تصحیح نتایج آزمایش تخلیه در حجم ثابت با استفاده از نتایج آزمایشگاهی معتبر

امین کردی[1]، دکتر محمد جمشید نژاد[2]، دکتر عباس شهرآبادی ■ دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر

چکیده

از آزمایش تخلیه در حجم ثابت[3] که بر روی میعانات گازی و نفت‌خام سبک و به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد تخلیه مخزن و تغییرات ترکیبی سیالات آن انجام می‌شود، اطلاعات مهم و قابل استفاده‌ای برای محاسبات مهندسی مخزن به‌دست می‌آید. در این آزمایش بروز اندکی خطا در تشخیص میزان مایع تشکیل شده در هر مرحله، که به علت خطای فردی و تفکیک‌پذیری پایین فازها در مراحل اولیه آزمایش اتفاق می‌افتد، موجب اختلاف نسبتاً زیادی میان نتایج نهایی آزمایش و مقادیر واقعی می‌گردد. با استفاده از معادلات موازنه ماده برای هر یک از اجزای ترکیب مورد آزمایش در هر مرحله و استفاده از نتایج آزمایشگاهی مورد اطمینان، می‌توان مجموعه‌ای در حدود چند صد هزار تا چند میلیون معادله تشکیل داد و با حل و تصحیح آن‌ها، داده‌های آزمایش تخلیه در حجم ثابت را تصحیح نمود. این روش، محاسبه معکوس[4] نام‌گذاری شده و روشی نوین است که تاکنون ارایه نگردیده است. از آن‌جا که دست‌یابی به این هدف بدون بهره‌گیری از برنامه‌های رایانه‌ای تقریباً غیر ممکن است، بنابراین یک نرم‌افزار کامپیوتری[5] با استفاده از زبان برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک نت[6] تهیه شده که علاوه بر انجام محاسبات رایج در آزمایش تخلیه در حجم ثابت، به تصحیح این نتایج نیز می‌پردازد.

واژه‌های کلیدی تخلیه در حجم ثابت، محاسبه معکوس، مخازن گاز – میعانی

◆ مقدمه

مخازن گاز– میعانی[7] عموماً در عمق بیش‌تر و در دما و فشاری بالاتر از مخازن نفتی یافت می‌شوند. در سرتاسر جهان مخازن عظیمی از این نوع در حال بهره‌برداری است که از آن جمله می‌توان به میدان پارس جنوبی در حاشیه جنوبی ایران و به‌صورت مشترک با کشور قطر اشاره کرد که حدود نیمی از ذخیره گاز ایران را به عنوان دومین کشور دارنده گاز جهان در خود جای داده است.

این مخازن در ابتدای بازه زمانی تولید مانند مخازن گازی تک‌فاز رفتار می‌کنند، اما با گذشت زمان و ادامه برداشت از مخزن، فشار کاهش یافته و اجزای سنگین‌تر از فاز گازی جدا شده و تجمعی از میعانات گرانبهای میانی[8] را تشکیل می‌دهند که شامل مولکول‌هایی هستند که تعداد اتم کربن آن‌ها بین ۲ تا ۶ است.

تجمع میعانی شکل‌گرفته در دیواره‌های چاه دو ضرر عمده را موجب می‌گردد: اول آن‌که حجم نسبتاً زیادی از میعانات بسیار ارزشمند در درون مخزن باقی مانده و امکان برداشت نمی‌یابند. دوم این‌که توده میعانی با تنگ‌تر کردن مسیر جریان گاز، به‌ویژه گلوگاه‌های رابط میان منافذ سنگ، منجر به کاهش نفوذپذیری مؤثر گاز و در نتیجه افت شدید قابلیت تولید از چاه می‌گردد.

در خلال آزمایش‌هایی با عنوان تخلیه با حجم ثابت و انبساط با ترکیب ثابت[9] که در آزمایشگاه بر روی سیال مخزن انجام می‌گیرد، درصد میعانات حاصل از افت تدریجی فشار سیال تعیین می‌گردد.

بروز اندکی خطا در انجام این آزمایش‌ها موجب افت زیادی در بهره‌وری تولید از چاه می‌گردد. یکی از دلایلی که باعث ایجاد خطا در این آزمایش‌ها می‌شود، عدم توانایی تشخیص میزان مایع تشکیل شده در هر مرحله است که عمده‌ترین علت آن خطای فردی در تشخیص مرز بین فاز مایع و فاز گاز می‌باشد. میزان این خطا در مراحل اولیه که فشار بالاتر و میزان مایع تشکیل شده کم‌تر است و فاز مایع و گاز به‌صورت تفکیک شده نیستند (نزدیک به نقطه بحرانی[10])، به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد.

تاکنون برای اصلاح نتایج آزمایش انبساط با ترکیب ثابت روش‌هایی ارایه شده است، اما برای تصحیح نتایج آزمایش تخلیه با

[1] aminkorvy@yahoo.com
[2] gmshidngd.m@gmail.com
[3] Constant Volume Depletion
[4] Backward Calculation Method
[5] CVD test Corrector
[6] Microsoft Visual Basic.NET
[7] Gas-Condensate Reservoir
[8] Intermediate Components
[9] Constant Composition Expansion (CCE)
[10] Critical point

حجم ثابت روشی ارایه نشده است. اگرچه در نرم افزارهای PVT بخش‌هایی وجود دارند که موازنه مواد را در آزمایش CVD مورد بررسی قرار می‌دهند، اما این نرم‌افزارها عملیات یاد شده را با فرض صحیح بودن میزان مایع تشکیل شده در هر مرحله انجام می دهند. این در حالیست که یکی از مهم‌ترین عوامل خطا در آزمایش CVD، میزان مایع تشکیل شده در هر مرحله است. در این مقاله به ارایه روشی جدید به نام روش محاسبه معکوس پرداخته می‌شود که می‌تواند در آزمایش تخلیه در حجم ثابت، در تصحیح میزان مایع تشکیل شده در هر مرحله مورد استفاده قرار گیرد.

۱- محاسبات اولیه

ابتدا محاسبات اولیه آزمایش تخلیه در حجم ثابت انجام می‌شود [۱]. در این روش از معادلات ۱، ۲ و ۳ استفاده می گردد:

$$P_j.V_j=z_{gj}.n_{gj}.R.T \quad (۱)$$

$$x_{ij}=[n_{in}y_{i,in}-\sum_j n_{gj}y_{ij}-(V-V_{oj})\rho_{gj}y_i/M_{gj}]/[n_{in}-\sum_j n_{gj}-(V-V_{oj})\rho_{gj}/M_{gj}] \quad (۲)$$

$$\rho_{oj}=[m_{in}-\sum_j m_{gj}-\rho_{gj}(V-V_{oj})]/V_{oj} \quad (۳)$$

در این معادلات، P فشار بر حسب Mpa، V حجم بر حسب m^3، n تعداد مول، R ثابت گازها و برابر ۰/۰۰۸۳۱۴۴ $MPa.m^3/mole.k$، T دما بر حسب K، x درصد مولی در فاز مایع، y درصد مولی در فاز گاز، ρ چگالی بر حسب $kg./m^3$، M جرم مولکولی، m جرم بر حسب kg، زیرنویس i نماینده هر جزء از ترکیب، زیرنویس j نماینده هر مرحله، زیرنویس o بیانگر خصوصیات مایع، زیرنویس g بیانگر خصوصیات گاز و زیرنویس in بیانگر خصوصیات سیال اولیه می‌باشند.

با استفاده از معادله ۱ و نتایج اولیه آزمایش تخلیه در حجم ثابت، درصد مولی هر جزء از ترکیب در فاز گاز و چگالی فاز گاز در هر مرحله محاسبه می‌شود و درصد مولی هر جزء از ترکیب در فاز مایع و چگالی فاز مایع نیز با استفاده از معادلات ۲ و ۳ قابل محاسبه‌اند. جداول ۱ و ۲ نتایج اولیه یک آزمایش تخلیه در حجم ثابت را نشان می‌دهند. جدول ۳ نیز مقدار محاسبه شده درصد مولی هر جزء در فاز مایع در هر مرحله را با استفاده از معادلات ۱ تا ۳ نشان می‌دهد.

[۱۱] خطای محاسباتی به خطایی اطلاق می‌شود که در اثر خطا در انجام محاسبات روی می‌دهد.

جدول ۱ | درصد مولی اجزاء در گاز خروجی

دمای مخزن = ۴۱۰/۹۳ کلوین	فشار مخزن بر حسب مگاپاسکال					
اجزاء	۴/۹۳	۹/۰۷	۱۳/۸۹	۱۹/۴۱	۲۴/۲۴	۲۹/۷۵	۳۴/۳۶ (D.P)
دی اکسید کربن	۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۰۲	۱/۰۱	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۲
نیتروژن	۰/۳۱	۰/۳۷	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۳۱
متان	۶۹/۷۴	۷۲/۴۸	۷۳/۴۴	۷۳/۲۴	۷۱/۹۶	۶۹/۱۴	۶۳/۷۱
اتان	۱۳/۳۷	۱۲/۶۷	۱۲/۲۵	۱۱/۹۲	۱۱/۸۷	۱۱/۸۲	۱۱/۶۳
پروپان	۶/۸	۵/۹۸	۵/۶۵	۵/۵۴	۵/۵۹	۵/۷۷	۵/۹۷
ایزو بوتان	۱/۳۲	۱/۱۳	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۷	۱/۱۴	۱/۲۱
بوتان نرمال	۲/۲۴	۱/۸۸	۱/۷۶	۱/۷۹	۱/۸۶	۱/۹۹	۲/۱۴
ایزو پنتان	۰/۹۲	۰/۷۷	۰/۷۲	۰/۷۳	۰/۷۹	۰/۸۸	۰/۹۹
پنتان نرمال	۰/۶۸	۰/۵۶	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۵۹	۰/۶۸	۰/۷۷
هگزانها	۰/۰۷	۰/۹۱	۰/۹	۰/۹۸	۱/۱۲	۱/۳۴	۱/۶
هگزان پلاس	۲/۵۲	۲/۲۲	۲/۳	۲/۸۲	۳/۷۹	۵/۹۳	۱۰/۷۵
کل	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۲ | اطلاعات ورودی و محاسبات اولیه

فشار	[مگاپاسکال]	۲۹/۷۵	۲۴/۲۴	۱۹/۴۱	۱۳/۸۹	۹/۰۷	۴/۹۳
وزن مولکولی (M_w)	[کیلوگرم / کیلو مول]	۳۲/۲۹۲۳۷۹	۲۶/۸۲۲۷۴۴	۲۵/۲۶۱۶۴۵	۲۴/۵۳۴۰۶۰	۲۴/۶۵۵۸۵۸	۲۵/۷۱۵۵۳
ضریب تراکم گاز (Z)		۰/۹۲۷	۰/۸۷۴	۰/۸۶۲	۰/۸۷۹	۰/۹۰۸	۰/۹۴۶
نسبت حجم مایع تشکیل شده به حجم کل $(۱۰۰\times(V_o/V))$		۳۱/۱	۳۴/۴	۳۴/۱	۳۲/۵	۳۰/۲	۲۷/۳
کل مول‌های موجود در ظرف نمونه (n)	[مول]	۹۲/۹۷۹	۸۲/۰۴۳	۶۹/۷۳۲	۵۳/۵۷۸	۳۸/۲۵۵	۲۴/۸۲۸
کل مول‌های گاز تولید شده (n_p)	[مول]	۷/۰۲۱	۱۷/۹۵۷	۳۰/۲۶۸	۴۶/۴۲۲	۶۱/۷۴۵	۷۵/۱۷۲
مول‌های گاز خارج شده در هر مرحله (n_g)	[مول]	۷/۰۲۱	۱۰/۹۳۶	۱۲/۳۱۱	۱۶/۱۵۴	۱۵/۳۲۳	۱۳/۴۲۷
جرم کل سیال موجود در ظرف نمونه (m)	[کیلوگرم]	۲۸۱۶/۵۵۵۱	۲۵۲۳/۲۲۱۶	۲۲۱۲/۲۲۵۵	۱۸۱۵/۹۰۲۳	۱۴۳۸/۱۰۰۶	۱۰۹۲/۸۱۸
جرم گاز تولید شده در هر مرحله (m_p)	[کیلوگرم]	۲۱۲/۶۸۲۸۰	۲۹۳/۳۳۳۵۳	۳۱۰/۹۹۶۱۱	۳۹۶/۳۲۳۲۰	۳۷۷/۸۰۱۷۲	۳۴۵/۲۸۲۵
جرم گاز داخل ظرف نمونه (m_g)	[کیلوگرم]	۱۹۴۰/۶۰۶۵	۱۴۱۳/۸۵۸۲	۱۰۸۶/۰۳۲۸	۷۵۸/۱۶۵۸۰	۴۹۸/۰۵۱۹۳	۲۸۲/۲۶۹۱
جرم مایع تشکیل شده در ظرف نمونه (m_o)	[کیلوگرم]	۸۷۵/۹۴۸۶۴	۱۱۰۹/۳۶۳۴	۱۱۲۶/۱۹۲۷	۱۰۵۷/۷۳۶۵	۹۴۰/۰۴۸۶۴	۸۱۰/۵۴۹۰
حجم گاز درون ظرف نمونه (V_g)	[متر مکعب]	۶/۸۲۰۱۷۶۶	۶/۴۹۳۵۲۰۹	۶/۵۲۳۲۱۶۸	۶/۶۸۱۵۹۵۳	۶/۹۰۹۲۶۴۵	۷/۱۹۶۳۲۶
حجم مایع تشکیل شده در ظرف نمونه (V_o)	[متر مکعب]	۳/۰۷۸۴۸۳۲	۳/۴۰۵۱۳۹۰	۳/۳۷۵۴۴۳۰	۳/۲۱۷۰۶۴۴	۲/۹۸۹۳۹۵۳	۲/۷۰۲۳۳۴
چگالی گاز (ρ_g)	[کیلوگرم / متر مکعب]	۲۸۴/۵۳۹۰۴	۲۱۷/۷۳۳۶۹	۱۶۶/۴۸۷۳۱	۱۱۳/۴۷۰۷۸	۷۲/۰۸۴۶۵۲	۳۹/۲۲۴۰۷
چگالی مایع (ρ_o)	[کیلوگرم / متر مکعب]	۲۸۴/۵۳۹۲۰	۳۲۵/۷۹۰۹۲	۳۳۳/۶۴۲۹۳	۳۲۸/۷۸۹۳۴	۳۱۴/۴۶۱۱۴	۲۹۹/۹۴۴۰

جدول ۳ | درصد مولی محاسبه شده هر جزء در فاز مایع در هر مرحله

فشار مخزن بر حسب مگاپاسکال						
اجزاء	۲۹/۷۵	۲۴/۲۴	۱۹/۴۱	۱۳/۸۹	۹/۰۷	۴/۳۹
دی اکسید کربن	۰/۷۹۷۰۸۸۱۵۵	۰/۷۵۶۱۳۹	۰/۶۹۲۱۱۵۱۵۳	۰/۶۱۴۳۷۳۰۶۴	۰/۴۹۰۸۹۰۷	۰/۳۲۷۲۸۸۳۷۳
نیتروژن	۰/۲۳۶۲۵۲۸۹۳	۰/۱۷۲۶۲۵	۰/۱۱۲۱۳۷۰۲۷	۰/۰۶۲۳۲۲۲۳۶	۰/۰۱۷۸۱۳۸۳۴	۰/۰۱۶۶۴۵۵۴۳
متان	۵۰/۵۰۳۶۱۷۷۳۶۵	۴۴/۵۰۸۵۷	۳۹/۲۰۱۳۱۲۹	۳۲/۶۸۳۸۷۱۴	۲۴/۱۴۲۴۵۵۲۸	۱۴/۳۰۰۹۳۷۷۶
اتان	۱۱/۱۶۲۹۳۴۹۹	۱۱/۰۶۳۷۴	۱۰/۸۸۲۲۱۲۰	۱۰/۰۱۱۳۳۵۱۳	۸/۶۱۲۰۶۵۳۴۷	۶/۱۴۷۳۴۲۴۸۸
پروپان	۶/۴۶۱۶۴۷۳۷۹	۶/۸۴۲۴۳۵	۷/۰۶۷۲۰۳۱۸	۷/۱۱۲۷۲۲۸۱۱	۶/۸۳۷۷۸۰۹۳۳	۵/۶۵۳۴۰۱۸۴۲
ایزو بوتان	۱/۳۸۲۰۷۶۵۸۳	۱/۵۳۰۵۴۲	۱/۶۳۷۲۱۱۸۸۴	۷۴۴۲۷۸۹۹۳	۱/۷۴۷۴۴۰۵۸۷	۱/۶۰۰۰۶۹۱۵۸
بوتان نرمال	۲/۲۰۸۷۳۵۵۳۴	۲/۷۸۳۴۷۷	۳/۰۱۷۷۳۰۳۹۳	۳/۳۰۰۰۹۲۵۰۱	۳/۴۵۸۱۲۸۴۶۹	۳/۳۰۲۷۸۶۴۱۵
ایزو پنتان	۱/۲۶۰۴۰۶۰۵۹	۱/۴۵۰۳۱	۱/۶۳۸۳۸۱۴۸۱	۱/۸۲۱۹۸۶۷۸	۲/۰۰۵۶۲۹۴۴۹	۲/۱۱۶۳۳۱۰۳۶
پنتان نرمال	۰/۹۹۱۲۴۱۳۲۱	۱/۱۸۲۱۲۵	۱/۳۴۲۹۰۷۸۸۷	۱/۵۰۷۶۰۴۰۶۳	۱/۶۹۸۷۶۵۱۹۶	۱/۸۳۲۹۲۶۰۳۸
هگزانها	۲/۲۳۹۱۴۱۵۹۳	۲/۷۰۳۷۸۷	۳/۱۴۶۷۹۲۹۰۵	۳/۷۰۱۲۶۹۷۳۶	۴/۳۹۸۴۹۰۰۲۲	۵/۱۷۵۲۴۴۱۶۴
هگزان پلاس	۲۲/۵۹۸۷۰۱۸۴	۲۷/۰۰۶۲۵	۳۱/۲۶۱۹۹۵۰۷	۳۷/۴۴۰۱۴۳۲۹	۴۶/۵۹۰۵۴۰۱۸	۵۹/۵۲۷۰۲۷۱۸
کل	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۴ | مقادیر y_{iR}، y'_{iR}، y''_{iR}، خطای هر جزء و خطای کل

	قبل از اصلاح		y''_{iR}	بعد از اصلاح	
اجزاء	تابع Difference	y''_{iR}	مقدار آزمایشگاهی	y''_{iR}	تابع Difference
دی اکسید کربن	$۱/۶۸۷۹۸ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۹۱۶۲۲۰۱۷۸	۰/۹۲	۰/۹۲۰۰۰۰۶۸۸	$۵/۵۹۷۴۳ \times ۱۰^{-۱۳}$
نیتروژن	$۲/۲۴۶۵۱ \times ۱۰^{-۶}$	۰/۳۱۰۴۶۴۶۳۹	۰/۳۱	۰/۳۱۱۹۶۶۴۸۶	$۴/۰۲۴ \times ۱۰^{-۵}$
متان	$۲/۳۱۰۶ \times ۱۰^{-۵}$	۶۳/۴۰۳۷۵۴۱۶	۶۳/۷۱	۶۳/۷۰۲۳۱۰۸۸	$۱/۴۵۶۵۹ \times ۱۰^{-۸}$
اتان	$۱/۱۷۱۱۹ \times ۱۰^{-۶}$	۱۱/۵۹۰۱۹۹۰۴	۱۱/۶۳	۱۱/۶۲۹۰۹۱۶۹	$۶/۰۹۹۷۵ \times ۱۰^{-۹}$
پروپان	$۱/۰۱۴۰۴ \times ۱۰^{-۶}$	۵/۹۶۳۹۸۸۲۳۷	۵/۹۷	۵/۹۷۰۱۵۰۹۸۶	$۶/۳۹۶۲۷ \times ۱۰^{-۱۰}$
ایزو بوتان	$۱/۲۹۲۳۸ \times ۱۰^{-۶}$	۱/۲۱۱۳۷۵۵۶۱	۱/۲۱	۱/۲۰۹۸۷۳۷۱۴	$۱/۰۸۹۲۸ \times ۱۰^{-۸}$
بوتان نرمال	$۵/۸۰۱۸ \times ۱۰^{-۶}$	۲/۱۴۵۱۵۴۶۰۳	۲/۱۴	۲/۱۳۹۴۵۷۹۴۴	$۶/۴۱۵۹۶ \times ۱۰^{-۸}$
ایزو پنتان	$۵/۶۳۸۵ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۹۹۷۴۳۳۹۰۳	۰/۹۹	۰/۹۹۰۹۶۰۴۲۷	$۹/۴۱۱۴۹ \times ۱۰^{-۷}$
پنتان نرمال	$۷/۱۷۰۸ \times ۱۰^{-۵}$	۰/۷۷۶۵۲۰۴۰۳	۰/۷۷	۰/۷۷۰۳۰۵۸۶۶	$۱/۵۷۷۹ \times ۱۰^{-۷}$
هگزانها	$۲/۰۳۴۳۷ \times ۱۰^{-۴}$	۱/۶۲۲۸۲۰۹۹	۱/۶	۱/۶۰۰۷۰۷۵۹۶	$۱/۹۵۵۸۳ \times ۱۰^{-۷}$
هگزان پلاس	$۸/۴۲۷۱۸ \times ۱۰^{-۴}$	۱۱/۰۶۲۰۶۸۲۸	۱۰/۷۵	۱۰/۷۵۵۱۷۳۷۳	$۲/۳۱۶۲۷ \times ۱۰^{-۷}$
کل	$۱/۲۳۶۳ \times ۱۰^{-۳}$	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	$۴/۱۸۶۲۵ \times ۱۰^{-۵}$

۲- برقراری موازنه ماده برای هر جزء (محاسبه معکوس)

محاسبه معکوس به این معناست که به مقدار مول محاسبه شده هر جزء در فاز مایع باقیمانده در مرحله آخر، مقدار مول همان جزء در فاز گاز موجود در آخرین مرحله و مجموع مول‌های خروجی آن جزء در تمامی مراحل اضافه شوند [۲]. برقراری این موازنه با استفاده از معادله ۴ امکان‌پذیر است. در صورتی که خطای محاسباتی[11] آزمایش صفر باشد، مقدار به‌دست آمده برای هر جزء برابر با مقدار آن در ترکیب سیال مخزن اولیه است و معادله ۵ نیز برقرار خواهد بود.

$$y'_{iR} = \frac{x_{ik}.n_{ok}}{100} + n_{(ik)_g} + \sum_j n_{(ij)_p} \qquad (۴)$$

$$y'_{iR} = y_{iR} \qquad (۵)$$

در این معادلات، y'_{iR} درصد مولی جزء i در ترکیب اولیه مخزن می‌باشد که از طریق محاسبه معکوس به‌دست آمده است (قبل از تصحیح) و y_{iR} نیز درصد مولی مورد اطمینان جزء i در ترکیب اولیه مخزن است. زیرنویس k شماره آخرین مرحله آزمایش و زیرنویس p خصوصیات گاز تولیدی[12] (خروجی) را نشان می‌دهد.

۳- تعریف تابع خطا

با استفاده از یک روش مورد اطمینان آزمایشگاهی (مانند کروماتوگرافی)، درصد مولی اجزاء در فاز مایع باقیمانده تعیین می‌شوند. با جایگزینی این مقادیر صحیح به‌جای مقادیر محاسبه شده در آزمایش و به‌کار بردن روش محاسبه معکوس بر اساس این مقادیر، می‌توان معادله ۶ را برای هر جزء تشکیل داد. در صورتی که خطای آزمایشگاهی[13] صفر باشد، مقدار به‌دست آمده برای هر جزء برابر با مقدار آن در ترکیب سیال مخزن اولیه است و معادله ۷ نیز برقرار خواهد بود.

$$y''_{iR} = \frac{x''_{ik}.n_{ok}}{100} + n_{(ik)_g} + \sum_j n_{(ij)_p} \qquad (۶)$$

$$y''_{iR} = y_{iR} \qquad (۷)$$

در این معادلات، y''_{iR} درصد مولی جزء i در ترکیب اولیه مخزن می‌باشد که از طریق محاسبه معکوس به‌دست آمده است (بعد از تصحیح) و x''_{ik} درصد مولی مورد اطمینان جزء i در فاز مایع باقیمانده می‌باشد که از طریق سایر روش‌های آزمایشگاهی مانند

[12] Produce gas

[۱۳] منظور از خطای آزمایشگاهی، خطاهای فردی یا دستگاهی است که در حین انجام آزمایش بروز می‌کند.

جدول ۵ | مقادیر اصلاح شده درصد مولی هر جزء در فاز مایع در هر مرحله

	فشار مخزن بر حسب مگاپاسکال					
اجزاء	۲۹/۷۵	۲۴/۲۴	۱۹/۴۱	۱۳/۸۹	۹/۰۷	۴/۹۳
دی اکسید کربن	۰/۷۷۵۶۵۳۸۵۳	۰/۷۳۱۸۸۶	۰/۶۶۳۰۸۵۵۶۹	۰/۵۸۴۱۹۲۷۱	۰/۴۵۹۵۲۶۴۶۵	۰/۲۹۹۹۹۴۸۳۸
نیتروژن	۰/۲۲۳۳۹۲۳۰۱	۰/۱۵۲۱۵۶	۰/۰۸۶۷۶۲۲۸۴	۰/۰۳۷۹۴۱۶۲۹	−۰/۰۰۲۶۷۵۶۰۹	۰/۰۰۵۲۵۱۵۶۶
متان	۴۸/۰۳۴۰۰۶۵۳	۴۱/۶۶۱۶۶	۳۶/۰۹۲۸۶۳۷	۲۹/۶۵۱۴۴۳۶۲	۲۱/۳۳۰۲۷۹۵	۱۲/۱۴۷۶۶۷۵۸
اتان	۱۱/۰۸۱۴۸۴۵۷	۱۰/۹۸۰۱۳	۱۰/۷۸۷۴۴۰۱۵	۹/۸۴۴۷۶۹۰۲۳	۸/۳۷۵۹۸۳۳۱۹	۵/۸۶۶۸۱۲۲۵۴
پروپان	۶/۵۴۷۳۸۴۶۵۸	۶/۹۷۲۳۲۱	۷/۲۰۶۶۶۹۰۰۷	۷/۲۲۱۵۵۵۵۵۴	۶/۸۸۷۶۸۴۸۰۸	۵/۶۰۸۸۶۷۶۱۸
ایزو بوتان	۱/۴۱۲۰۸۴۶۳	۱/۵۷۸۳۰۳	۱/۶۹۱۷۴۹۹۱۲	۱/۷۹۶۶۸۰۳۱۹	۱/۷۸۳۳۶۱۹۷	۱/۶۱۰۹۴۷۱۳
بوتان نرمال	۲/۵۷۳۰۳۸۴۹۴	۲/۸۷۹۲۴۸	۳/۱۲۹۸۴۸۰۴۴	۳/۴۱۴۶۸۱۸۷۵	۳/۵۴۹۹۴۰۶۳۵	۳/۳۴۴۰۶۵۳۶۵
ایزو پنتان	۱/۳۰۷۵۶۱۶۵۲	۱/۵۱۸۷۸۹	۱/۷۲۱۳۳۵۸۴۹	۱/۹۰۳۹۷۹۲۴۲	۲/۰۷۷۵۱۵۷۴۸	۲/۱۶۲۷۹۶۹
پنتان نرمال	۱/۰۲۹۸۲۳۰۹۶	۱/۲۴۳۵۳۲	۱/۴۱۶۲۳۰۲۹۳	۱/۵۸۰۳۴۱۹۲۷	۱/۷۶۵۰۱۶۱۳۹	۱/۸۷۷۷۰۶۰۳۹
هگزانها	۲/۳۵۰۶۰۰۰۵۶	۲/۸۶۸۰۳۷	۳/۳۴۴۶۶۶۷۴۸	۳/۹۰۹۶۹۶۰۱۴	۴/۶۰۱۴۴۲۹۶۹	۵/۳۳۴۶۹۳۱۰۷
هگزان پلاس	۲۴/۶۶۴۹۷۰۲۶	۲۹/۴۱۳۹۳	۳۳/۸۵۹۳۴۸۴۵	۴۰/۰۵۴۷۱۸۰۹	۴۹/۱۷۱۹۲۴۰۶	۶۱/۷۴۱۱۹۷۶۱
کل	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۶ | مقادیر درصد مولی اجزاء در فاز مایع باقیمانده در آخرین مرحله، قبل از اصلاح و بعد از اصلاح

	x_{ik}		
اجزاء	قبل از تصحیح	مقدار آزمایشگاهی	بعد از تصحیح
دی اکسید کربن	۰/۲۸۱۸۹۸۶۸۹	۰/۳	۰/۲۹۹۹۹۴۸۳۸
نیتروژن	−۰/۰۰۲۳۰۲۸۶۴	۰/۰۲	۰/۰۰۵۲۵۱۵۶۶
متان	۱۰/۷۲۰۰۰۷۲۵	۱۲/۰۹	۱۲/۱۴۷۶۶۷۵۸
اتان	۵/۶۸۰۸۱۵۲۱۲	۵/۸۶	۵/۸۶۶۸۱۲۲۵۴
پروپان	۵/۵۷۹۳۴۰۵۵۵	۵/۶۱	۵/۶۰۸۸۶۷۶۱۸
ایزو بوتان	۱/۶۱۸۱۵۹۴۳۸	۱/۶۱	۱/۶۱۰۹۴۷۱۳
بوتان نرمال	۳/۳۷۱۴۳۴۱۱۸	۳/۳۴	۳/۳۴۴۰۶۵۳۶۵
ایزو پنتان	۲/۱۹۳۶۰۴۶۷۹	۲/۱۷	۲/۱۶۲۷۹۶۹
پنتان نرمال	۱/۹۰۷۳۹۶۰۵۷	۱/۸۸	۱/۸۷۷۷۰۶۰۳۹
هگزان‌ها	۵/۴۴۰۴۱۰۸۸	۵/۳۴	۵/۳۳۴۶۹۳۱۰۷
هگزان پلاس	۶۳/۲۰۹۲۳۵۹۹	۶۱/۷۸	۶۱/۷۴۱۱۹۷۶۱
کل	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

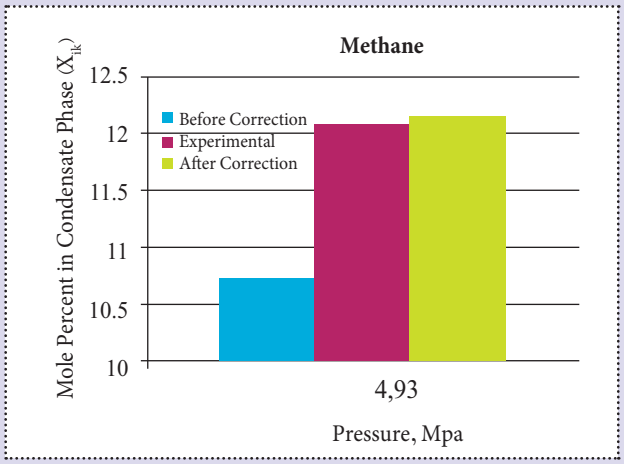
کروماتوگرافی به‌دست آمده است.

در صورت برقرار نبودن معادله ۷، میزان خطای رخ داده در محاسبه مقدار مولی هریک از اجزاء، توسط معادله ۸ محاسبه می‌شود [۳]. میزان خطای کل آزمایش نیز از معادله ۹ قابل محاسبه است.

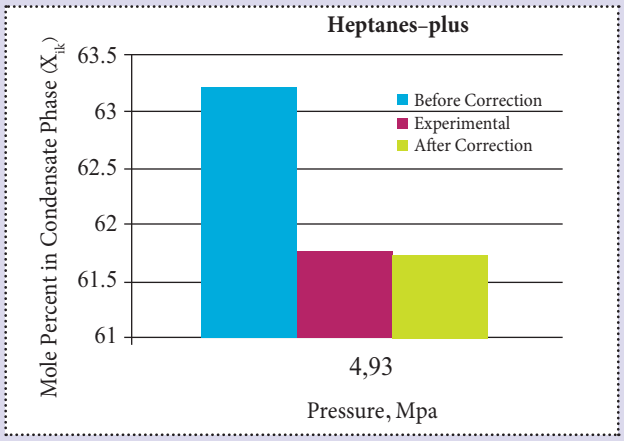
$$(\text{Difference})_i = \left(\frac{y''_{iR} - y_{iR}}{y''_{iR}}\right)^2 \qquad (۸)$$

$$\text{Total Difference} = \sum_i (\text{Difference})_i \qquad (۹)$$

جدول ۴، مقادیر y_{iR}، y'_{iR}، y''_{iR}، خطای هر جزء و خطای کل را برای یک نمونه نشان می‌دهد.



شکل ۱ | مقایسهٔ درصد متان در فاز مایع باقیمانده در مرحلهٔ آخر در حالت قبل و بعد از اصلاح با مقدار مورد اطمینان آزمایشگاهی گزارش شده



شکل ۲ | مقایسهٔ درصد هپتان در فاز مایع باقیمانده در مرحلهٔ آخر در حالت قبل و بعد از اصلاح با مقدار مورد اطمینان آزمایشگاهی گزارش شده

٤- فرضیات

از آن‌جا که این روش بر پایه محاسبات معکوس و استفاده از نتایج برای رسیدن به داده‌های اولیه استوار است، استفاده از فرضیات ذیل ضروری می‌باشد:

۱- درصد مولی اجزاء در ترکیب سیال اولیه مخزن، کاملاً درست و بدون خطا می‌باشد.

۲- درصد مولی اجزاء در گاز خروجی در هر مرحله کاملاً درست و بدون خطا می‌باشد.

۳- درصد مولی اجزاء در فاز مایع باقیمانده در آخرین مرحله، که توسط روش‌های دیگری مانند کروماتوگرافی به‌دست می آید، کاملاً درست و بدون خطا می‌باشد.

جدول ۷ | اطلاعات ورودی و محاسبات اولیه

Pressure Levels [p]	[MPa]	38.02	29.75	21.48	14.58	8.38	4.93
Molecular weight [M_w]	[Kg / Kmol]	29.96721104	26.05299671	23.78969112	23.02429313	23.02904354	23.548811
Gas Compressibility Factor [Z]	[ ]	1.089	0.972	0.913	0.914	0.937	0.96
Volume of retrograde liquid [100* [v_o/v]	[ ]	14.1	19.7	21.6	221.3	20.2	19.3
Total mole in cell [n]	[mole]	90976	78.256	61.326	44.314	27.854	18.699
Cumulated produced mole [n_p]	[mole]	9.024	21.744	38.674	55.686	72.146	81.301
Mole gas removed [n_g]	[mole]	9.024	12.72	16.93	17.012	16.46	9.155
Total mass in cell [m]	[Kg]	2726.297	2394.903	1992.143	1600.454	1221.396	1005.807
Mass of gas removed [m_o]	[Kg]	270.4241	331.3941	402.7595	391.6893	379.058	215.5894
Mass of gas in cell [mg]	[Kg]	2341.889	1668.54	1143.434	753.2079	428.278	254.3084
Mass of condensate in cell [m_o]	[Kg]	384.408	726.363	848.709	847.2461	793.118	751.4986
Gas volume in cell [v_g]	[m3]	7.647765	7.149191	6.980032	7.006742	7.104676	7.1848003
Condensate volume in cell [v_o]	[m3]	1.255337	1.753911	1.92307	1.896361	1.798427	1.718299
Gas density [dg]	[Kg / Km^3]	306.2188	233.3886	163.815	107.4976	60.28115	3.39532
Condensate density [d_o]	[Kg / Km^3]	306.219	414.139	441.3303	446.7747	441.0065	437.3503

جدول ۸ | اطلاعات ورودی و محاسبات اولیه

Pressures	P1 (MPa)	P2 (MPa)	P3(MPa)	P4 (MPa)	P5 (MPa)	P6 (MPa)
Components	38.02	29.75	21.48	14.58	8.38	4.93
Carbon Dioxide	2.4	2.45	2.5	2.53	2.57	2.6
Nitrogen	0.32	0.33	0.34	0.34	0.34	0.33
Methane	75.56	77.89	79.33	79.62	78.9	77.8
Ethane	7.83	7.87	7.92	8.04	8.4	8.7
Propane	3.47	3.4	3.41	3.53	3.74	3.91
i-Butane	0.67	0.65	0.64	0.66	0.72	0.78
n-Butane	1.37	1.31	1.3	1.33	1.44	1.56
i-Pentane	0.59	0.55	0.53	0.54	0.59	0.64
n-Pentane	0.62	0.58	0.56	0.57	0.61	0.66
Hexanes	0.97	0.88	0.83	0.82	0.85	0.9
Heptanes-plus	6.2	4.09	2.64	2.02	1.84	2.12
Total	100	100	100	100	100	100

جدول ۹ | نتایج محاسبات معکوس

	Initial Reservoir Composition	Measured in P = 4.93 [MPa]		Calculated in P = 4.93 [MPa]		Backward Calculation	Difference
Components	P=46.64 [MPa]	%Mole in Condensate	Mole in Condensate	%Mole in Condensate	Mole in Condensate	P=46.64 [MPa]	
Carbon Dioxide	237	0.535	0.0422639086	0.586081	0.0462992	2.3659647086	2.89903268402768E-06
Nitrogen	0.31	0.017	0.00134296532	0.02445051	0.00193154	0.30941142532	3.60478828238411E-06
Methane	73.19	10.704	0.84559476384	12.36775	0.9770272	73.0585669384	3.22482080112271E-06
Ethane	7.8	3.22	0.2543734312	3.35537	0.2650806	7.7892928312	1.88434358500474E-06
Propane	3.55	2.896	0.22877809216	2.920802	0.2307374	3.54804069216	3.04613149127981E-07
i-Butane	0.71	0.916	0.07236213136	0.912343	0.07207324	0.71028889136	1.65558853169297E-07
n-Butane	1.45	2103	0.16613270988	2.089675	0.1650801	1.45105260988	5.26985759559499E-07
i-Pentane	0.64	1.417	0.11194010932	1.397298	0.1103837	0.64155638932	5.91393485207548E-06
n-Pentane	0.68	1.624	0.12292687040.2966373398	1.599979	0.1263951	0.68189760704	7.78744048066058E-06
Hexanes	1.09	3.755	5.75207846148	3.683842	0.291016	1.0956213398	2.65966342454879E-05
Heptanes-plus	8.21	72813	5.75207846148	71.0623	5.613777	8.34830186148	0.000283772127939291
Total	100	100	7.899796	100	7.899801	100	0.000336680280631911

جدول ۱۰ | تصحیح میزان مایع تشکیل شده در هر مرحله توسط نرم افزار CVD Test Corrector

[vo / vd] * 100	38.02 [MPa]	29.75 [MPa]	21.48 [MPa]	14.58 [MPa]	8.38 [MPa]	4.93 [MPa]	Total Difference
Before Correction	14.1	19.7	21.6	21.3	20.2	19.3	0.000336680280631911
After Correction	12.64	18.24	20.14	19.84	18.74	17.84	1.27643495308711E-08

۵- تصحیح نتایج

به‌منظور برطرف کردن خطای ناشی از عدم قطعیت میزان مایع تشکیل شده در هر مرحله یا کاهش خطا به حداقل مقدار ممکن، یک دامنه خطا (به عنوان مثال ٪۳۰ ±) و یک طول گام (به‌عنوان مثال ۰/۰۰۱) برای این متغیر در نظر گرفته می‌شود، سپس با افزایش هر طول گام به میزان مایع تشکیل شده، محاسبات مربوط به آزمایش تخلیه در حجم ثابت و محاسبات معکوس بر اساس این مقادیر جدید انجام می‌شوند و میزان خطای آزمایش با استفاده از معادلات ۸ و ۹ به‌دست می‌آیند. این روند در کل دامنه خطا تکرار شده و میزان خطای کل ثبت می‌شود. مرحله‌ای که دارای کم‌ترین میزان خطای کل باشد، به عنوان مرحله صحیح در نظر گرفته شده و کلیه خصوصیات فاز گاز و مایع بر اساس آن مرحله گزارش می‌شوند.

با توجه به این که این روش مجموعه‌ای در حدود چند صد هزار تا چند میلیون معادلات را تشکیل می‌دهد، استفاده از روند یاد شده بدون بهره‌گیری از برنامه‌های رایانه‌ای تقریباً غیرممکن است، بنابراین در این مقاله از زبان برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک نت برای حل مساله استفاده شده است.

جدول ۵ بیانگر مقادیر جدول ۳ می باشد که به روش یاد شده اصلاح شده‌اند؛ در جدول ۶ نیز مقادیر درصد مولی اجزاء در فاز مایع باقیمانده در آخرین مرحله، قبل از اصلاح و بعد از اصلاح مقایسه شده‌اند.

مقایسه درصد هر جزء در فاز مایع باقیمانده در مرحله آخر در حالت قبل و بعد از اصلاح با مقدار مورد اطمینان آزمایشگاهی گزارش شده برای این متغیر، بیانگر میزان دقت و تأثیر این روش در تصحیح نتایج آزمایش تخلیه در حجم ثابت است. شکل‌های ۱ و ۲ مقایسه این مقادیر برای متان و هپتان به عنوان نماینده سبک‌ترین و سنگین‌ترین اجزای هیدروکربنی موجود در این آزمایش را نشان می‌دهند. جداول ۷ تا ۱۰ نیز نتایج محاسبات و تصحیح نمونه دیگری را نشان می‌دهد.

◆ نتیجه‌گیری

۱- این مطالعه نشان داد که استفاده از روش محاسبه معکوس و بهره‌گیری از برنامه‌های رایانه‌ای، می‌تواند به عنوان ابزار مؤثری در جهت توصیف دقیق‌تر مخازن گاز - میعانی مورد استفاده قرار گیرد و به‌کار بردن این روش از دیدگاه اقتصادی می‌تواند تأثیرات قابل توجهی داشته باشد.

۲- با توجه به مضرات تجمع میعانات در مخزن، با استفاده از این روش می‌توان از میزان میعانات تشکیل شده در مخزن در هر فشاری و هم‌چنین ترکیب مولی این میعانات اطلاعات دقیق‌تری به‌دست آورد.

۳- به‌طور یقین یک عنصر کلیدی در مدل‌سازی، تهیه یک مدل سیال است که بیانگر سیال مخزن به‌منظور شبیه‌سازی واقع‌گرایانه مخازن گاز- میعانی باشد؛ بنابراین با استفاده از درصد مولی اصلاح شده اجزاء در فاز گاز و فاز مایع که دارای ضریب اطمینان بیش‌تری نسبت به مقادیر اصلاح نشده هستند، می‌توان در جهت اصلاح مقادیر ثابت تعادل و ارایه مدل دقیق‌تری از سیال بهره گرفت [۴].

◆ منابع

[1] Danesh, Ali, PVT and phase behavior of petroleum reservoir fluids, The Netherlands, Elsevier science & Technology books, 1998, p.52-67.

[2] Fevang, ivind, and Yang, Tao, and Whitson, Curtis H., Condensate PVT – What's Really Important and Why?, IBC Conference "Optimization of Gas Condensate Fields", 28-29 Jan 1999, London.

[3] Ahmed, Tarek, Hydrocarbon Phase Behavior, Houston, Texas, Gulf Publishing Co., 1989.

[4] Gumarah, Fevazi, and Sinayuc, Caglar, Model for Gas–Condensate Phase Equilibria for Estimating C7+ Critical Properties Using Genetic Algorithm, transport in porous media, Kluwer academic publishers, 9 March 2003, no.55, p.201-214.