

# بررسی روش ارزیابی تعیین سطح تماس سیالات با استفاده از ترمودینامیک تعادل فازی و برگشت‌ناپذیر در ستون هیدروکربوری محیط‌های متخلخل؛ مطالعه موردی در یکی از مخازن اشباع شکاف‌دار جنوب غربی ایران

هادی انصاری<sup>۱</sup>، عبدالنبی هاشمی\*<sup>۲</sup>، سید علی موسوی دهقانی<sup>۳</sup> و شهاب گرامی<sup>۴</sup>

۱- دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشکده نفت، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران

۳- گروه مطالعات تولید، پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۴- پژوهشکده ازدیاد و برداشت، شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۰

## چکیده

تعیین سطح تماس سیالات یکی از چالش‌های برنامه‌ریزی توسعه میدان و مدیریت مخزن است. از دیدگاه ترمودینامیکی سطح تماس گاز-نفت عمقی است که بیشترین تغییرات ترکیب سیال وجود دارد، به طوری که در آن عمق یک ناپیوستگی به علت تغییر فاز آبی در سطح تماس رخ می‌دهد. این تغییر فاز آبی به واسطه نیروهای گرانشی، شیمیایی و حرارتی می‌تواند باشد. در این پژوهش، سه نمونه نفت خام از مخزن نفتی آسماری در یکی از میادین که از نوع شکاف‌دار است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نمونه‌های هر سه چاه دارای عمق مبنا و در شرایط بالای نقطه حباب ناحیه نفتی اخذ شده‌اند. این پژوهش به صورت کاربردی به ترکیب خواص سیال و شبیه‌سازی گرادیان ترکیبی برای کاهش ریسک پیش‌بینی سطح تماس سیالات بدون نیاز به چاه جدید یا چاه پایلوت پرداخته است. در هر سه نمونه سطح تماس گاز-نفت به صورت واضح به دست آمده، به طوری که در بهترین مدل‌های ترمودینامیکی عمق سطح تماس گاز-نفت محاسبه شده به ترتیب ۱، ۱۳، ۷۵ و ۷۳ ft با عمق سطح تماس گاز-نفت به روش لایه آزمایشی سازند اختلاف دارند. در نهایت، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که روش‌های ترمودینامیکی قابل اعتماد و مقرون به صرفه برای کاهش عدم اطمینان برای تخمین یا تعیین سطح تماس سیالات و کاهش ریسک پروژه‌های توسعه میدان هستند. در نتیجه، این روش برای هر زمان که اطلاعات خواص سیال معتبر از مخازن اشباع همگن و شکاف‌دار در دسترس باشد، توصیه می‌شود.

**کلمات کلیدی:** تئوری گرادیان ترکیبی، تعادل گراویتی / شیمیایی، انتقال جرم غیرهم‌دما، مشخصه‌سازی اجزاء سنگین سیال، محاسبه سطح تماس گاز-نفت

## مقدمه

اصلاح شده یا محاسبات نقطه بحرانی اصلاح شده و روش بهبود یافته [۷]. روش نصف فاصله تنها به یک شرایط مبنا نیاز دارد و به شرط آنکه نوع اشباع به درستی تعیین شده باشد، قابل اطمینان است. قابلیت پیش‌بینی روش نمودار فازی اصلاح شده در سیستم‌های نزدیک بحرانی با گرادیان ترکیبی بالا و GOC اشباع شده ضعیف‌تر از روش نصف فاصله است. در این روش، ناحیه نزدیک به GOC با گرادیان ترکیبی بالا به درستی تقریب زده نمی‌شود، اگر شرایط مبنا دور از این ناحیه باشد. همچنین، نیاز به داشتن دو شرایط مبنا است، یکی در ناحیه نفتی و دیگری در ناحیه گازی، به جای اینکه تنها یک نقطه مبنا داشته باشیم. الگوریتم بهبود یافته وابسته به این نیست که آیا شرایط GOC اشباع شده است یا نه. بررسی سرعت محاسباتی این روش در انواع مخازن نفتی در مقایسه با روش نصف فاصله سرعت حداقل ۴-۱/۵ برابر بیشتر است. این روش، پیشنهادی بسیار مفید برای مواردی که سیالات مخازن گرادیان ترکیبی کم و نیز مواردی که دارای سطوح نفت و گاز دارند، است [۸].

فیونک خط‌های مرتبط با نمونه‌گیری و تأثیراتش بر روی محاسبات گرادیان هم‌دما را به پنج بخش مهم تقسیم کرده که شامل: روش نمونه‌گیری، بازه نمونه‌گیری، زمین‌شناسی مخزن، حالت سیال مخزن و مشکلات آزمایشگاهی هستند [۹]. شوکلا و فیروزآبادی مدلی را برای فاکتور نفوذ حرارتی در مخلوط‌های دوتایی سیالات مخزنی ارائه دادند. فاکتور نفوذ حرارتی در این مدل تابع صریحی از انرژی‌های داخلی، حجم‌های مولی جزئی، پتانسیل شیمیایی و نسبت انرژی‌های بخار و جریان ویسکوز است [۱۰]. فاکتور نفوذ حرارتی<sup>۱</sup> مدل‌های دوتایی ذکر شده، فقط خواص تعادلی را به اشتراک گذاشته‌اند و وابستگی خواص غیرتعادلی را نادیده گرفته‌اند.

تعیین حجم درجای سیال در مخزن براساس چندین فاکتور است که یکی از آنها تعریف مناسب سطح تماس سیالات است [۱]. بسته به داده‌های در دسترس، سطوح سیالات را می‌توان به‌طور مستقیم از چاه حفاری شده یا به‌صورت غیرمستقیم از آنالیز سائیمیک تعیین کرد [۲]. تکنیک غیرمستقیم ارزیابی سطح تماس گاز-نفت (GOC) فقط نیازمند این است که در ناحیه نفتی یا گازی نفوذ کرده باشد، به‌جای اینکه در هر دو ناحیه (اگر هر دو وجود داشته باشند) نفوذ کرده باشند [۳ و ۴]. روابط فشار-حجم-دما (PVT) و آنالیز گذاری فشاری مثال‌هایی از تکنیک غیرمستقیم هستند. تکنیک PVT مبتنی بر اصل گرادیان ترکیبی است. این تکنیک فرض می‌کند که نفت و گاز در تاریخچه زمین‌شناسی (حالت استاتیک) قبل از اینکه مخزن تولیدی داشته باشد به‌حالت ترمودینامیک تعادلی رسیده است. بنابراین، این روش از داده‌های PVT معتبر به‌دست آمده از منطقه نفتی یا گازی استفاده می‌کند تا وجود یا عدم وجود هیدروکربن هم‌تا و سطح تماس احتمالی بین دو هیدروکربن یا هیدروکربن و آب را بررسی کند [۵]. در مخازن تولیدی گرادیان فشار و دما به خصوصیات جریان سیال بستگی داشته و قابل بررسی با گرادیان استاتیکی نیست. به‌علاوه در این نوع مخازن، پدیده پراکندگی شدیداً فرآیند انتقال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مخازن تخلیه شده تا زیر فشار اشباع، همرفت اجباری و طبیعی ناشی از تغییرات چگالی توسعه یافته در هر ستون سیال می‌تواند به عاملی بسیار مؤثر در کنترل تغییرات ترکیب سیال در مقایسه با عامل‌های که تعادل ترمودینامیکی را باعث می‌شوند، تبدیل شود [۶]. هنگامی که اطلاعات محدودی در مورد میدان تازه کشف شده وجود داشته باشد، از روش‌هایی برای تعیین مکان GOC می‌توان استفاده کرد. برخی از این روش‌ها عبارتند از نصف فاصله، محاسبات نمودار فازی

1. Thermal Diffusion Factor (TDF)

توسط ایتایو و همکارانش با استفاده از شبیه‌سازی گرادیان ترکیبی به ارزیابی سطح تماس گاز- نفت به صورت دو مطالعه موردی که در مجموع متشکل از ۶ مخزن است، پرداختند [۱۷]. در این پژوهش، به صورت کاربردی ارزیابی سطح تماس گاز- نفت در محیط متخلخل توسط مفهوم PVT با استفاده از شبیه‌سازی نمونه نفت‌های خام یکی از میدین فوق عظیم واقع در جنوب ایران نشان داده شده است. علاوه بر نشان دادن روش کار، قابلیت اطمینان<sup>۱</sup> این روش و محدودیت‌هایش برجسته شده است.

### تئوری عمومی تعادل فاز و پدیده‌های برگشت‌ناپذیر در مخازن هیدروکربوری

ترمودینامیک با فرآیندهای تعادلی، غیر تعادلی یا برگشت‌ناپذیر سروکار دارد. ترمودینامیک فرآیندهای تعادلی چارچوب ترمودینامیک برگشت‌ناپذیر را نیز مشخص می‌کند. در محاسبات تعادل فاز کلاسیک، اثر نیروهای جاذبه در روابط ترمودینامیکی معمولاً در نظر گرفته نمی‌شود. در شرایطی خاص و برای مسائلی خاص، به دلیل تأثیر میدان جاذبه بر خواص و ترکیب فاز، تغییرات ترکیب در مخازن هیدروکربوری مهم است. در برخی کاربردهای مربوط به مخازن هیدروکربوری، به دلیل تولید آنتروپی مخالف صفر، حتی در حالت ایستا نیز نمی‌توان از معیار تعادل گیبس استفاده کرد [۱۸]. در ادامه، ابتدا معیارهای تعادل در میدان جاذبه و سپس با توجه به حالت ایستا در مخازن، ترمودینامیک برگشت‌ناپذیر معرفی و تأثیر تغییرات دما بر تغییر ترکیب بدون وجود جابه‌جایی آزاد (طبیعی) فرمول‌بندی شده است. برای یک سیال چند جزئی زمانی که جرم  $m$  از  $h$  به  $h+dh$  جابه‌جا می‌شود به دلیل انتقال اجزای مختلف از سیستم، کار شیمیایی وجود دارد که برای جزء  $i$  مقدار آن برابر  $\mu_i dn_i$  است.

فاکتور نفوذ حرارتی برای مخلوط‌های چند جزئی (سه‌جزئی و بالاتر) متفاوت از مخلوط‌های دو جزئی است، چون گرمای انتقال ویژه ( $Q$ ) هر جزء متفاوت از مخلوط دوتایی برای مخلوط‌های چند جزئی است. فیروزآبادی و همکاران فاکتور نفوذ حرارتی را برای مخلوط‌های چند جزئی در دما و فشار مختلف به دست آوردند [۱۱]. لیو و باروفیت به بررسی نقش شبیه‌سازی گرادیان ترکیبی در توسعه مخازن نزدیک به شرایط بحرانی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد گرادیان ترکیبی تأثیر قابل توجهی بر روی تخمین نفت در جا و پیش‌بینی خواص سیال، اما تأثیر کمی بر روی بازیافت تخلیه‌ای دارد اگر ترکیب سیال مبنای نزدیک به میانه مخزن قرار داشته باشد [۱۲]. گرادیان ترکیبی شدید می‌تواند منجر به تشکیل نفت با ویسکوزیته بالا در نزدیکی سطح تماس آب- نفت در مخزن شود [۱۳]. پدرسن و هجیرمستاد گرادیان ترکیبی را در پنج مخزن متفاوت در دریای شمال بررسی و آنالیز کردند. همه پنج مخزن سطح تماس گاز- نفت و برای هر مخزن یک ترکیب از بالا و دو یا بیشتر از زیر GOC وجود داشت. برای هر پنج مخزن گرادیان ترکیبی بالاتر از آن است که به تنهایی توسط جدایش ثقلی توضیح داده شود. بیشترین گرادیان ترکیبی در مخزنی مشاهده شده که غنی از آسفالتین بوده است [۱۴]. در پژوهشی توسط اورتیگون و همکاران به مشخصه‌سازی و ایجاد نقشه (توزیع خواص) سیال در میدان بزرگ برگن پرداختند. این پژوهش منجر به درک بهتری از توزیع سیالات که در آن گرادیان ترکیبی به صورت جانبی است، شده و همچنین، به مدیریت دسترسی به ناحیه‌های نفت سنگین کمک می‌کند [۱۵]. صداقت و همکاران به بهبود و سرعت هم‌گرایی الگوریتم ویتسون در محاسبات تغییر ترکیب با عمق پرداختند. این بهبودها با انتخاب مقدار مناسب محاسبه شده از پارامتر جایگزینی متوالی ( $\lambda$ ) و استفاده از روش مناسب‌تری برای انتخاب تخمین فشار در الگوریتم انجام شده است [۱۶]. در پژوهشی

$$F_i = f_i(T, P, z_1, z_2, \dots, z_{N-1}) - f_i(T, P^0, z_1^0, z_2^0, \dots, z_{N-1}^0) \exp \left( -\frac{M_i g (h - h^0)}{RT} \right) = 0 \quad i=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

به شرطی که:

$$\sum_{i=1}^N z_i = 1 \quad (7)$$

برای حل معادلات غیرخطی بالا از روش جایگزینی متوالی شتاب‌یافته<sup>۱</sup> با روش عمومی غالب مقادیر ویژه<sup>۲</sup> برای ترکیب و از روش نیوتن-رافسون برای فشار استفاده می‌شود. از روابط ارائه شده ۳ و ۷، جهت محاسبه فشار اشباع می‌توان استفاده کرد. میشلسن روش مؤثری را برای حل محاسبه فشار اشباع که در اینجا برای حل تعادل گراویتی/شیمیایی اصلاح شده است را به صورت زیر ارائه داده است [۱۹]:

$$Q(p, z) = 1 - \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N z_i \left[ \bar{f}_i(p^0, z^0) / f_i(p, z) \right] = 1 - \sum_{i=1}^N Y_i$$

$$Y_i = z_i \left[ \bar{f}_i(p^0, z^0) / f_i(p, z) \right] \quad (9)$$

$$\bar{f}_i(p^0, z^0) = f_i(p^0, z^0) \exp \left( -\frac{M_i g (h - h^0)}{RT} \right) \quad (10)$$

برای حل رابطه ۸ از دو روش ارائه شده در بالا برای فشار و ترکیب استفاده می‌شود. بدین صورت که ابتدا فوگاسیته از ترکیب مینا  $f_i(p^0, z^0)$  محاسبه و سپس گراویتی-فوگاسیته اصلاح شده  $\bar{f}_i(p^0, z^0)$  از رابطه ۱۰ به دست می‌آید. این محاسبات فقط یک مرحله نیاز است تا انجام شود. ترکیب و فشار به عنوان حدس‌های اولیه در عمق  $h$  همان مقادیری اولیه در عمق مینا  $p^{(1)}(h) = p^0$  و  $z^{(1)}(h) = z_0$  هستند. فوگاسیته از ترکیب تخمینی  $z$  در فشار تخمینی  $p$  محاسبه شده است. عدد مولی از رابطه ۹ حساب می‌شود. فوگاسیته نسبی اصلاح شده از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود [۱۹ و ۲۰]:

عبارت  $\sum_{i=1}^N \mu_i dn_i$  شکلی از کار است که یک سیستم در حجم ثابت بر اثر تغییر ترکیب جزئی انجام می‌دهد. کار همراه با جابه‌جایی جرم متناظر،  $dm_i = n_i M_i$ ، برای جزء  $i$  برابر با  $gh dm_i$  است. چون  $m_i = n_i M_i$  است،  $h dm_i = M_i h dn_i$  خواهد بود. برای زمانی که سیستم به مکان  $h+dh$  برده می‌شود به ترتیب کار، انرژی درونی و انرژی آزاد گیبس از رابطه ۱ به دست می‌آیند [۱۸].

$$dW' = \sum_{i=1}^N \mu_i dn_i + \sum_{i=1}^N gh dm_i = \sum_{i=1}^N (\mu_i + M_i gh) dn_i \quad i=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$dU = T ds - PdV + mg dh + \sum_{i=1}^N (\mu_i + M_i gh) dn_i$$

$$dG = -SdT + VdP + mg dh + \sum_{i=1}^N (\mu_i + M_i gh) dn_i$$

در حالت تعادل  $dG$  باید صفر باشد. چون  $h$  و  $P$  وابسته هستند:

$$dT = 0 \quad i=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$\mu_i + M_i gh = 0$$

$$VdP + mg dh = 0$$

عبارت دوم رابطه تهنشینی گیبس را به دست می‌دهد. مفهوم تعادل تفکیک جاذبه‌ای در نهایت عبارتی می‌دهد که در آن مطابق رابطه بالا برای یک ستون سیال جزئی در شرایط هم‌دما، پتانسیل شیمیایی جزء  $i$  تابعی از مکان  $h$  خواهد بود. رابطه ۳ ترکیب و فشار را به صورت تابعی از عمق (ارتفاع) می‌دهد.

$$d\mu_i = (M_i g dh)_T \quad i=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

با جای‌گذاری مقدار پتانسیل شیمیایی رابطه بالا به صورت ۴ و انتگرال‌گیری از آن، رابطه ۵ از عمق مرجع صفر تا  $h$  به دست می‌آید:

$$(RT d \ln f_i = -M_i g dh)_T \quad i=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$(5)$$

$$f_i(h) = f_i(h^0) \exp \left( -\frac{M_i g (h - h^0)}{RT} \right) \quad i=1, 2, \dots, N$$

رابطه ۵ فوگاسیته جزء  $i$  یک فاز را بر حسب مکان ارائه می‌کند. با داشتن مقادیر ترکیب و فشار در یک نقطه مرجع می‌توان ترکیب و فشار را در هر نقطه دیگر در جهت عمودی حساب کرد [۱۸]:

1. Successive Substitution Accelerated

2. General Dominant Eigenvalue Method (GDEM)

محاسبه هستند [۶].  $F_{Ti}$  با قطعیت خیلی کمی تعیین می‌شود و اینکه پیش‌بینی آن غالباً گرانس را خنثی می‌کند و سبب ایجاد تغییر ترکیب کمتری می‌شود. حالتی که گرادیان دمایی وجود داشته باشد ولی از اثر نفوذ گرمایی صرف نظر شده باشد<sup>۱</sup> ( $F_{Ti}=0, \nabla T \neq 0$ )، رابطه به صورت زیر در می‌آید که با روش‌های عددی می‌توان آن را حل کرد [۷]:

$$\nabla \mu_i = M_i g - S_i \nabla T \quad (20)$$

$$S_i = -\frac{\partial \mu_i}{\partial T} \quad (21)$$

در این حالت می‌توان از تابعیت دمایی  $S_i$  صرف نظر نمود. با توجه به این که با داشتن گرما ( $\nabla T = dT/dh$ ) و شرایط نقطه مبنا ( $T_0, P_0$ )، دمای هر مکانی قابل محاسبه است، خواهیم داشت:

$$f_i(h) = f_i(h^0) \exp\left(-\frac{M_i g (h - h^0) + S_i (dT/dh)}{RT}\right) \quad (22)$$

در غیاب گرانس گرادیان دما می‌تواند گرادیان ترکیبی را توسط نفوذ حرارتی ایجاد کند. این تأثیر اغلب به اثر سورت اشاره دارد. در این صورت رابطه ۱۸ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial z_k}\right)_{p,T,z_j=k} \nabla z_k = F_{Ti} \frac{\nabla T}{T} \quad (23)$$

فاکتور نفوذ گرمایی یا اثر سورت تمایل یک مخلوط بدون جابه‌جایی به تفکیک بر اثر اختلاف دما است و معمولاً باعث رانده شدن اجزای سبک به قسمت‌های گرم‌تر (اعمق مخزن) و اجزای سنگین به نواحی سرد (بالای مخزن) می‌شود. پس این پارامتر میزان قدرت جدا شدن دو سیال در فرآیند نفوذ حرارتی را نشان می‌دهد. هر چه بزرگ‌تر باشد، جداسازی قوی‌تر است [۱۰]. انواع مدل‌های تعیین فاکتور نفوذ حرارتی پیشنهاد شده، که دو مدل پر کاربرد صنعتی شامل مدل‌های هاس و کمپرس است، که مدل هاس از رابطه ۲۴ به دست می‌آید [۷]:

$$F_{T,i}^H = \frac{1}{M} (M_i H - M H_i) \quad (24)$$

$$r_i = \frac{\bar{f}_i(p^0, z^0)}{f_i(p, z)} \left(\sum_{j=1}^N Y_j\right)^{-1} \quad (11)$$

اعداد مولی توسط رابطه ۱۲ بروز رسانی می‌شوند.

$$Y_i^{(n+1)} = Y_i^{(n)} [r_i^{(n)}]^\lambda \quad (12)$$

که جایگزینی متوالی ( $\lambda=1$ ) با استفاده از چهار تکرار براساس افزایش GDEM به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\lambda = \left| \frac{b_{11}}{b_{11} - b_{01}} \right| \quad (13)$$

$$b_{01} = \sum_{i=1}^N r_i^n r_i^{(n-1)} ; \sum_{i=1}^N r_i^{(n-1)} r_i^{(n-1)}$$

$z_i^{(n+1)}$  از  $Y_i^{(n+1)}$  با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$z_i = Y_i / \left(\sum_{j=1}^N Y_j\right)^{-1} \quad (14)$$

بروز رسانی فشار تخمینی با استفاده روش نیوتن-رافسون صورت می‌گیرد:

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} - \frac{Q^{(n)}}{(\partial Q / \partial p)^{(n)}} \quad (15)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial p} = \sum_{i=1}^N Y_i r_i \frac{\partial f_i / \partial p}{f_i(p, z)} \quad (16)$$

هم‌گرایی با استفاده از دو بازه زیر بررسی می‌شود. تا رسیدن به هم‌گرایی، تکرار ادامه می‌یابد.

$$\left| 1 - \sum_{i=1}^N Y_i \right| < 10^{-13} \quad (17)$$

$$\left( \sum_{i=1}^N \frac{\ln(r_i)}{\ln(Y_i / z_i)} \right) < 10^{-8}$$

از این‌رو رابطه کلی برای محاسبه تغییرات ترکیب نفت و گاز که شامل نیروهای رانشی، انرژی شیمیایی، گرانشی و گرادیان حرارتی است، به صورت زیر نوشته می‌شود [۷]:

$$\sum_{k=1}^{n-1} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial z_k}\right) \nabla z_k = F_{Gi} - F_{Ti} \frac{\nabla T}{T} \quad (18)$$

$$F_{Gi} = (M_i - \rho V_i) g \quad (19)$$

$F_{Gi}$  ترم گراویتی جزء  $i$  و  $F_{Ti}$  فاکتور نفوذ گرمایی برای محاسبه شار گرمی ناشی از نفوذ گرمایی جزء  $i$  استفاده شده است [۷]. در رابطه ۱۸ دانسیته، حجم مولی جزئی و تغییرات پتانسیل شیمیایی با ترکیب سیال، همگی با یک رابطه حالت قابل

باشد، نصف فاصله با اجرای یک محاسبات هم‌دما و غیرهم‌دما پیرو محاسبات فشار اشباع در عمق  $h^n=0/5 [h^T+h^B]$  مقدار دهی اولیه شده خواهد شد. ۳- اگر اشباع در عمق  $h$  از نوع نقطه شبنم باشد،  $h=h^T$  می‌شود. در غیر این صورت،  $h=h^B$  است. نصف فاصله با مقادیر جدید برای  $h^T$  یا  $h^B$  با رابطه  $h=0/5 [h^T+h^B]$  اجرا می‌شود. مرحله ۳ تا اینکه اختلاف بین عمق جدید  $h$  در  $n$  تکرار و در عمق قدیمی در تکرار  $n-1$  کمتر شود نسبت به معیار هم‌گرایی تکرار می‌شود [۷].

### مراحل کار

روند کاری پژوهش پیش‌روی مطابق آنچه در شکل ۱ ارائه داده شده، شامل جمع‌آوری داده‌های کلیدی مورد نیاز محاسبات، مدل‌سازی سیالات مخازن (تنظیم معادلات حالت)، اجرای شبیه‌سازی گرادیان ترکیبی با استفاده از مدل ترمودینامیک تعادلی گراویتی/ شیمیایی (نفوذ ملکولی) یا هم‌دما و مدل‌های برگشت‌ناپذیر نفوذ حرارتی استاتیکی و اعتبارسنجی نتایج است. جمع‌آوری داده‌ها شامل ترکیب سیال، تست‌های آزمایشگاهی تفکیک تفاضلی و ترکیب ثابت، مشخص نمودن فشار، دما در عمق مبنایی که نمونه سیال گرفته شده است و بررسی داده‌های آزمایش مکرر سازند است. مدل‌سازی سیالات مخازن شامل گروه‌بندی اجزاء، مشخصه‌سازی برش سنگین و تطابق رابطه حالت با داده‌های آزمایشگاهی است. شبیه‌سازی گرادیان ترکیبی استفاده از مدل‌های ترمودینامیکی تعادلی یا هم‌دما و ترمودینامیک برگشت‌ناپذیر که شامل مدل‌های ضریب نفوذ حرارتی، مدل هاس و مدل کمپرس است. این مدل‌ها جهت ارزیابی سطح تماس گاز- نفت در میدان مورد مطالعه در بوتۀ آزمایش قرار داده شده‌اند. نهایتاً، مدل‌های ترمودینامیکی با سایر تکنیک‌های ارزیابی سطح تماس سیالات در مطالعات مخازن اعتبارسنجی شده است.

ک  $H_i$  آنتالپی مولی جزئی است.  $M$  و  $H$  به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$M = \sum_{i=1}^N z_i M_i \quad (25)$$

$$H = \sum_{i=1}^N z_i H_i$$

مدل کمپرس از رابطه ۲۶ به دست می‌آید:

$$F_{T,i}^K = \frac{1}{V} (V_i H - V H_i) \quad (26)$$

که  $V_i$  حجم مولی جزئی است.  $V$  و  $V_i$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V = \sum_{i=1}^N z_i V_i \quad (27)$$

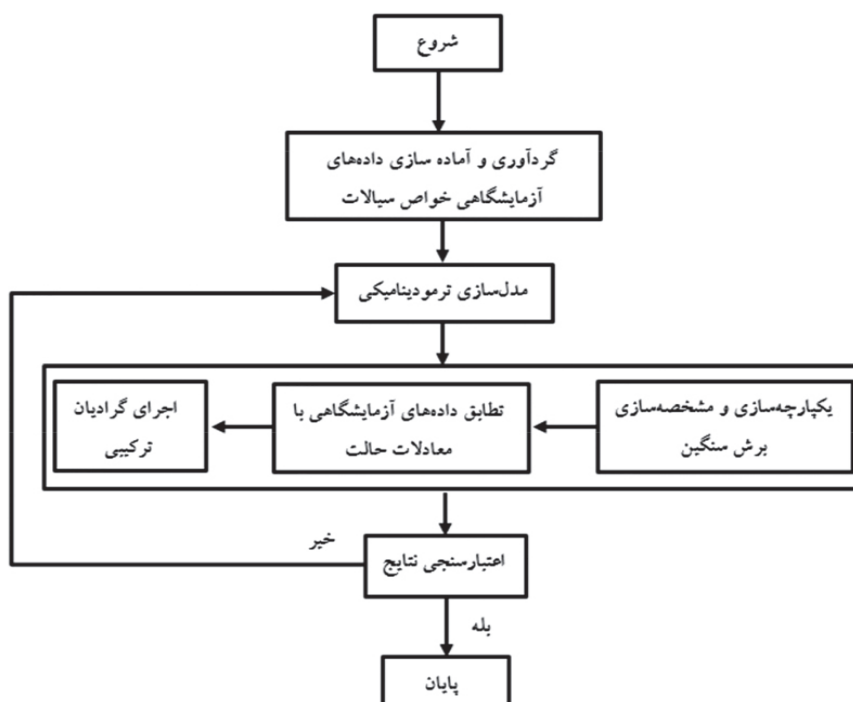
$$V_i = \left( \frac{\partial(nV)}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_{j+1}} = \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)_{T,P,z_{j+1}}$$

در روش‌های غیرهم‌دما برای حل معادلات غیرخطی از رویکرد جایگزینی متوالی شتاب‌یافته با روش عمومی غالب مقادیر ویژه برای ترکیب و رویکرد جایگزینی متوالی شتاب‌یافته برای فشار استفاده می‌شود [۷]. پس از یافتن ترکیب  $z(h)$  و فشار  $p(h)$  از معادلات مربوطه، تست پایداری فازی انجام می‌شود تا مشخص گردد که آیا راه حل معتبر است. یک حل معتبر این است که سیال تک فاز باشد (پایداری از لحاظ ترمودینامیکی). حل ناپایدار نشان‌دهنده این است که  $z$  و  $p$  محاسبه شده به دو فاز (یا بیشتر) تقسیم می‌شوند. اگر حل گرادیانی ناپایدار باشد، بنابراین تست پایداری ترکیب  $z$  باید برای محاسبات گرادیان مجدداً استفاده شود. باید توجه گردد که حل‌های گرادیانی ناپایدار معمولاً فقط در فاصله نزدیک GOC اشباع شده رخ می‌دهد [۷ و ۲۰]. برای یافتن سطح تماس احتمالی از الگوریتم سعی و خطا نصف فاصله استفاده شده، که در زیر مراحل اجرای این الگوریتم آورده شده است:

۱- ابتدا ترکیب و فشار در بالا ( $h^T$ ) و پایین ( $h^B$ ) مخزن، از روش‌های هم‌دما و غیرهم‌دما محاسبه می‌شود.

۲- فشار اشباع در بالا و پایین مخزن،  $h^T$  و  $h^B$  محاسبه می‌شود. اگر انواع اشباع‌های (نقطه حباب/ نقطه شبنم) در بالا و پایین یکسان باشند، بنابراین سطح تماس وجود ندارد. اگر وجود نداشته





شکل ۱ جریان کاری ارزیابی سطح تماس گاز - نفت در میدان مورد مطالعه

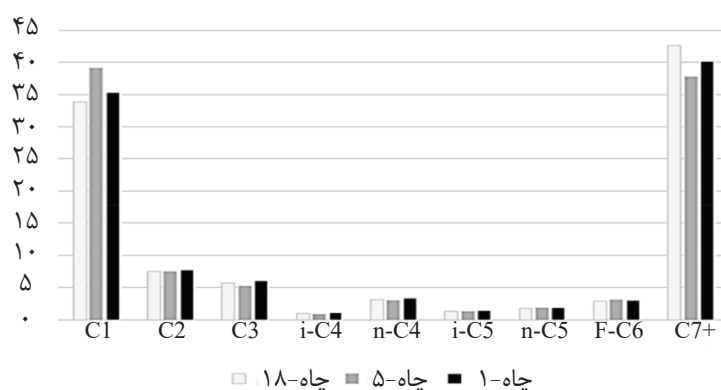
استفاده در پژوهش حاضر به کار گرفته شده است، به صورت مشترک برای خواص بحرانی و ضریب بی مرکزیت، خواص فیزیکی، رابطه حالت، ویسکوزیته و روش گروه‌بندی شامل؛ لی- کسلر، تو، پنگ- رایبسون سه پارامتری (PR3)، لورنز- برای- کلارک (LBC) و میانگین وزنی است. به کارگیری استراتژی انتخاب دینامیک پارامتر برای میزان‌سازی رابطه حالت نیازمند حل مسئله حداقل مربعات غیرخطی است. در این پژوهش، از روش استاندارد لیونبرگ- مارکوردت<sup>۱</sup> که تکنیکی استاندارد برای حل مسئله حداقل مربعات غیرخطی است، استفاده شده است. برای هر نمونه سیال در مدل ترکیب اولیه و ترکیب گروه‌بندی شده مطابق جدول ۱ از ضرایب تأثیرگذار رابطه حالت، ضرایب برهم‌کنش دوتایی و وزن‌دهی جهت تطابق داده‌های آزمایشگاهی با رابطه حالت استفاده گردیده است. لازم به ذکر است که گروه‌بندی برای نمونه سیال چاه-۱۸ با توجه به اینکه عمق سطح تماس مناسبی توسط مدل ترکیب اولیه به دست آمده صورت نگرفته است.

مطابق شکل ۱ در مرحله اعتبارسنجی در صورت عدم تطابق سطح تماس به دست آمده از روش گرادیان ترکیبی با آزمایش مکرر سازند، مجدداً مدل سیال ساخته شده از نظر اختصاص پارامترهای برازشی، در نظر گرفتن مدل ترکیب اولیه یا گروه‌بندی، نوع مدل گرادیان ترکیبی مورد بازنگری قرار داده شده است.

### بحث و بررسی

در این بخش به مراحل مدل‌سازی‌های صورت گرفته پرداخته شده است. مطابق شکل ۲ ترکیب درصد سیال مورد استفاده برای هر سه چاه در آنالیز آورده شده است. با داشتن ترکیب درصد سیال امکان رسم نمودار پوش فازی فراهم است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ترکیب درصد اجزاء برای نمونه‌های چاه‌ها نزدیک به همدیگر هستند. با رسم نمودار پوش فازی می‌توان در صورت اعمال تغییرات تخریبی، پارامترهای برازشی مورد نظر خود را تغییر داد. روابطی که جهت ساخت مدل سیال برای هر سه نمونه مخزن نفتی مورد

1. Levenberg – Marquardt Method



شکل ۲ ترکیب درصد نمونه‌های سیال چاه‌های مورد مطالعه در میدان

جدول ۱ ضرایب رابطه حالت اعمالی در فرآیند برازش مدل سیال ترکیب اولیه و ترکیب گروه‌بندی شده

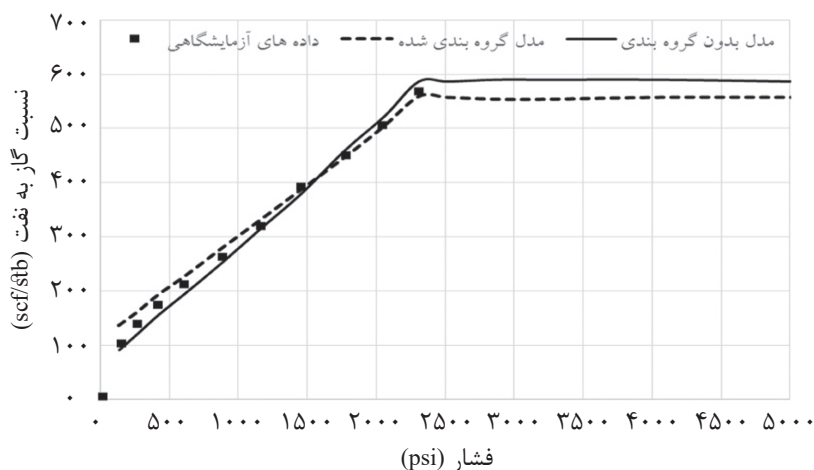
ترکیب اولیه		ترکیب گروه‌بندی شده		نام چاه
$C_{7+}$	F-C <sub>6</sub>	$C_{7+}$	C <sub>2</sub> -C <sub>6</sub>	
$P_c-T_c-WM-\omega$	$P_c-c_T$	$P_c-T_c-WM-\omega$	$P_c-T_c-MW$	چاه-۱
$P_c-T_c-MW-\Omega_a$ $\Omega_b-\omega$	$T_c$	$P_c-T_c-WM-\omega$	$P_c-T_c-MW$	چاه-۵
$P_c-T_c-WM-\omega$	-	-	-	چاه-۱۸

گرادیان دمایی است. برای محاسبه گرادیان دمایی نیاز به در اختیار داشتن دما در عمق‌های مختلف مخزن است که مطابق شکل ۷ دما در برابر عمق توسط دمای سایر چاه‌ها که در عمق‌های مختلف از آنها نمونه سیال اخذ شده است، گردآوری شده و نمودار آنها رسم گردیده است. براساس نمودار زیر گرادیان دمایی  $0.02 \text{ } ^\circ\text{F}/\text{ft}$  -  $0.01 \text{ } ^\circ\text{F}/\text{ft}$  است.

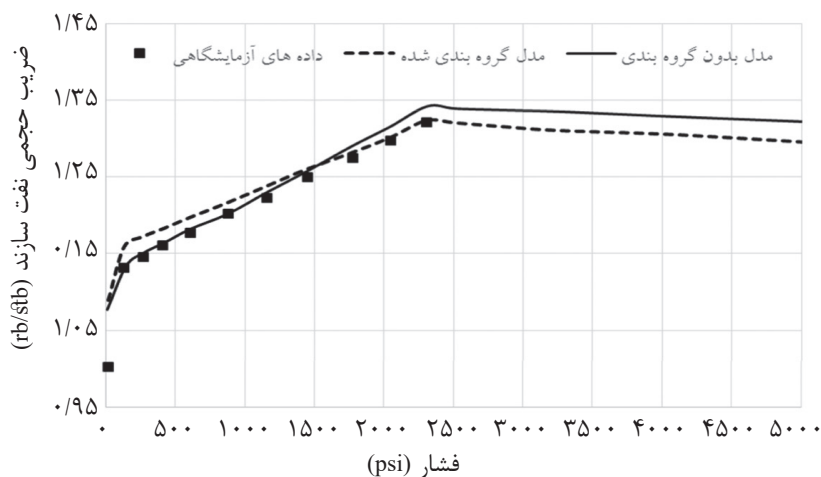
سطح تماس سیالات را می‌توان توسط تغییر شیب در فشارهای اندازه‌گیری برحسب عمق واقعی به‌دست آورد. بدین صورت که محل تغییر شیب به سطح تماس سیالات تعبیر می‌شود. در شکل ۸ نقاطی جهت برازش انتخاب شده که هم راستا هستند، نقطه تقاطعی بین شیب خط ناحیه گاز-نفت و آب-نفت حاصل شده است و باید نقاط دیگر را که در ناحیه نفتی هستند، مدنظر قرار داد. در شکل ۸ سطح تماس گاز-نفت و آب-نفت براساس آزمایش مکرر سازند به ترتیب ۳۰۳۵ ft ss و ۶۲۳۷ ft ss برآورد شده است.

در شکل‌های ۳-۶ تطابق داده‌های آزمایشگاهی و رابطه حالت برای پارامترهای ضریب حجمی نفت سازند ( $B_o$ )، نسبت گاز به نفت (GOR)، دانسیته نفت ( $\rho_o$ ) و ویسکوزیته نفت ( $\mu_o$ ) در یکی از چاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. همچنین در جدول ۲، به‌طور خلاصه مقادیر آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده نمودارهای بالا و چاه‌های دیگر در شرایط نقطه حباب آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق مناسبی میان داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده برای پارامترها در نقطه حباب به‌دست آمده است. در ادامه، مدل‌سازی‌های انجام شده توسط هر یک از مدل‌های ترمودینامیکی یا همان گرادیان ترکیبی آورده شده است. این مدل‌ها شامل کمپرس، هاس، ضریب نفوذ حرارتی صفر و مدل ترمودینامیک تعادلی یا هم‌دما هستند. مطابق جدول ۳ ورودی‌های مورد نیاز جهت انجام محاسبه گرادیان ترکیبی پارامترهای فشار، دما و عمق نمونه‌گیری است. پارامتر دیگر تأثیرگذار ورودی به مدل‌های ترمودینامیک برگشت‌ناپذیر

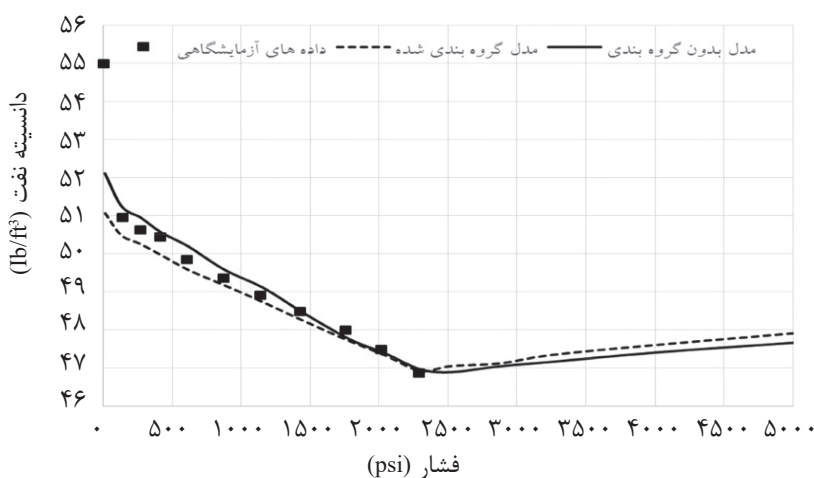




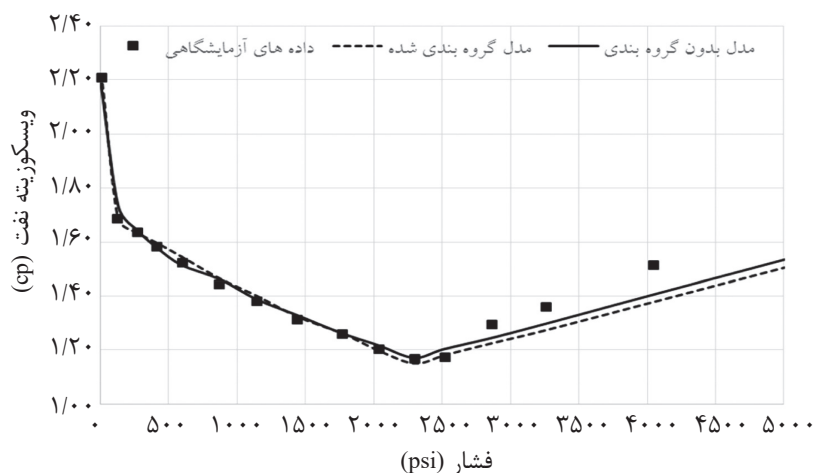
شکل ۳ نمودار برازش برای نسبت گاز به نفت



شکل ۴ نمودار برازش برای ضریب حجمی نفت سازند



شکل ۵ نمودار برازش برای دانسیته نفت



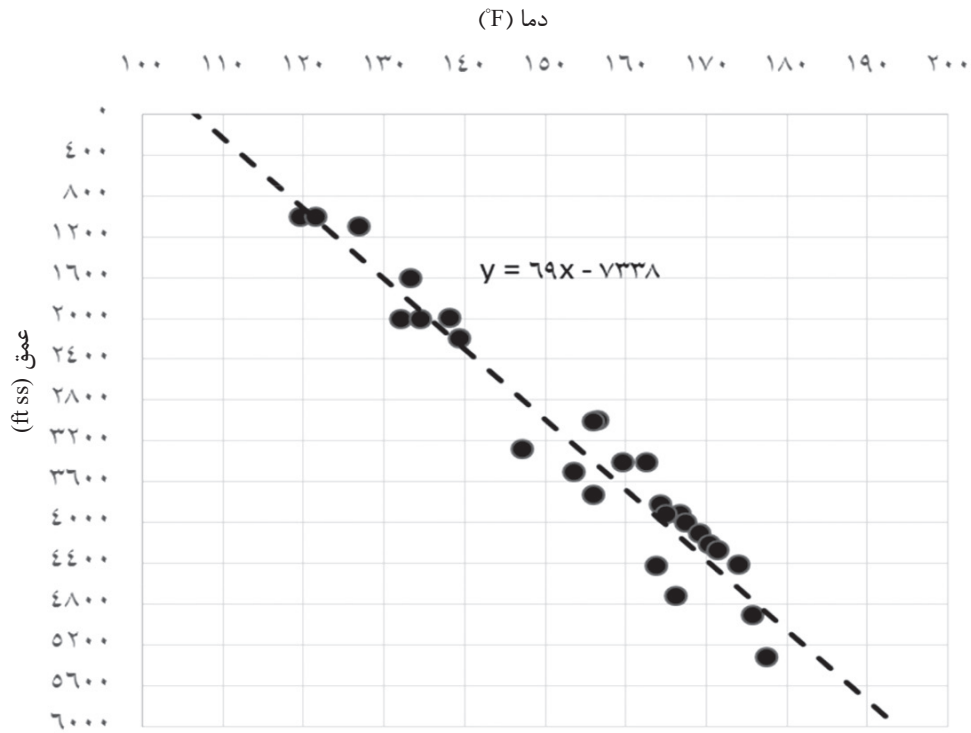
شکل ۶ نمودار برازش برای ویسکوزیته نفت

جدول ۲ مقایسه مقادیر پارامترهای محاسبه شده به روش های مختلف با مقادیر آزمایشگاهی

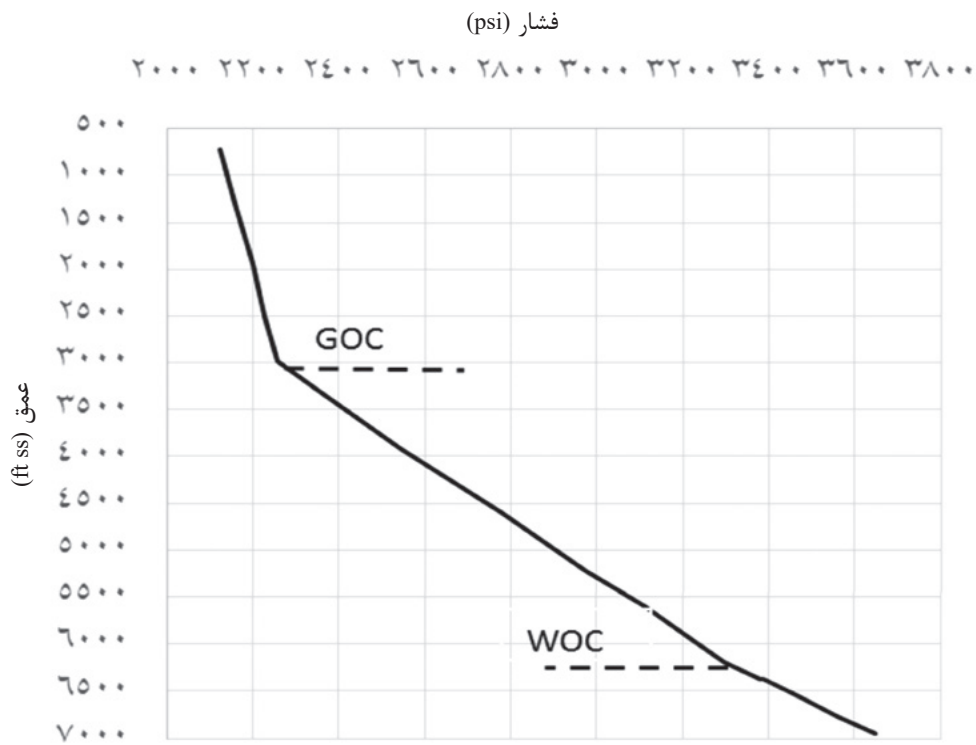
مقدار									پارامتر
مقدار محاسبه شده به روش ترکیب گروه بندی شده			مقدار محاسبه شده به روش ترکیب اولیه			آزمایشگاهی			
چاه - ۱	چاه - ۵	چاه - ۱۸	چاه - ۱	چاه - ۵	چاه - ۱۸	چاه - ۱	چاه - ۵	چاه - ۱۸	
۲۲۳۵/۰	۲۳۱۰/۴	-	۲۲۳۵/۰	۲۳۱۰/۷	۲۴۱۶/۳	۲۲۳۵/۰	۲۳۱۰/۴	۲۴۱۶/۳	(psi) $P_b$
۱/۳۲	۱/۳۱	-	۱/۳۴	۱/۳۱	۱/۳۶	۱/۳۲	۱/۳۱	۱/۳۶	(rb/stb) $B_o$
۵۵۲/۵	۵۴۰/۵	-	۵۸۵/۰	۵۵۶/۰	۶۳۳/۰	۵۶۱/۵	۵۵۰/۰	۶۳۰/۰	(scf/stb) GOR
۱/۱۵	۱/۲۱	-	۱/۱۶	۱/۲۰	۱/۰۶	۱/۱۶	۱/۲۰	۱/۰۶	(cp) $\mu_o$
۴۶/۹۳	۴۷/۳۴	-	۴۶/۸۶	۴۷/۰۸	۴۶/۱۵	۴۶/۹۳	۴۷/۰۸	۴۶/۱۵	(lb/ft <sup>3</sup> ) $\rho_o$

جدول ۳ پارامترهای عمق نمونه گیری (مبنا)

چاه - ۱۸	چاه - ۵	چاه - ۱	پارامتر
۱۹۷۰	۱۹۶۴	۱۹۶۵	تاریخ نمونه گیری (میلادی)
۵۰۹۵	۳۹۰۱	۴۹۵۰/۸	عمق نمونه گیری (ft ss)
۲۵۹۵/۵	۲۵۳۳/۲	۲۸۶۰/۱	فشار در عمق نمونه گیری (psi)
۱۵۷	۱۶۷	۱۶۳/۴	دما در عمق نمونه گیری (F)



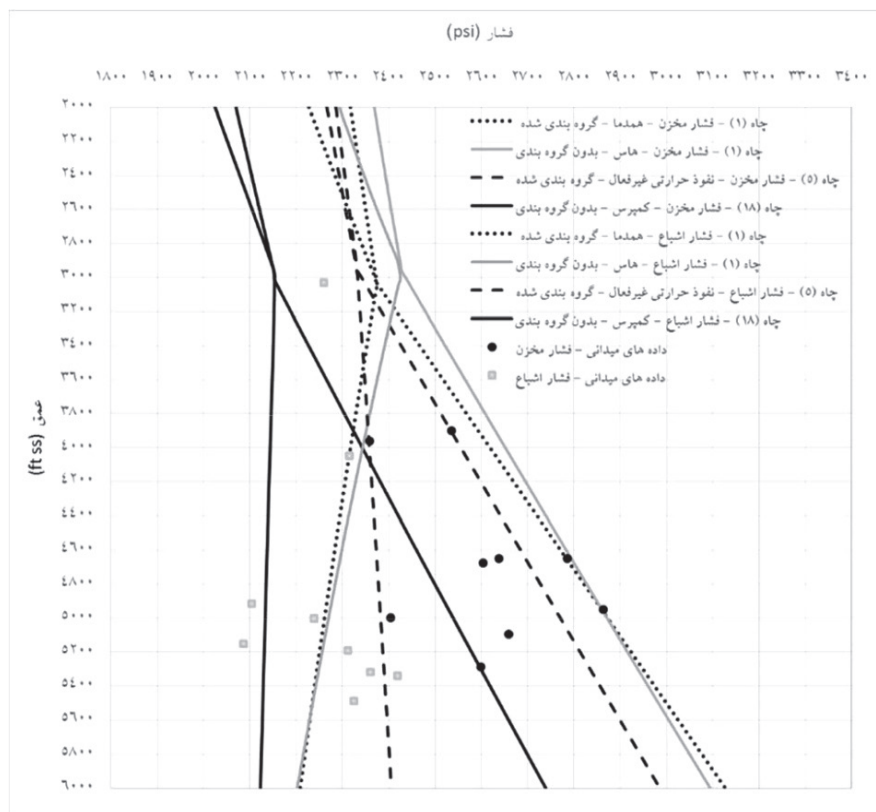
شکل ۷ دما در مقابل عمق



شکل ۸ نمودار آزمایش مکرر سازند در سازند مورد مطالعه

افزایش یافته است. مطابق شکل ۹ مدل هم‌دما با ترکیب سیال گروه‌بندی شده و مدل هاس برای چاه شماره ۱، مدل ضریب نفوذ حرارتی صفر با ترکیب سیال گروه‌بندی شده برای چاه شماره-۵ و مدل کمپرس برای چاه شماره-۱۸ بهترین مدل‌هایی هستند که تطابق بسیار نزدیکی با نمودار آزمایش مکرر سازند مطابق جدول ۴ دارند. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود چاه شماره ۵ نسبت به دو چاه دیگر عمق نمونه‌گیری نزدیک به سطح تماس گاز- نفت دارد، اما دقت محاسبه سطح تماس گاز- نفت براساس آزمایش مکرر سازند نسبت به دو چاه دیگر که سطح تماسشان از عمق مینا فاصله بیشتری دارند، کمتر است. مطابق شکل ۱۰ و شکل ۱۱ با توجه به عمق، ترکیب از نظر وجود اجزاء سنگین‌تر غنی شده و حاوی اجزاء کمتری مانند متان است. تغییرات ترکیب و دمای سیال با عمق باعث تغییر فشار اشباع با عمق می‌شود.

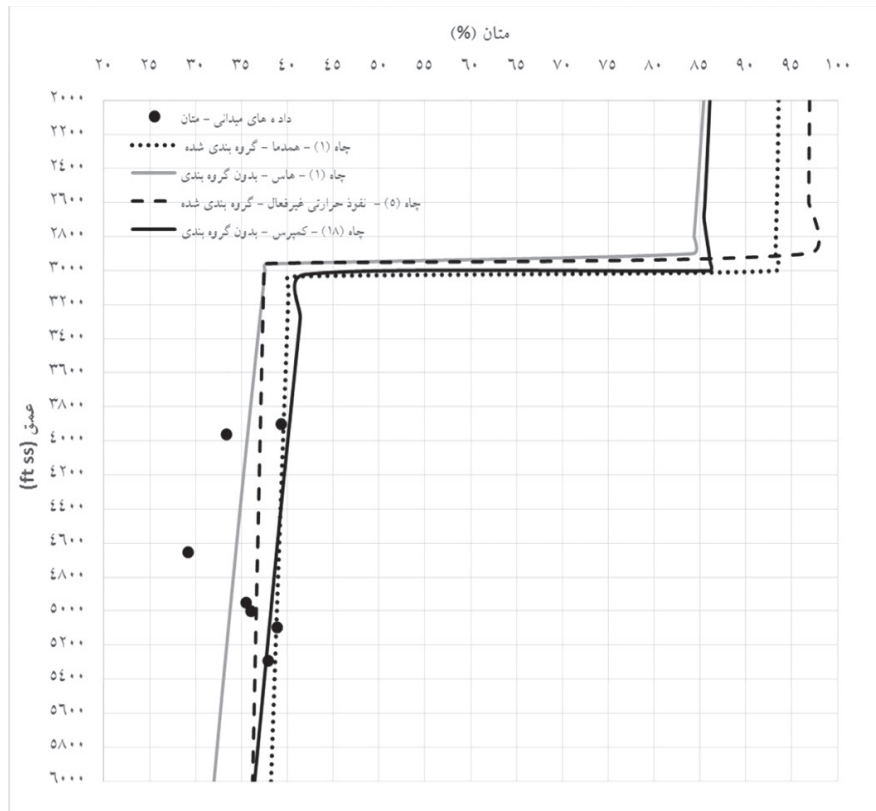
نتایج تمامی مدل‌های ترمودینامیکی در سه چاه مورد آنالیز که تطابق بسیار مطلوبی با داده‌های آزمایش مکرر سازند داشته آورده شده است. به‌طوری‌که از سایر مدل‌های که تطابقی با داده‌های آزمایش مکرر سازند نداشته‌اند پرهیز شده است. در شکل ۹ نمودارهای فشار مخزن و فشار اشباع پیش‌بینی شده توسط مدل‌های هم‌دما، غیرهم‌دما و داده‌های فشاری در سایر چاه‌های دیگر میدان جهت ارزیابی سطح تماس گاز- نفت در هر چاه رسم شده‌اند. به‌طور کلی فقط در سطح تماس گاز- نفت فشار نقطه حباب نفت برابر فشار نقطه شبنم است. در کلاهیگ گازی فشار نقطه شبنم با افزایش عمق تا سطح تماس گاز- نفت افزایش می‌یابد. در زیر سطح تماس گاز- نفت، فشار حباب نفت به خاطر تجمع پایین اجزاء سبک‌تر به سمت پایین ساختار مخزن کاهش می‌یابد. فشار استاتیک با یک شیب قابل توجه در ناحیه نفتی که ناشی از دانسیته قابل توجه‌تر نفت نسبت به فاز گاز است،



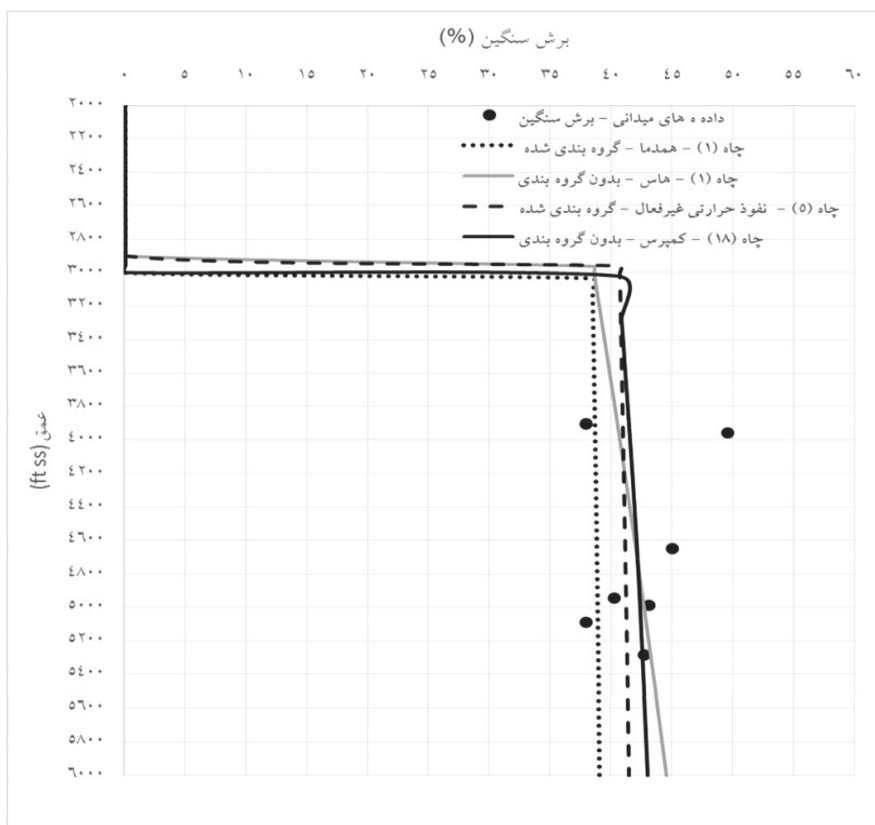
شکل ۹ مقایسه نمودارهای فشار و فشار اشباع محاسبه

جدول ۴ عمق سطح تماس گاز- نفت برای هر یک از مدل‌ها

مدل	نام چاه	عمق نمونه‌گیری (ft ss)	عمق سطح تماس گاز- نفت (ft ss)	سطح تماس گاز- نفت آزمایش مکرر سازند (ft ss)
ترمودینامیک تعادلی هم‌دما	چاه- ۱	۴۹۵۰/۸	۳۰۳۴	۳۰۳۵
هاس	چاه- ۱	۴۹۵۰/۸	۲۹۶۲	
نفوذ گرمایی غیرفعال	چاه- ۵	۳۹۰۱	۲۹۶۰	
کمپرس	چاه- ۱۸	۵۰۹۵	۳۰۲۲	



شکل ۱۰ مقایسه نمودارهای متان محاسبه شده

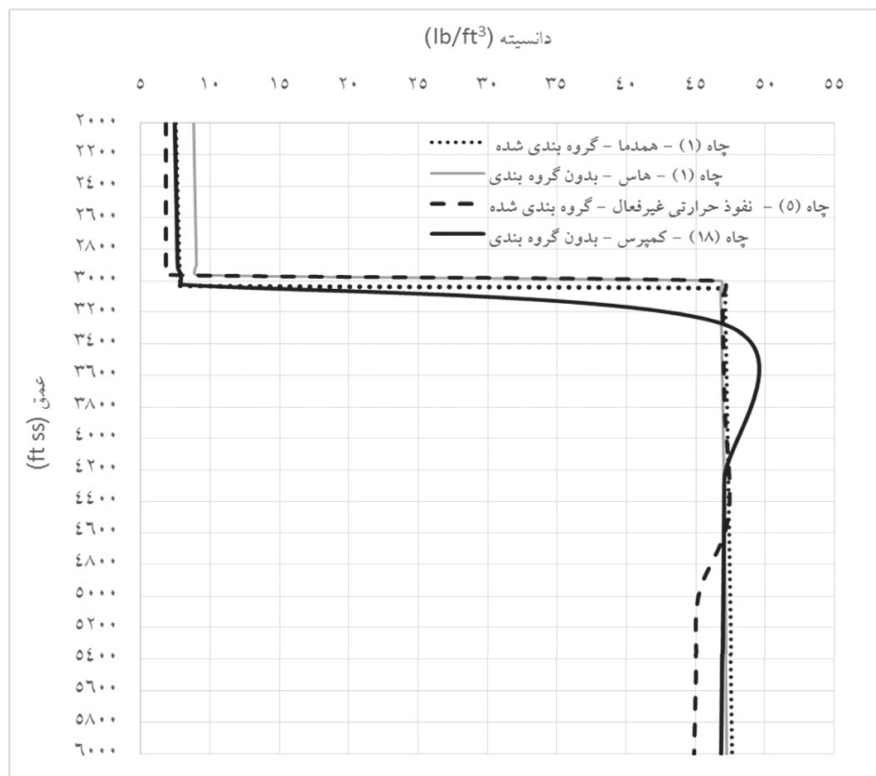


شکل ۱۱ مقایسه نمودارهای برش سنگین محاسبه

میزان تغییرات ترکیب از مخازن همگن کمتر است. شکل ۱۲ تمایلات دانسیته را پیرو ترکیب درصد متان و برش سنگین برای تغییر شدید در سطح تماس گاز-نفت برای هر سه چاه نشان می‌دهد. از این‌رو نمودارهای دانسیته چنین تقارن رفتاری مشابه‌ای را دارند.

به‌طور کلی، میزان فشار اشباع نفت با کاهش غلظت متان کاسته می‌شود. درحالی‌که نقطه شب‌نم با افزایش اجزاء سنگین زیاد می‌شود. با توجه به این دو شکل این نکته دریافت می‌شود که گرادیان ترکیبی نه تنها در مخازن معمولی بلکه در مخازن شکافدار هم رخ می‌دهد. اما در مخازن شکافدار به‌دلیل وجود پدیده همرفت





شکل ۱۲ مقایسه نمودارهای دانسیته محاسبه شده

هم‌گرایی می‌تواند با در نظر گرفتن پارامتر  $\lambda$  باشد، که دقت محاسبات بسیار پایین است و بدون در نظر گرفتن پارامتر  $\lambda$  و استفاده از حلگر غیرخطی که تجربه این پژوهش نشان می‌دهد دقت محاسبات بسیار بالا است.

\* تکنیک گرادیان ترکیبی قادر است مکملی برای روش‌های مرسوم مانند لاگ‌ها، لایه آزمایشی سازند و آنالیزهای سائیزمیک برای ارزیابی سطح تماس گاز- نفت باشد. لذا با استفاده مناسب از این ابزار می‌توان نتایج سایر بخش‌ها را ارزیابی کرد.

\* انتخاب نوع رابطه حالت، روابط ویسکوزیته، روابط تخمین خواص تأثیر قابل توجهی بر روی محاسبه عمق سطح تماس گاز- نفت دارد.

\* در شبیه‌سازی دینامیکی مخزن جهت بررسی اثر تغییر ترکیب بر حجم درجا و بازیافت نفت از مخزن، مدل سیالی به‌عنوان ورودی برای مدل دینامیک معتبرتر است که فرآیندی مانند پژوهش حاضر را طی کرده باشد و به سطح تماس گاز-

## نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش به‌کارگیری و استفاده از ابزار ترمودینامیکی گرادیان ترکیب در ارزیابی یا پیش‌بینی سطح تماس سیالات در مخازن نفتی است. همان‌طور که در این کار نشان داده شده است به نظر می‌رسد با رعایت ملاحظات مرتبط با این موضوع می‌توان از این ابزار جهت نیل به هدف تعیین شده استفاده کرد. در ذیل مهم‌ترین نتایج حاصل از این کار آورده شده است:

\* تخمین گرادیان ترکیبی می‌تواند به قابل اطمینان بودن نمونه‌های سیال گرفته شده از اعماق مختلف کمک نماید.

\* مشاهده شده که در مدل‌های غیرهم‌دمای تغییرات ترکیب با عمق بیشتر است نسبت به مدل هم‌دمای \* این پژوهش نشان می‌دهد یکی از عواملی که به شدت در محاسبه عمق سطح تماس گاز- نفت و تغییر ترکیب با عمق در نرم‌افزارهای تجاری تأثیرگذار است، کنترل هم‌گرایی است. این کنترل

نفی مضمن مطابق با روش‌های لایه آزمایشی سازند یا لاگ رسیده باشد.

### علائم و نشانه‌ها

$B_o$ : ضریب حجمی نفت سازند

$Q$ : تابعی برای حل مسأله (GCE)

$b_{o1}$ : ضریب در محاسبه  $(\lambda)$

$R_s$ : گاز محلول در نفت

$b_{11}$ : ضریب در محاسبه  $(\lambda)$

$r$ : فوگاسیته نسبی اصلاح شده

$f_i$ : فوگاسیته جزء (i)

$S$ : آنتروپی

$F_{Gi}$ : ترم گراویتی، جزء (i)

$U$ : انرژی داخلی

$F_{Ti}$ : فاکتور نفوذ حرارتی جزء (i)

$V_i$ : حجم مولی جزئی

$G$ : انرژی آزاد گیبس

$Y_i$ : عدد مولی جزء (i)

$H_i$ : آنتالپی مولی جزئی

$Z$ : ترکیب، کسر مولی جزء (i)

$h^T$ : ارتفاع بالای سازند

$\alpha$ : پارامتر شتاب‌دهنده در روش (GDEM)

$h^B$ : ارتفاع پایین سازند

$\mu_i$ : پتانسیل شیمیایی جزء (i)

$M$ : وزن ملکولی

$N$ : تعداد اجزاء

$n_i$ : تعدد مول‌های جزء (i)

$ft\ ss$ : فوت زیر سطح دریا

$rb/sib$ : بشکه نفت در شرایط مخزن/بشکه نفت در شرایط

استاندارد

### تشکر و قدردانی

از مسئولین محترم مرکز فناوری میصا جهت در اختیار قرار دادن نرم‌افزار بومی PVT PRO برای انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داریم.

### مراجع

- [1]. Adedoyin O., Eteobong E., Suleiman A., Keme B., Basak P., Amogu D. and Kachi O., "Integrated multi-disciplinary approaches to predict fluid contacts in a partially appraised field- A case study of yoko field in niger delta," In: SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2016.
- [2]. David O., Laoye A., Odegbesan S., Isimbabi O. and Obeahon P., "Oil rim De-Risking and appraisal value of Information in a gas reservoir," SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2016.
- [3]. John U., Ogunjobi A. and Lawoyin-Olajide N., "Data acquisition during field development: proposal for a niger delta gield," SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2016.
- [4]. Kakayor O. G., Oragui I., Esho M. and Anyaehie J., "Fast-Tracking field development in a green field by eliminating the need for appraisal using multidisciplinary evaluation methods," SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2016.
- [5]. Paredes J. E., Carbajal A., Izquierdo R., Loyo I., Pérez R., Perera L. M. and Larez, C. J., "Fluid contact monitoring using API tracking. A novel methodology for reservoir surveillance," SPE Europec featured at 79<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2017.
- [6]. Danesh A., "PVT and phase behaviour of petroleum reservoir fluids," Elsevier, 1998.

- [7]. Lars H and Whitson C. H., "Compositional grading-theory and practice," SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2000.
- [8]. Hoier L., "*Miscibility variations in compositionally grading petroleum reservoirs*," Norwegian University of Science and Technology, 1997.
- [9]. Fevang O., "*Accurate insitu compositions in petroleum reservoirs*," European Petroleum Conference. Society of Petroleum Engineers, 1994.
- [10]. Shukla K. and Firoozabadi A., "*A new model of thermal diffusion coefficients in binary hydrocarbon mixtures*," Journal of Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 37. No. 8, pp. 3331-3342, 1998.
- [11]. Firoozabadi A., Ghorayeb K. and Shukla K., "*Theoretical model of thermal diffusion factors in multicomponent mixtures*," AIChE Journal, Vol. 46. No. 5 , pp. 892-900, 2000.
- [12]. Luo S. and Barrufet M. A., "*Compositional gradient: its role in near-critical reservoir development*," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol 45. No. 3-4, pp. 193-201, 2004.
- [13]. Hirschberg A., "*Role of asphaltenes in compositional grading of a reservoir's fluid column*," Journal of Petroleum Technology, Vol. 40. NO. 01, pp. 89-94, 1988.
- [14]. Pedersen K. S. and Hjermstad H. P., "*Modeling of compositional variation with depth for five North Sea reservoirs*," SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [15]. Ortegon L. R. D. T., Al-Shammari N. A., Al-Qattan A., Al-Samhan A., Al-Enizi N. K., Duvivier G., ... and Ritchie S., "*Understanding and parameterization of greater burgan fluid spatial variation using an extensive PVT data base*," SPE International Heavy Oil Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2018.
- [16]. Sedaghat M. H., Daliri A. and Mohammadi H., "*Improvement of whitson algorithm for chemical/gravity equilibrium calculations to compute compositional gradient in petroleum reservoirs*," Egyptian Journal of Petroleum, Vol. 22, No. 2, pp. 305-311, 2013.
- [17]. Eytayo S. I., Lawal K. A., Ukaonu C. E., Ovuru M. I., Sanyaolu A. A., Otubanjo M. A., ... and Matemilola, S., "*Using compositional-grading simulations to assess gas-oil contacts: practical cases from the niger delta*," SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2017.
- [18]. Firoozabadi A., "*Thermodynamics of hydrocarbon reservoirs*," McGraw-Hill, 1999.
- [19]. Whitson C. H. and Brulé M. R., "*Phase behavior*," Richardson, TX: Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers, Vol. 20, 2000.
- [20]. Whitson C. H. and Belery P., "*Compositional gradients in petroleum reservoirs*," University of Tulsa centennial petroleum engineering symposium. Society of Petroleum Engineers, 1994.