

## کنترل کیفیت آزمایش ترکیب نفت مخزن با استفاده از سه روش موازنه مولی، نمودارهای هافمن و باکلی

علی زلکی نژاد، مهدی طیب نژاد عزیزی، امیر مسعود زین العبادین روزبهانی، دانشگاه صنعت نفت - مهدی زینلی حسونند\*، پژوهشگاه صنعت نفت

### چکیده

به طور کلی، سه روش برای نمونه‌گیری از مخزن وجود دارد که عبارتند از: نمونه سرچاهی، نمونه ته‌چاهی و همچنین نمونه‌ای که با استفاده از تفکیک‌کننده سرچاهی به دست می‌آید. نمونه‌ی ته‌چاهی می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری راجع به سیالات درون مخزن به ما بدهد اما این روش تنها زمانی که بالای فشار حباب هستیم، نتیجه قابل اعتمادی دارد. همچنین هزینه‌برتر از سایر روش‌هاست و نیاز به توقف تولید از چاه برای چندین روز دارد. به عنوان جایگزینی برای نمونه ته‌چاهی، معمولاً از دو نوع نمونه‌گیری دیگر که تجهیزات، هزینه و زمان کمتری نیاز دارد، استفاده می‌شود. موضوع تشابه نتایج نمونه‌گیری سرچاهی و نمونه‌ی تفکیک‌کننده با نمونه ته‌چاهی موضوعی بحث‌برانگیز بین کارشناسان مرتبط با آنالیز خواص سیالات است. از سوی دیگر، ارائه روشی قابل اعتماد به منظور تشخیص صحت نتایج و اعتبارسنجی دو روش نیز بخشی از خلأ دانشی در این حوزه است. در این مقاله سعی شده است ابتدا با ارائه سه روش موازنه مولی، نمودار هافمن<sup>۱</sup> و نمودار باکلی<sup>۲</sup> روش استاندارد مقایسه ترکیب نفت مخزن توضیح داده شود. سپس نتایج مربوط به نمونه‌گیری سرچاهی و ته‌چاهی با استفاده از این سه روش اعتبارسنجی شده‌است. نمونه‌های سرچاهی با استفاده از روش اختلاط تماس تعادلی ترکیب شده‌اند و ترکیب نمونه نفت آن با استفاده از ابزار تقطیر میکرو و ترکیب گاز آن با استفاده از دستگاه کروماتوگراف گازی اندازه‌گیری شده است. نتایج آزمایشگاهی حاصل از محاسبات نشان می‌دهد که ترکیب حاصل از دو روش نمونه‌گیری ته‌چاهی و سرچاهی تشابه بسیار بالایی با هم دارند. از طرفی، روش موازنه مواد و نمودارهای باکلی و هافمن نیز ابزار قدرتمند برای اعتبارسنجی ترکیب نفت و کنترل کیفیت آزمایش ترکیب سیال است.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۸/۰۴/۲۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۸/۰۵/۰۳

تاریخ پذیرش داور: ۹۸/۰۷/۰۵

### واژگان کلیدی:

روش موازنه مولی، نمودار ترسیمی هافمن، نمودار ترسیمی کمپیل-باکلی، کنترل کیفیت، درصد مولی اجزای نمونه نفت

### مقدمه

از بارگذاری در نرم‌افزارهای شبیه‌ساز باید صحت‌سنجی و راستی‌آزمایی شوند (خزاعی ۱۳۹۶). اکپابو و همکاران در سال ۲۰۱۵ روی نمونه‌های گاز میعانی از مخازن دلتای نیجر روش‌های اعتبارسنجی را روی داده ترکیب سیال انجام دادند. آنها در مطالعه خود بین رفتار سیالات هیدروکربنی و غیرهیدروکربنی تفکیک قایل شدند. در پایان به این نتیجه رسیدند که اعمال روش‌های اعتبارسنجی روی داده‌های آزمایشگاهی ترکیب سیال، سبب افزایش دقت نتایج شبیه‌ساز و پیوستگی بیشتر آنها می‌شود. لذا استفاده از این روش‌ها ضروری است (Julius U. Akpabio 2015).

شکراله‌زاده و همکاران در سال ۹۵ صحت روش اختلاط تماس تعادلی به عنوان روش استاندارد تهیه نمونه سرچاهی بررسی

در این مطالعه، سعی شده با استفاده از روش موازنه مولی، نمودار هافمن و نمودار باکلی روش استاندارد مقایسه ترکیب نفت مخزن توضیح داده شود و صحت درصد مولی اجزای نمونه سیال اعتبارسنجی شود. برای پیش‌بینی میزان تولید و شبیه‌سازی مخزن، به نتایج دقیق از نمونه‌ها نیاز است و همچنین مقایسه‌ی نتایج نمونه‌های ته‌چاهی و سرچاهی از دیگر موضوعات بررسی شده در این مقاله می‌باشد.

در صورت وجود مشکل در درصد مولی اجزای نمونه، نیاز به تصحیح آنها یا انجام مجدد آزمایش‌های تقطیر جهت به‌دست آوردن اجزای مولی نمونه است. خزاعی در ۱۳۹۶ صحت گزارش‌های ارسالی از آزمایشگاه خواص سیالات را با روش‌های موازنه مواد و هافمن بررسی کرد. طی این مطالعه مشخص شد که داده‌های ارسالی از آزمایشگاه قبل

\* نویسنده‌ی عهد‌دار مکاتبات (hasanvandm@ripi.ir)

مطالعه، در ادامه هر یک از آنها توضیح داده می‌شود.

### ۱-۱- روش موازنه مولی

یکی از روش‌های اعتبارسنجی محاسبات ترکیب سیال، روش موازنه جرمی است. روش موازنه مولی به دلیل استفاده از قانون پایستگی جرم، مطمئن‌ترین روش برای اطمینان از صحت محاسبات مولی ترکیب نمونه مورد نظر است. در بسیاری از موارد خطای انسانی یا ضعف در محاسبات سبب می‌شود تا موضوع موازنه مولی برای یک یا چند جزء از ترکیب دچار مشکل شود. فرض می‌کنیم نمونه نفت مخزن دارای F مول ماده است که در اثر فرایند تفکیک اتمسفریک به L مول مایع و V مول گاز تبدیل می‌شود.

لذا:

$$F=L+V$$

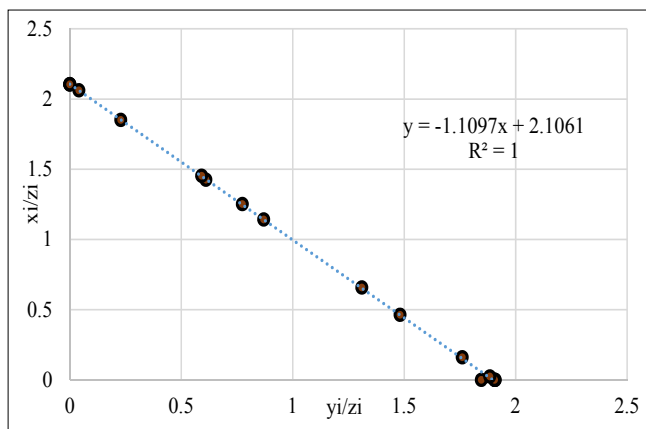
(۱)

کردند. در این مطالعه‌ی شبیه‌سازی مشخص شد که نتایج نمونه سرچاهی با روش اختلاط تماس تعادلی با دقت بالایی به نتایج نمونه ته‌چاهی اولیه مخزن نزدیک است. همچنین روش اختلاط تماس تعادلی می‌تواند روی مخازن تخلیه شده در نیمه دوم عمر آن نیز کارایی داشته باشد. نقصی که در این مطالعه وجود داشت، نبود داده‌های آزمایشگاهی جهت تأیید ادعای مطرح شده بود (امیری ۱۳۹۵).

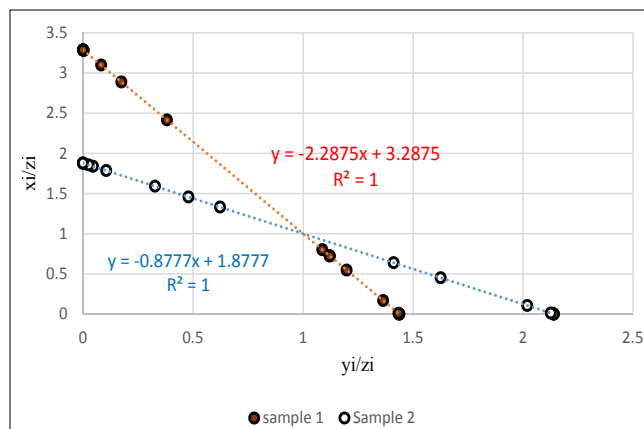
در این مطالعه پس از اعتبارسنجی داده‌های ته‌چاهی و سرچاهی با استفاده از سه روش، تشابه داده‌های نمونه‌گیری ته‌چاهی و سرچاهی برای دو نمونه نفت سبک و سنگین مقایسه شده است.

### ۱- روش‌شناسی

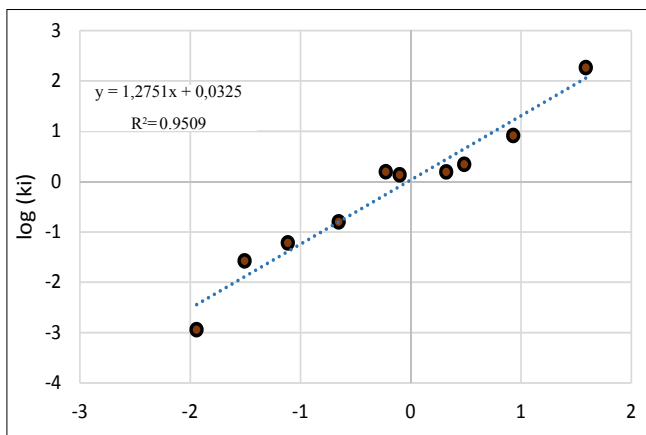
به منظور آشنایی با روش اعتبارسنجی به کار رفته در این



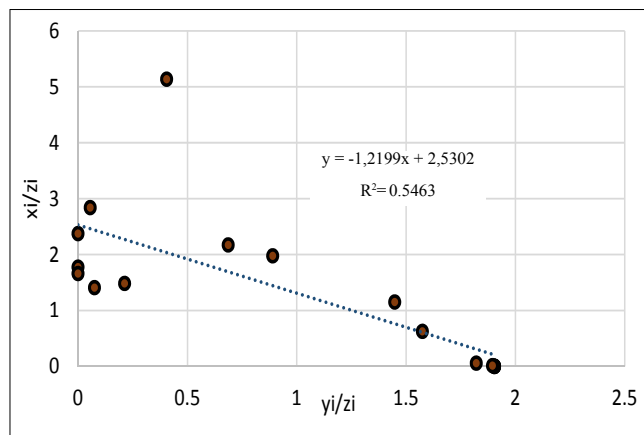
شکل ۳ | رسم نمودار موازنه مولی برای داده‌های اصلاح شده نمونه چهارم



شکل ۱ | رسم نمودار موازنه مولی برای داده‌های نمونه اول و ششم



شکل ۴ | رسم نمودار هافمن برای داده‌های نمونه اول



شکل ۲ | رسم نمودار موازنه مولی برای داده‌های نمونه چهارم

## ۱-۲- روش ترسیمی هافمن

یکی دیگر از روش‌های صحت‌سنجی درصد مولی ترکیب نمونه، استفاده از نمودار هافمن است که مقدار  $\log ki$  برای هر جزء را بر حسب ضریب هافمن ( $F_i$ ) برای آن جزء رسم می‌کنند که  $k_i$  همان مقدار  $\frac{Y_i}{X_i}$  برای هر جزء است. ضریب هافمن بر حسب دما بحرانی و فشار بحرانی و همچنین دمای نرمال جوش هر جزء متفاوت است و برای هر جزء مقدار خاص خود را دارد.

$$F_i = \frac{\left(\frac{1}{T_{bi}} - \frac{1}{T_c}\right)}{\left(\frac{1}{T_{ci}} - \frac{1}{T_c}\right)} * \log \frac{P_{ci}}{P_{sc}} \quad (4)$$

که در معادله (۴)،  $P_{ci}$ ، بیانگر فشار بحرانی جزء مورد نظر بر حسب psi است،  $T_{bi}$ ، بیانگر دمای استاندارد جوش جزء مورد است که بر حسب رانکین یا کلوین می‌تواند باشد،  $T_{ci}$

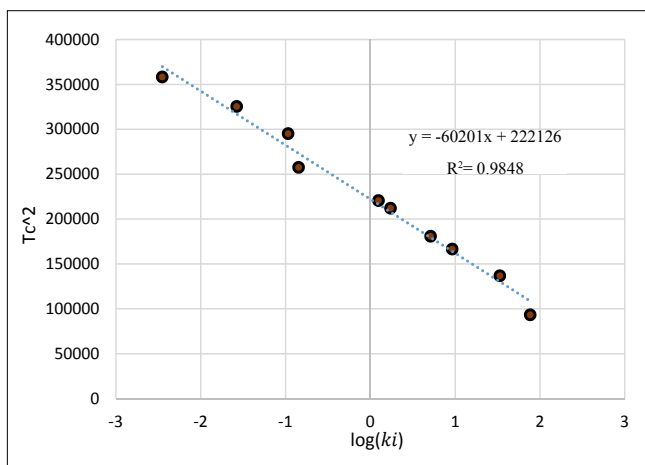
فرض می‌کنیم ترکیب مواد در نفت مخزن برابر با  $Z_i$  و ترکیب مواد در فاز مایع و گاز به ترتیب برابر با  $X_i$  و  $Y_i$  باشد. لذا رابطه موازنه مولی جزء  $i$  به صورت رابطه ۲ خواهد بود.

$$F \times Li = L \times xi + v \times Yi \quad (2)$$

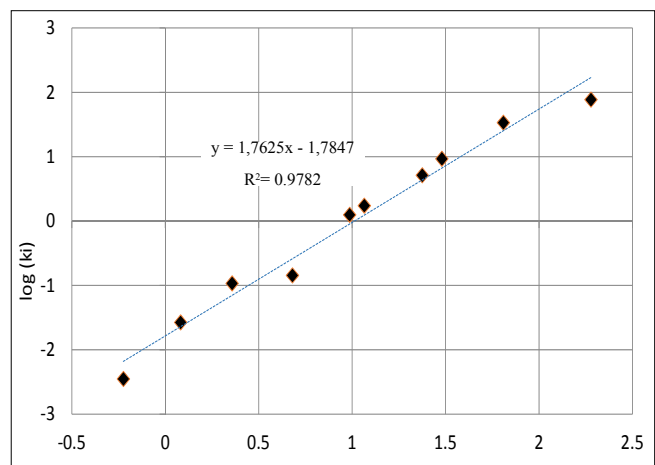
با استفاده از دستکاری ریاضی، رابطه خطی ۳ با استفاده از دو متغیر مستقل به دست می‌آید.

$$\frac{Y_i}{Z_i} = \left(\frac{L}{V}\right) * \frac{X_i}{Z_i} + \frac{F}{V} \quad (3)$$

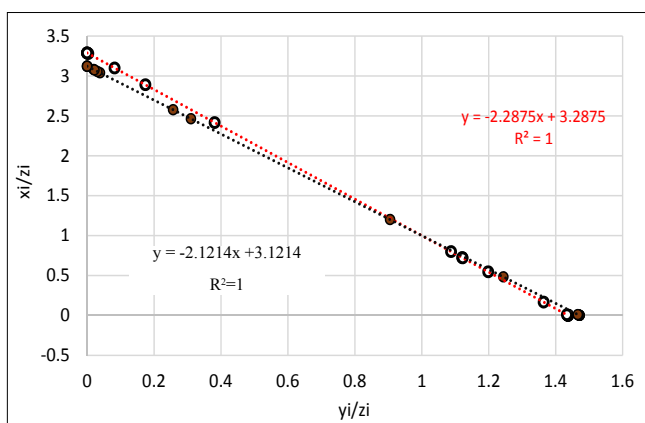
در معادله (۳)، بدیهی است که خط گذرنده از داده‌های  $\frac{Y_i}{Z_i}$  بر حسب  $\frac{X_i}{Z_i}$  باید دارای شیب ثابت باشد و به عبارت دیگر باید میزان انحراف از خط راست برای تمام نقاط صفر باشد. این موضوع حتی برای اجزایی که در ترکیب گاز یا مایع وجود ندارد نیز صادق است.



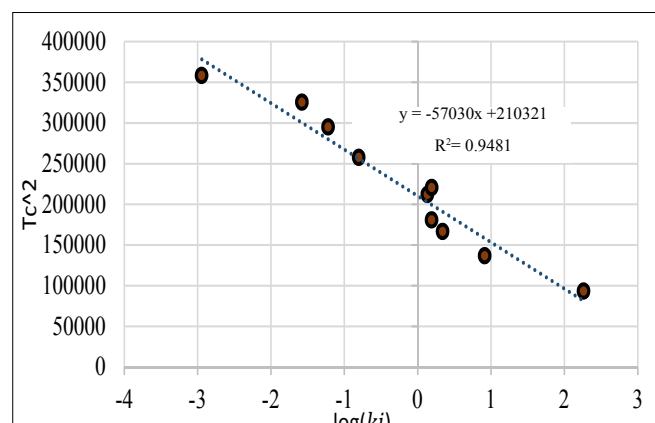
شکل ۷ | رسم نمودار کمپیل-باکلی برای داده‌های نمونه پنجم



شکل ۵ | رسم نمودار هافمن برای داده‌های نمونه پنجم



شکل ۸ | مقایسه نتایج ترکیب نمونه سرچاهی و ته‌چاهی مخزن نفت سبک



شکل ۶ | رسم نمودار کمپیل-باکلی برای داده‌های نمونه اول

شش نمونه نفت ته‌چاهی و سرچاهی با هم مقایسه شد. این نمونه‌ها در یک بازه پنج‌ساله با توجه به شرایط از مخازن مختلف نمونه‌گیری شده است. در بین این نمونه‌ها نفت‌های سبک و سنگین وجود دارد. لذا نتایج بررسی، قابل استناد در محدوده بزرگ‌تر از نفت‌های کشور است. برای بررسی صحت روش موازنه مواد، دو نمونه نفت سبک (اول با درجه سنگینی ۳۲ به صورت ته‌چاهی) و سنگین (دوم با درجه سنگینی ۲۴ به صورت سرچاهی) انتخاب شد. نتایج موازنه مولی در شکل-۱ نشان داده شده است.

در شکل-۱ مشخص است که خط گذرنده از نقاط نسبت درصد مولی گاز به مخزن و درصد مولی نفت به مخزن در نمودار موازنه مولی برای نمونه نفت‌هایی که درصد مولی اجزای آن به‌درستی گفته شده، دقیقاً یک خط راست می‌باشد. نمونه یک مربوط به یک نمونه ته‌چاهی نفت سبک با درجه سنگینی ۳۲ است و نمونه ششم مربوط به ترکیب یک نمونه سرچاهی با درجه سنگینی ۲۴ می‌باشد. در هر دو نمونه نمودار گذر کرده از نقاط آزمایشگاهی خطی است و تفاوت شیب موجود در دونمونه به تفاوت نسبت مولی گاز به نفت آنها برمی‌گردد. نفت سبک نمونه اول دارای اندازه شیب بیشتری نسبت به نمونه نفت سنگین ششم است.

در صورتی که نمودار موازنه مولی از حالت خطی خارج شود، نشان‌دهنده اشتباه در محاسبات مربوط به موازنه مولی یک یا چند عدد از اجزاست. این موضوع با بررسی نتایج گزارش شده برای ترکیب نمونه چهارم در شکل-۲ قابل مشاهده است.

در شکل-۲ داده‌های آزمایشگاهی مربوط به یک نمونه سرچاهی نفت سنگین مشاهده می‌شود که انحراف نقاط از خط راست بسیار زیاد است و این نشان از نادرستی درصد مولی اجزای نمونه چهارم است. پس از اعلام این موضوع به گروه اندازه‌گیری و محاسبه آزمایشگاه، خطا در محاسبات مورد تأیید قرار گرفت و داده‌ها به شکل-۳ اصلاح شد.

روش دیگری که به‌منظور صحت‌سنجی استفاده شد، نمودار هافمن است که مقدار  $\log k_p$  برای هر جزء را بر حسب ضریب هافمن ( $F_i$ ) رسم می‌کند. شکل-۴ نتایج محاسبات هافمن را برای نمونه اول نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه خط گذرنده از نقاط نمودار موازنه مولی

بیانگر دمای بحرانی جزء مورد نظر است که بر حسب رانکین یا کلون می‌تواند باشد و  $T$  دمایی است که آزمایش در آن دما انجام شده است که می‌تواند بر حسب رانکین یا کلون باشد. همچنین  $P_{SC}$ ، فشار در شرایط استاندارد بر حسب psi است که مقدار تقریبی آن ۱۴/۶۹ می‌باشد.

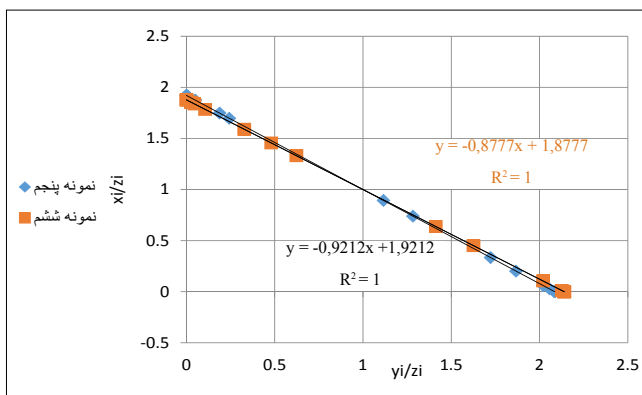
این نمودار تعادل اجزا در فاز گاز به نفت را نشان می‌دهد. نتایج این نمودار علاوه بر صحت محاسبات موازنه مواد به صحت انجام آزمایش‌های تعیین ترکیب گاز و نفت نیز مربوط است. در این نمودار الزامی به خطی بودن تمام نقاط نیست و با توجه به محدودیت ابزارهای اندازه‌گیری، انتظار دقت کامل وجود ندارد.

### ۱-۳- روش ترسیمی کمپیل-باکلی

روش دیگری که برای اطمینان از صحت درصد مولی ترکیب نمونه بهره می‌گیرند، استفاده از نمودار کمپیل-باکلی است که در آن، مقدار  $\log k_p$  برای هر جزء را بر حسب مجذور دمای بحرانی آن جزء رسم می‌کنند. این نمودار نیز مانند نمودار هافمن تعادل اجزا در فاز گاز به نفت را نشان می‌دهد. این نمودار علاوه بر صحت محاسبات موازنه مواد به صحت انجام آزمایش‌های تعیین ترکیب گاز و نفت نیز مربوط است. با مقایسه سه روش موازنه مولی، هافمن و باکلی می‌توان گفت روش موازنه مواد، خطای در محاسبات را نشان می‌دهد و روش‌های باکلی و هافمن علاوه بر صحت محاسبات، صحت اندازه‌گیری آزمایشگاهی را نیز نشان می‌دهند.

### ۲- بحث و بررسی

برای مقایسه اعتبار روش‌های موازنه مواد هافمن و باکلی،



شکل ۹ | مقایسه نتایج ترکیب نمونه سرچاهی و ته‌چاهی مخزن نفت سنگین

شده در مقاله قبلی و مطالعات شبیه‌سازی در مورد تشابه نمونه‌گیری سرچاهی (به روش اختلاط تماس تعادلی) با نمونه‌گیری ته‌چاهی به صورت آزمایشگاهی نیز قابل اثبات است. لازم به ذکر است که داده‌های کامل ترکیب نفت و گاز نمونه‌های اول تا ششم در بخش ضمیمه قابل مشاهده است.

### نتیجه‌گیری

به دلیل وجود خطاهای آزمایشگاهی که شامل خطای دستگاه و خطای انسانی می‌باشد، داده‌های درصد مولی اجزا، همواره همراه با خطا می‌باشند. در نتیجه باید میزان خطا، محاسبه شده تا اطمینان حاصل شود که این داده‌ها قابل استفاده می‌باشند. بدین منظور از سه روش ذکر شده در این مقاله برای صحت داده‌های آزمایشگاهی و اعتبارسنجی آنها استفاده شد. با توجه به این نکته که روش موازنه جرم مطمئن‌ترین روش کنترل کیفیت می‌باشد، اگر در نمودار آن، انحراف از خط راست زیاد بود، نشانه خطای انسانی در محاسبات موازنه مواد است. لذا داده‌های درصد مولی اجزا قابل استفاده نیستند و نیاز به محاسبه مجدد دارند، اما اگر در روش موازنه مولی انحراف از خط راست صفر بود، می‌توان صحت اندازه‌گیری آزمایشگاهی را با استفاده از روش‌های هافمن و کمپبل-باکلی بررسی و انحراف از خط راست را برای آنها محاسبه کرد، به طوری که اگر انحراف از خط راست برای داده‌های آزمایشگاهی کم باشد، نشان‌دهنده اعتبار بالا و صحت داده‌های سیال است.

در این مطالعه پس از اعتبارسنجی داده‌های سرچاهی و ته‌چاهی، دولایه نفت سبک و سنگین مشخص شد. ترکیب سیال به دست آمده از هر دو روش تشابه بسیار زیادی از نظر موازنه مولی دارد. تئوری اختلاط تماس تعادلی که در گذشته به صورت محاسبات شبیه‌سازی مطرح شده بود، با استفاده از این مطالعه از نگاه آزمایشگاهی نیز اثبات می‌شود. ■

برای نمونه‌های اول تقریباً خط راست شد، پیش‌بینی می‌شد که خط گذرنده از نقاط نمودار هافمن نیز تقریباً یک خط راست شود که تأیید این موضوع در شکل-۴ مشخص است. در همه نمونه‌هایی که نمودار موازنه مولی، یک خط کاملاً راست می‌باشد، نمودار هافمن خط راست تقریبی است که این اتفاق در نمونه پنجم رخ داده است که در شکل-۵ نمودار هافمن این نمونه را مشاهده می‌کنید. انتظار خطی بودن نمودار هافمن به دلیل تنوع ساختاری مواد با عدد کربن بزرگ‌تر از ۵ انتظاری غیر واقعی است. این موضوع به این دلیل است که تقسیم‌بندی ترکیب براساس عدد کربن سبب نادیده گرفتن تفاوت خواص فیزیکی مانند دمای جوش می‌شود و نمی‌توان انتظار تشابه ۱۰۰٪ همه اجزا را داشت.

### ۳- روش ترسیمی کمپبل-باکلی

روش دیگری که برای اطمینان از صحت درصد مولی ترکیب نمونه از آن بهره می‌گیرند، نمودار کمپبل-باکلی است که در آن، مقدار  $\log k_p$  برای هر جزء را بر حسب مجذور دمای بحرانی آن جزء رسم می‌کنند.

همانطور که در شکل‌های-۶ و ۷ مشاهده می‌کنیم، نتایج روش کمپبل-باکلی تقریباً همان نتایج روش هافمن را می‌دهد که نشان از صحت داده‌های درصد مولی اجزای نمونه‌ی اول و تقریباً غیرقابل اطمینان بودن داده‌های درصد مولی نمونه پنجم است.

یک از اهداف تحقیق، بررسی صحت نمونه‌گیری سرچاهی به روش اختلاط تماس تعادلی با نمونه ته‌چاهی است. نمونه‌های اول و دوم مربوط به سیالات یک مخزن و یک لایه‌اند که نمونه اول به روش ته‌چاهی و نمونه دوم به روش سرچاهی و اختلاط تماس تعادلی تهیه شده است. از سوی دیگر، نمونه‌های پنجم و ششم نیز با همین وضعیت از یک مخزن نفت سنگین با درجه سنگینی ۲۴ تهیه شده است. نتایج شکل‌های-۸ و ۹ نشان می‌دهد که ادعای بررسی

### پانویس‌ها

1. Hoffman plot

2. Campbel-buckley plot

### منابع

[1] Julius U. Akpabio, S. O. I., Oluwatoyin O. Akinsete (2015). "VT Fluid Sampling, Characterization and Gas Condensate Reservoir Modeling." *Advances in Research* 5(5): 1-11.

[۲] اسارا شکراله زاده بهبهانی، مهدی زینلی حسونوند، مجتبی امیری (۱۳۹۵). "اختلاط تماس تعادلی، روشی برای اصلاح ترکیب سیال سرچاهی در مخازن نفتی و گازی." *اکتشاف و تولید* ۶۰-۶۵: ۶۵-۶۰

[۳] خزایی، م. (۱۳۹۶). "بررسی صحت نتایج گزارش‌های دریافتی از آزمایشگاه PVT." *اکتشاف و تولید* ۱۵۱: ۱۴-۲۱.