frac{ZRT}{P} \quad (9)$$

۱۰- روند تغییرات پارامترهای مربوط به سیالات نفتی

معمولاً بررسی روند تغییر پارامترهای اندازه‌گیری شده سیالات نفتی با تغییر فشار، یکی دیگر از روش‌های بررسی کیفیت گزارش‌های آزمایشگاه‌های خواص سیال است. این پارامترها معمولاً شامل گرانشی، چگالی و ضریب حجمی نفت بوده و روند تغییرات این پارامترها خصوصاً در فشارهای بالای نقطه حباب باید منطقی و مونوتونیک باشد.

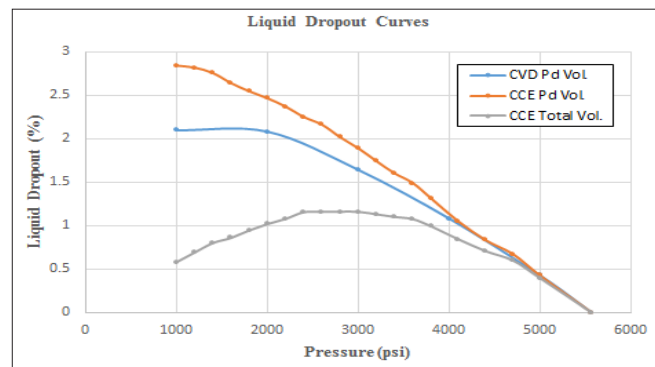


شکل ۱۱ | نمودار اثر انگشتی مربوط به یک نمونه سیال مخزن بدون آلودگی

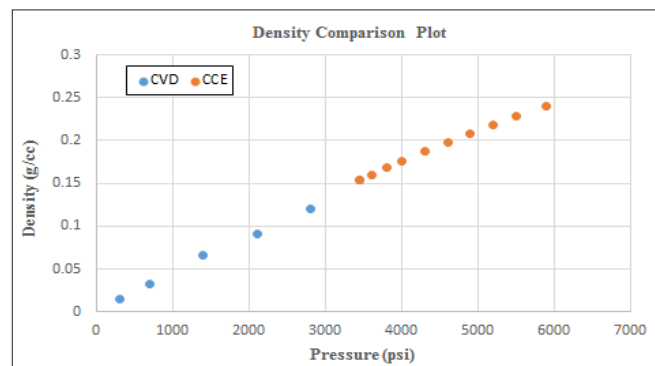
چگالش کند. البته مطابقت میزان مایع چگالش شده نمی‌تواند معیاری برای تصمیم‌گیری در خصوص کیفیت و دقت آزمایش‌های بوده و به عبارت دیگر شرط لازم برای تائید نتایج آزمایش‌ها است ولی شرط کافی نیست. در صورتی که حجم گزارش شده در آزمایش CCE دارای حجم مرجع نقطه شبم باشد، می‌توان با استفاده از رابطه ۸- حجم مرجع را به حجم کل تغییر داد [۷].

$$LiquidDrop_{CCE}(\% \text{ of Total Volume}) = \frac{LiquidDrop_{CCE}(\% \text{ of Dewpoint Volume})}{\left(\frac{V}{V_{Sat}}\right)} \quad (8)$$

برابری میزان فشار نقطه شبم و میزان بیشینه مایع تولیدی در آزمایش CVD در فشار پایین تر نسبت به CCE (با حجم مرجع حجم کل) در مقایسه این دو آزمایش باید مشاهده شود. همچنین برای اجزاء دارای جزء مولی بالاتر از ۰/۴ درصد در فاز مایع، مقادیر ترکیب سیال محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در آخرین مرحله فشاری نباید بیشتر از ۱ درصد اختلاف داشته باشد [۷]. شکل ۹- مقایسه نمودارهای مربوط به میزان سیال مایع شده در دو آزمایش مورد نظر و موقعیت نسبی آنها نسبت به یکدیگر برای حالت ایده‌آل را نشان می‌دهد.



شکل ۹ | مقایسه میزان مایع چگالش شده در آزمایش‌های CCE و CVD



شکل ۱۰ | مقایسه روند تغییرات چگالی فاز بخار در آزمایش‌های CCE و CVD

حفاری، می‌توان از روش صافی کردن<sup>۳۳</sup> برای تعیین ترکیب اولیه سیال مخزن استفاده کرد که البته به صورت تقریبی بوده و از روش قبل دقت پایین تری دارد. این روش بر این اصل استوار است که گل‌های پایه روغنی دارای ترکیبات هیدروکربنی بین  $C_{10}$  تا  $C_{23}$  است و آنالیز نمودار اثر انگشتی<sup>۳۴</sup> ترکیب سیال مخزن در محدوده جرم مولکولی ۱۰۰ به بعد که معادل با ترکیبات سنگین تر از  $C_8$  است باید به صورت خط راست باشد (شکل-۱۱). این روش توسط Gozalpour و همکاران توسعه پیدا کرده است [۱۰]. این روش برای سیالات نفتی و گازی قابل استفاده است.

### نتیجه‌گیری

گزارش نتایج آزمایش‌هایی که بر روی سیالات مخزن انجام می‌شوند، قبل از استفاده در فرآیندهای شبیه‌سازی و طراحی تجهیزات سطحی باید با دقت و توسط روش‌های مختلف بررسی شده و از صحت آنها اطمینان حاصل کرد. بیشتر این روش‌ها به صورت کیفی نتایج را بررسی می‌کنند و معمولاً این روش‌ها شرط لازم برای تأیید صحت نتایج بوده و لزوماً شرط کافی نمی‌باشند. تنها روش بررسی کمی نتایج آزمایش‌ها موازنه مواد بوده که باید برای بررسی تمامی نتایج استفاده شود. ■

یکی دیگر از بررسی‌های معمول، مقایسه API نفت باقیمانده در آزمایش DL با API تانک ذخیره در آزمایش تفکیک گر است. به دلیل بالاتر بودن دما در آزمایش DL، سیال باقیمانده در این آزمایش در مقایسه با سیال باقیمانده در آزمایش تفکیک گر سنگین تر بوده و دارای API پایین تری است. یکسان بودن این دو عدد در گزارش‌های موجود نشان‌دهنده وجود خطای احتمالی در یکی از این اعداد است.

### ۱۱- بررسی آلوده بودن سیال مخزن به گل پایه روغنی

در مواردی که برای حفاری مخزن از گل پایه روغنی استفاده می‌شود، ممکن است سیال نمونه‌گیری شده به دلیل آلوده شدن با گل حفاری، نماینده سیال مخزن نباشد. در هنگام بررسی نمونه‌ها باید گزارش میزان هرزروی گل و میزان حجم سیال تولید شده از چاه در مرحله پاک‌سازی<sup>۳۱</sup> را بررسی کرد. اگر حجم سیال تولیدی از حجم گل هرزرفتی کمتر است، احتمال آلوده شدن نمونه سیال با فیلتره گل بسیار بالا است. این مسئله باعث ایجاد تغییر در ترکیب سیال نمونه‌گیری شده از مخزن خواهد شد.

در صورت مشخص بودن ترکیب اجزاء گل حفاری، برای حذف اثر گل می‌توان از روش موازنه مواد-در نرم‌افزارهای تجاری روش تفریق<sup>۳۲</sup>- استفاده کرد. در صورت عدم دسترسی به ترکیب گل

### پانویس‌ها

- |                               |                                    |
|-------------------------------|------------------------------------|
| 1. Inconsistency              | 13. Chromatography                 |
| 2. Material Balance Method    | 14. Mass Balance Plot              |
| 3. Hoffman Method             | 15. Match                          |
| 4. Buckley Method             | 16. $K_i = \frac{y_i}{x_i}$        |
| 5. Air Content                | 17. Constant Volume Depletion      |
| 6. Cumulative Composition     | 18. Hump                           |
| 7. Components                 | 19. Hoffman-Crump                  |
| 8. Recombination              | 20. Constant Composition Expansion |
| 9. Rigorous                   | 21. Clean Up                       |
| 10. Backward Material Balance | 22. Subtraction Method             |
| 11. Forward Material Balance  | 23. Skimming Method                |
| 12. Flash                     | 24. Fingerprint Plot               |

### منابع

- [1] Potsch K, Toplack P, Gumpenberger T, A review and Extension of Existing Consistency Tests for PVT data From a Laboratory, SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2016.
- [2] Samaniego-V.F., Bashbush B. J.L., Leon G.A., Mazariegos U. C., Corona B.A., Castillo P. P. F., On the Validation of PVT Compositional Laboratory Experiments, SPE Annual Technical Conference and exhibition, 2004, September, p 2629-.
- [3] Brinkam, F.H. and Sicking, J.N, Equilibrium Ratios for Reservoir Studies, Trans., AIME (1960) 219, p 240246-.
- [4] Whitson C. H., Torp S. B., Evaluating Constant Volume Depletion Data, Journal of Petroleum Technology, 1983, March, p 610619-.
- [5] Otavie Imo-Jack, Chima Emelle, An Analytical Approach to Consistency Checks of PVT Data, Nigeria International Conference and Exhibition, 2013.
- [6] Julius U. Akpabio, Emmanuel E. Udofia, Michael Ogbu, PVT Fluid Characterization and Consistency Check for Retrograde Condensate Reservoir Modeling, Nigeria Annual Conference and Exhibition, 2014, August.
- [7] Lawrence John J, Gupta Deepak K, Quality assessment and consistency evaluation of Hydrocarbon PVT data, International Petroleum Technology Conference, 2009, December.
- [8] Bashbush Jose L, A Method to Determine K-Values From Laboratory Data and Its Applications, 56th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, 1981, October.
- [9] Hoffman AE, Crump JS, Hocott CR, Equilibrium constants for a gas-condensate system. Petroleum Transactions, AIME, 1953, 198, p 110-.
- [10] Gozalpour F, Danesh A, Tehrani D.-H., Todd A.C, Tohidi B, Predicting Reservoir Fluid Phase and Volumetric Behaviour from Samples Contaminated with Oil-Based Mud, SPE Annual Technical Conference and exhibition, 1999, October.