
بسم الله الرحمن الرحيم

شرح جامع

مهندسی مخزن (مخزن ۱ و ۲)

«مهندسی نفت»

مولف: محمد رضا اورنگی

انتشارات ارشد

پیشگفتار ناشر

خداوند بزرگ را شاکریم که فرصتی عنایت فرمود تا بتوانیم قدمی در جهت گسترش علم و فرهنگ کشور عزیزمان برداریم و مسیری هموار را در اختیار مخاطبان و داوطلبان علاقمند به ادامه تحصیل قرار دهیم. از آنجائی که درحوزه کتاب‌های درسی و کمک درسی کارشناسی ارشد کتاب‌های زیادی به رشته تحریر در آمده است با این حال وجود یک مجموعه جامع، دقیق، کامل و دارای رفرنس(منابع) مستند احساس می‌شود.

همیشه دغدغه داشتیم که ای کاش می‌شد تمامی منابع پراکنده و گاهاً دست نایافتنی کنکور در یک مجموعه به گونه‌ای جذاب و شیوا آماده می‌شد و همچنین سوالات دوره‌های قبل کنکور نیز به گونه‌ای تشریحی پاسخ داده می شدند، که خدشه‌ای بر آنها وارد نشود و خیال داوطلبان عزیز آنقدر آسوده باشد که اطلاعات مندرج در پاسخنامه‌ها را برای بهره‌گیری در آزمون خود بکار گیرند. این کار با یاری خداوند بزرگ و همکاری نخبه‌ترین دانشجویان و اساتید کشور در انتشارات ارشد هماهنگ گردید و در تمامی مقاطع تحصیلی از کاردانی به کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در حوزهٔ آزمون‌های سراسری – آزاد و پیام نور بسته‌های آموزشی شامل کتاب‌های بانک سوالات و کتاب‌های شرح جامع درس آماده گردید. در تهیه مجموعه‌های فوق‌الذکر از فارغ‌التحصیلان کارشناسی ارشد و دکتری که حائز رتبه‌های تک رقمی کنکور می‌باشند، استفاده کرده‌ایم، تا شما عزیزان بتوانید در راستای افزایش توان علمی خود در جهت نیل به مقصود خویش نایل آیید. بدون تردید می‌توان گفت که برای اولین بار در نظام آموزشی کشور مجموعه‌ای به این سبک عرضه می‌شود که در کیفیت و کمیت بی‌نظیر بوده و تمامی نیازهای دانشجویان و داوطلبان عزیز را پوشش می‌دهد. امید است که استفاده از این مجموعه عزیزان را در جهت موفقیت در آزمون یاری رسانده باشد. در پایان لازم به ذکر است که بی نقصی محض از آن خداوند متعال می‌باشد، بنا براین از تمامی خوانندگان و داوطلبان عزیز خواهشمندیم نظرات سازنده خود را در مورد این کتاب به سایت انتشارات ارشد اعلام نمایند تا ما را در جهت هر چه بهتر آماده کردن این محصولات یاری رسانند.

با تشکر

ناشـــــر

www.arshadbook. ir

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه‌ای بر رفتار سیالات مخزن ۱۱
فصل دوم: خواص سیالات مخزن ۲۷
فصل سوم: آزمایش سیالات مخزن ۵۹
فصل چهارم: خواص سنگ مخزن ۶۵
فصل پنجم: بررسی جریان سیال در مخازن هیدروکربوری ۷۹
فصل ششم: بررسی عملکرد چاههای نفتی ۱۱۱
فصل هفتم: بررسی عملکرد چاههای گازی ۱۲۷
فصل هشتم: مکانیزم‌های تولید از مخازن نفتی و معادله موازنهٔ جرم ۱۳۹
فصل نهم: سیلابزنی ۱۶۷

فصل اول

مقدمه‌ای بر رفتار سیالات مخزن

عناوین اصلی

- تقسیم بندی مخازن و سیالات مخزن
- تقسیم بندی مخازن نفتی برحسب فشار
- تقسیم بندی مخازن نفتی براساس خواص فیزیکی و شیمیایی
- تقسیم بندی مخازن گازی

فصل اول

مقدمه‌ای بر رفتار سیالات مخزن

۱-۱- تقسیم‌بندی مخازن و سیالات مخزن

مخازن به دو بخش نفتی و گازی تقسیم می‌شوند که این تقسیم‌بندی کلی را می‌توان براساس معیارهای زیر به زیر مجموعه‌های ریزتری تقسیم‌بندی کرد که در ادامه به آن اشاره می‌شود

۱) ترکیبات هیدروکربن مخزن

۲) دما و فشار اولیه مخزن

۳) دما و فشار تولید در سطح زمین

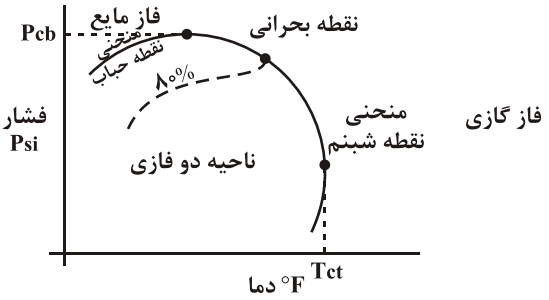
معمولترین نموداری که در مخازن مورد بحث قرار می‌گیرد، نمودار فشار- دما است. که هر سیستم هیدروکربنی نموداری P-T مخصوص خود را داراست.

📖 **نکته:** علت استفاده از نمودار P-T :

۱) دسته‌بندی مخازن (نفت سیاه و نفت فرار و ....)

۲) دسته‌بندی سیستم هیدروکربونی موجود (مایع، گاز، دو فازی)

۳) توصیف رفتار فازی سیال مخزن



شکل ۱-۱ نمودار دما – فشار سیال هیدروکربوری

برای درک بیشتر و استفاده کاملتر از نمودار P-T ، تعاریف زیر را به خاطر بسپاریم

حداکثر دمای دوفازی (Cricondentherm Tct) : حداکثر دمایی که دوفاز می‌توانند همزمان وجود داشته باشند.

حداکثر فشار دوفازی (Cricondenbar Tct) : حداکثر فشاری که دوفاز می‌توانند همزمان وجود داشته باشند.

منحنی فازی (phase envelop) : حداکثر فشاری که دو فاز می‌توانند همزمان وجود داشته باشند.

نقطه بحرانی: نقطه‌ای (ناحیه‌ای) در بین منحنی نقطه شبنم و منحنی نقطه حباب که فاز موجود در آن نقطه هم خصوصیات مایع را داراست و هم خصوصیات گاز، و دو فاز از هم قابل تشخیص نیستند.

خطوط کیفیت (Quality line): خط چین‌هایی درون منحنی فازی که شرایط لازم فشار و دما برای حجم یکسان مایع را بیان می‌کند. مثال: خط ۸۰٪ بیان کننده اینست که در کل مسیر این خط، تمام نقاط دارای حجم مایع ۸۰٪ می‌باشد و تنها دما و فشار آن ها متفاوت است.

📖 **نکته:** کلیه خطوط کیفیت از نقطه بحرانی شروع می‌شوند.

منحنی نقطه حباب (bubble point curve) : خطی که ناحیه دوفازی را از ناحیه فاز مایع جدا می‌کند.

منحنی نقطه شبنم (Dew point curve) : خطی که ناحیه دوفازی را از ناحیه فاز گاز جدا می‌کند.

۱) مخازن نفتی: اگر دمای مخزن کمتر از دمای بحرانی سیال هیدروکربونی باشد ($T<T_c$) مخزن نفتی است.

۲) مخازن گازی: اگر دمای مخزن بیشتر از دمای بحرانی سیال هیدروکربونی باشد ($T>T_c$) مخزن گازی است.

📖 **نکته:** تقسیم‌بندی نفتی یا گازی بودن مخازن تنها براساس دمای مخزن است.

۱-۱-۱- مخازن نفتی

۱-۱-۱-۱ تقسیم‌بندی مخازن نفتی برحسب فشار

۱) مخازن نفتی زیر اشباع (under saturated oil Reservoir): هنگامی که فشار اولیه مخزن P_i از فشار حباب سیال مخزن P_b بیشتر باشد

۲) مخازن نفتی اشباع (saturated oil Reservoir): هنگامی که فشار اولیه مخزن P_i از فشار حباب سیال مخزن P_b کمتر باشد.

📖 **نکات**

- نکته: هنگامی که فشار اولیه مخزن با فشار حباب سیال مخزن برابر باشد $P_i = P_b$ ، به مخزن نفتی استاندارد (standard oil Reservoir) مشهور است.
- نکته: نام دیگر، saturated oil Res ، مخزن با کلاهک گازی gas-cap Reservoir و مخزن دوفازی two-phase Reservoir می‌باشد.

۱-۱-۱-۲- تقسیم‌بندی نفت خام براساس خواص فیزیکی و شیمیایی آن:

۱) Black oil	نفت سیاه (سنگین)
۲) Low- shrinkage crude oil	نفت نیمه فرار
۳) High- shrinkage crude oil	نفت فرار
۴) Near- critical crude oil	نفت بحرانی

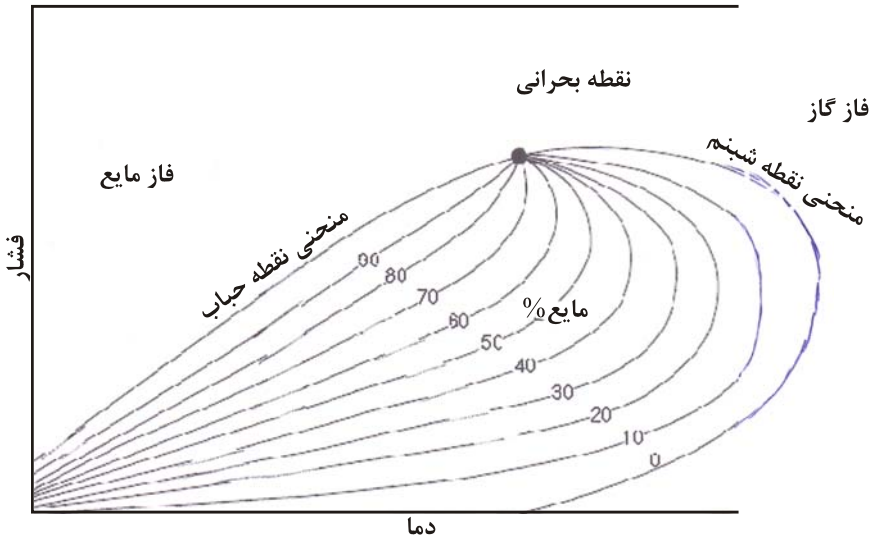
📖 **نکته:** اساس تقسیم‌بندی بالا: خواص فیزیکی (رنگ و ....) ، ترکیبات ($C_1, C_2, ...$) ، نسبت گاز به نفت R_s و نمودار P-T می‌باشد.

۱- نفت سیاه، Black oil :

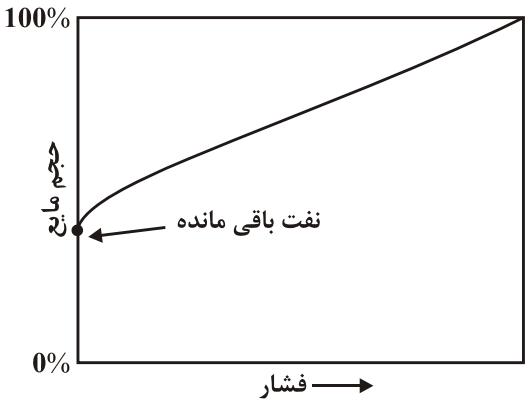
شکل ۲-۱ نمودار P-T این نوع نفت را نشان می‌دهد. نکته مهم در مورد این نمودار، وجود فاصله‌های نسبتاً یکسان بین خطوط کیفیت (Quality lines) می‌باشد. از طرفی درصد حجمی مایع نسبت به فشار به صورت یک خط راست می‌باشد، به جز در فشارهای پایین که در شکل ۳-۱ مشاهده می‌کنید.

مشخصات نفت Black oil :

- $۲۰۰ < R_s < ۷۰۰ \ [\frac{Scf}{STB}]$
- $۱۵ < API < ۴۰$
- رنگ قهوه‌ای متمایل به سبز بسیار تیره (سیاه)
- $B_o < ۱/۲$



شکل ۲-۱ نمودار P-T برای Black oil



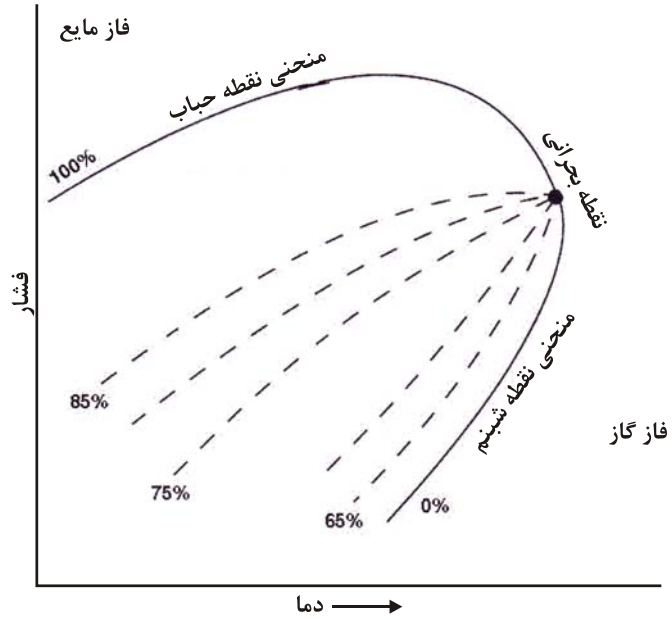
شکل ۳-۱ افت میزان مایع (Shirinkage) برحسب فشار

۲- نفت نیمه فرار، Low- shrinkage oil

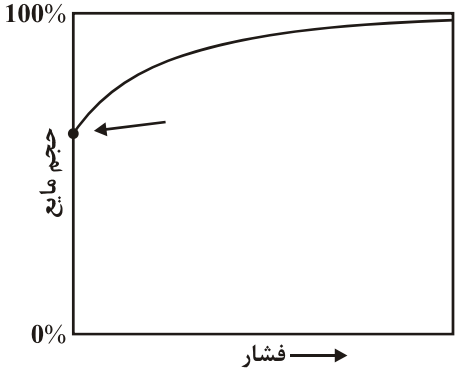
شکل ۴-۱ نمودار P-T این نوع نفت را نشان دهد. خطوط کیفیت در این نوع نفت به منحنی نقطه شبنم نزدیک شده و هرچه از منحنی نقطه حباب به سمت منحنی نقطه شبنم حرکت کنیم فاصله خطوط کیفیت کاهش می‌یابد. درصد حجمی مایع نسبت به فشار نیز به صورت یک منحنی با تقعر رو به پایین است. شکل ۵-۱ را ببینید.

مشخصات نفت Low shrinkage oil

- $R_s < ۲۰۰ [\frac{Scf}{STB}]$
- $APL < ۳۵^\circ$
- رنگ سیاه یا رنگ بسیار تیره
- $B_\circ < ۱/۲ [\frac{bbl}{STB}]$



شکل ۴-۱ نمودار P-T برای Low Oil



شکل ۵-۱ افت میزان مایع Shrinkage برحسب فشار

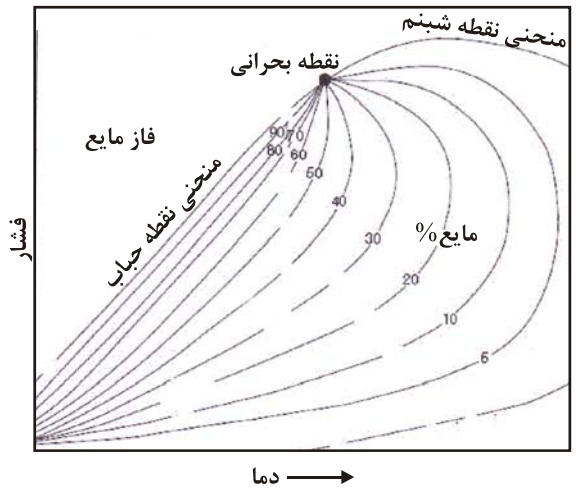
۳) نفت فرار، volatile oil or high-shrinkage crude oil

شکل ۶-۱ نمودار فازی (P-T) برای این نوع نفت خام است. نکته مهم در مورد نفت فرار نزدیکی خطوط کیفیت به هم در جوار منحنی نقطه حباب است (برعکس low-shirinkage oil) و رفته رفته که به سمت منحنی نقطه شبنم نزدیک می‌شویم خطوط کیفیت از هم فاصله می‌گیرند. در واقع این خطوط با کاهش فشار از هم بیشتر فاصله می‌گیرند. نمودار درصد حجمی مایع نیز برحسب فشار دارای نقطه عطف است و در قسمت اول نمودار تقعر به سمت پایین و در قسمت دوم نمودار تقعر به سمت بالا می‌باشد. در این نوع مخازن کمترین افت فشار باعث آزاد شدن گاز می‌گردد و حجم مایع به سرعت کاهش می‌یابد.

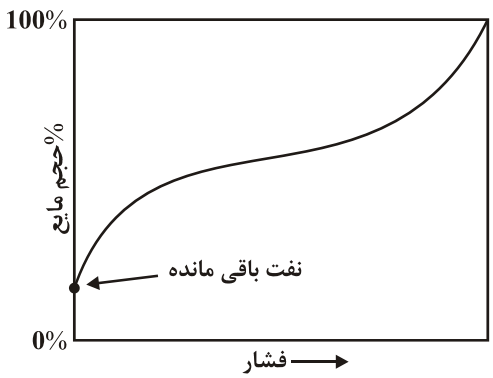
مشخصات نفت volatile oil

- $B_o < ۲ \quad [\frac{bbl}{STB}]$
- $۲۰۰۰ < R_s < ۳۲۰۰ \frac{Scf}{STB}$
- $۴۵ < API < ۵۵$
- رنگ سبز یشمی به سمت نارنجی

📖 **نکته:** API نفت انباره با توجه به گذشت زمان از بهره‌برداری مخزن رفته رفته افزایش می‌یابد.



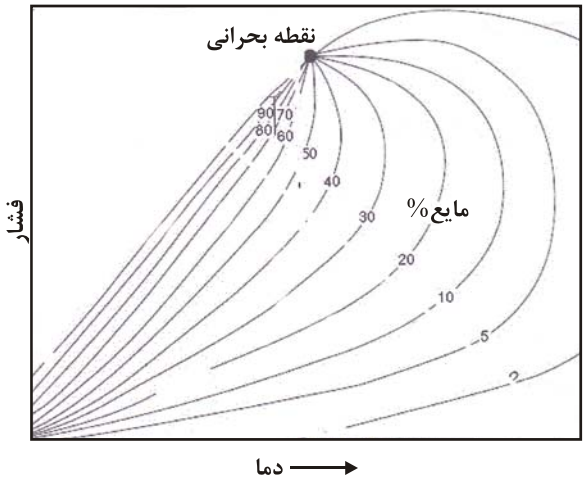
شکل ۷-۱ نمودار P-T برای نفت فرار



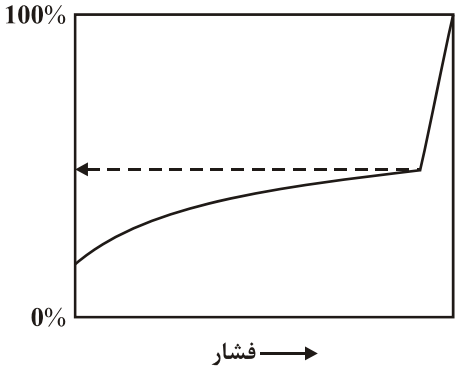
شکل ۸-۱ افت میزان مایع (Shrinkage) برحسب فشار

۴) نفت بحرانی Near critical crude oil

شکل ۹-۱ نمودار P-T این نوع نفت را نشان می‌دهد. دمای مخزن در نزدیکی دمای بحرانی سیال سیستم (T_c) می‌باشد. با توجه به شکل از نقطه‌ای نزدیک نقطه بحرانی (منظور نقطه‌ای است که نمایان‌گر شرایط مخزن است) به صورت ایزوترمالی به سمت پایین حرکت کنیم، مشاهده می‌کنید که با افت فشار از حدود ۱۰ psi به ۵۰ psi ، افت میزان مایع از ۱۰۰٪ به ۵۵٪ خواهد رسید شکل ۱۰-۱ بیان خوبی از رفتار این نوع مخازن ارائه می‌دهد. توجه کنید که ما برای بررسی مخازن باید در جهت کاهش فشار حرکت کنیم. لذا شکل ۱۰-۱ آزادشدن گاز فراوان در اثر افت فشار کوچک و کاهش شدید میزان مایع را بیان می‌کند. اما رفته رفته فاصله خطوط کیفیت از هم زیاد شده و با سپری شدن زمان کاهش فشار همانند قبل تأثیر زیادی برای آزاد شدن گاز نخواهد داشت:



شکل ۹-۱ نمودار P-T برای نفت نزدیک نقطه بحرانی



شکل ۱۰-۱ افت میزان مایع برحسب فشار

خصوصیات Near critical crude oil

- $B_o > ۲ \quad [\frac{bbl}{STB}]$
- $R_s > ۳۰۰ [\frac{Scf}{STB}]$
- $API > ۵۰$

📖 **نکته:** ترکیبات نفت نزدیک بحرانی شامل ۱۲/۵٪ تا ۲۰٪ مول، $C_{۷+}$ ، ۳۵٪ مول، اتان تا هگزان و مابقی متان است.

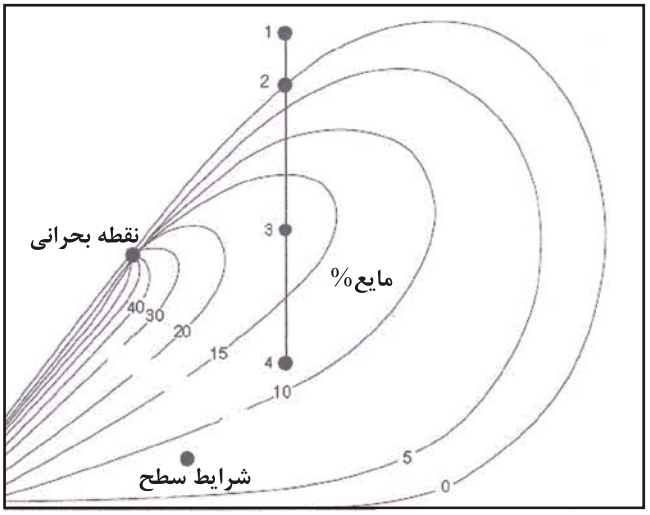
۲-۱-۱ مخازن گازی

هنگامی که دمای مخزن (T_R) بالاتر از دمای بحرانی سیال سیستم T_c قرار گید با مخزن گازی روبرو هستیم. با توجه به نمودارهای فازی و شرایط حاکم بر مخزن، مخازن گازی به ۴ گروه تقسیم بندی می‌شوند:

۱) Retrograde gas- condensate — مخازن گاز میعانی
۲) Near critical gas condensate — مخازن گاز نزدیک نقطه بحرانی
۳) Wet gas — مخازن گاز تر
۴) Dry gas — مخازن گاز خشک

۱) مخازن گاز میعانی (معکوس) Retrograde gas condensate

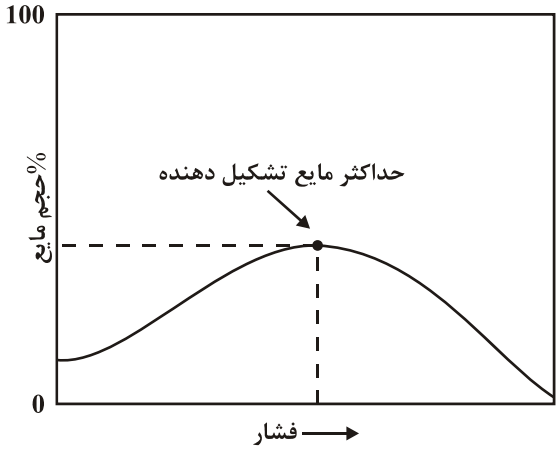
هنگامی که دمای مخزن بین دمای بحرانی و حداکثر دمای دوفازی ($T_c < T < T_{ct}$) قرار گیرد این مخزن گازی در گروه مخازن گاز میعانی قرار خواهد گرفت. این گروه از مخازن گازی دارای شرایط ویژه ترمودینامیکی هستند. هنگامی که فشار در این مخلوط هیدروکربونی کاهش می‌یابد به جای انبساط مخلوط (اگر گاز باشد) یا تبخیر مخلوط (اگر مایع باشد) برخلاف انتظار به جای میعان، تبخیر می‌شوند. شکل ۱۱-۱ بیانگر نمودار P-T این نوع خاص است. اگر شرایط مخزن را نقطه ۱ در نظر بگیریم به علت اینکه فشار مخزن بالای نقطه شبنم است، سیستم را تک فازی (مثلاً فاز بخار) در نظر می‌گیریم. با کاهش فشار در شرایط همدما (Isotherm) از نقطه ۱ تا نقطه ۲(نقطه شبنم بالایی)، جذب بین مولکول‌های همنوع (سبک با سبک و سنگین با سنگین) باعث جدایش غیر همنوع‌ها (سبک با سنگین) از هم می‌شود. در این میان جذب میان مولکول‌های سنگین‌تر سریعتر و راحت‌تر صورت می‌گیرد و مایع شروع به میعان می‌کند. فرایند میان معکوس همزمان با کاهش فشار تا رسیدن به تولید حداکثر مایع در نقطه ۳ ادامه می‌یابد.



شکل ۱۱-۱۰ نمودار T-P برای مخزن گاز میعانی

کاهش بیشتر فشار باعث می‌شود شرایط نرمال تبخیر مولکول‌های سنگین فراهم شود. این فرایند باعث کاهش برخورد مولکول‌های گاز به سطح مایع و جذب شدن در سطح مایع می‌شود. از طرفی باعث می‌شود مولکول‌های بیشتری از سطح مایع کنده شده و به فاز گاز وارد شوند. این تبخیر تا رسیدن به نقطه شبنم دوم ادامه دارد.

شکل ۱۲-۱ منحنی میزان افت مایع برای یک سیستم میعانی نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۱ نمودار مایع ترک‌کننده مخزن گاز میعانی

خصوصیات Retrograde gas condensate

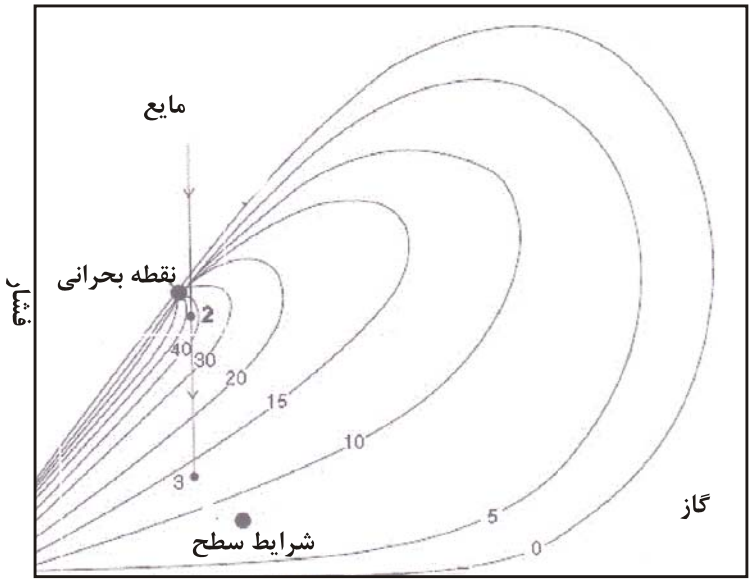
- $۸۰۰۰ < R_s < ۷۰۰۰۰ [\frac{Scf}{STB}]$
- $API > ۵۰^{\circ}$
- رنگ مایع خروجی در انباره بی‌رنگ کدر یا رنگ‌های بسیار روشن است.

🕮 نکات

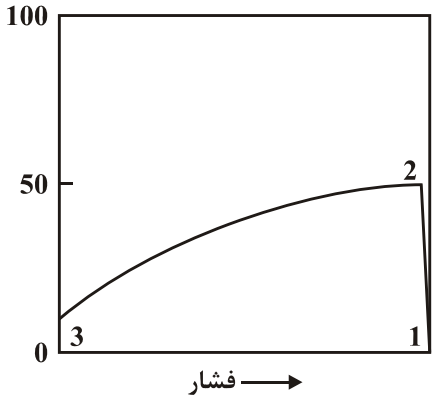
- نکته: R_s یک مخزن گاز میعان با گذشت زمان زیاد می‌شود.
- نکته: مخزن گاز میعانی دارای ۲ نقطه شبنم می‌باشد.

۲) مخازن میعانی نزدیک به شرایط بحرانی Near-critical gas- condensate Reservoir

اگر دمای مخزن بسیار نزدیک به دمای بحرانی باشد ($T_c < T_R$) با این نوع مخزن روبرو هستیم. در این نوع مخزن نیز شرایط تشکیل ماکزیمم مایع وجود دارد. شکل ۱۲-۱ نمودار P-T این مخازن را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ، یا یک افت فشار کوچک مقدار زیادی مایع حاصل می‌شود زیرا خطوط کیفیت که در نقطه‌ی بحرانی به هم می‌رسند در نزدیک نقطه بحرانی خطوط به هم نزدیک و هرچه به سمت منحنی نقطه شبنم حرکت می‌کنیم فاصله خطوط کیفیت از هم بیشتر می‌شود. در این مخازن به علت نزدیکی وضعیت دمایی مخزن نزدیک به دمای بحرانی با یک کاهش فشار اولیه مقدار زیادی مایع تولید می‌شود اما رفته رفته این مقدار کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۴-۱ شیب تند تولید مایع و وجود نقطه ماکزیمم در اولین افت فشار (در سمت کاهش فشار باید نمودار را بررسی کنید نه افزایش فشار، زیرا فشار مخازن رفته‌رفته کاهش می‌یابد) رفتار این نوع مخازن به راحتی قابل درک است.



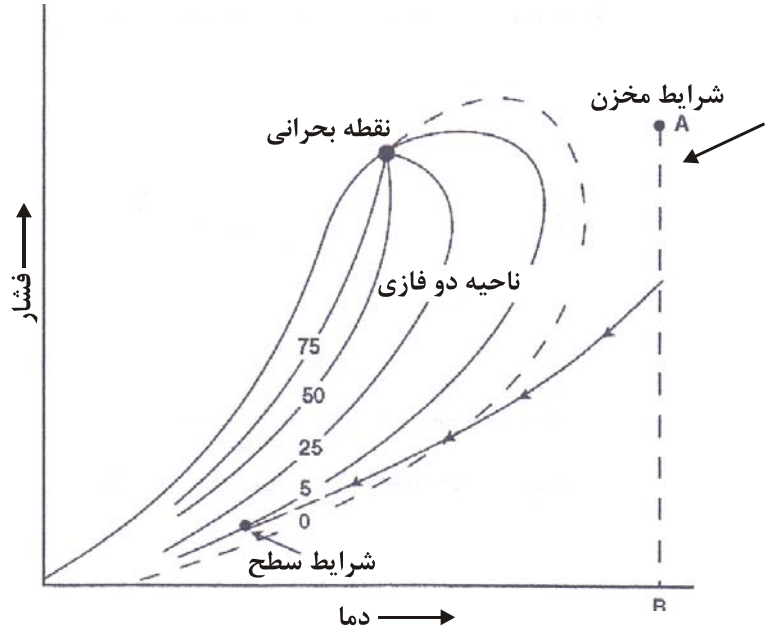
شکل ۱۳-۱ نمودار P-T برای مخازن گاز میعانی نزدیکی به شرایط بحرانی



شکل ۱۴-۱ افت میزان مایع (Shrinkage) برحسب فشار

۳) مخازن گاز تر wet gas reservoir

شمایل کلی نمودار P-T برای مخازن گاز تر شکل ۱۴-۱ است. شرط وجود این مخازن دمای بالاتر از حداکثر دمای دو فازی ($T_{ct} < T$) می‌باشد. از آنجا که دمای مخزن همواره بالاتر از T_{ct} است، لذا سیال مخزن در شرایط مخزن به صورت فاز بخار است. اما بعد از تولید ورود به شرایط سطح زمین (نقطه G) سیال در ناحیه دوفازی قرار خواهد گرفت. دقت کنید در این مخازن شرایط تولید به صورت خط راست AB و فرایند همدما صورت نمی‌گیرد زیرا مخزن زود به شرایط سطح زمین نزدیک می‌شود. در مخازن قبل کل فرایندها در خود مخزن شکل می‌گرفت و از آنجا که دمای مخزن را می‌توان تقریباً ثابت فرض نمود،شرایط را به صورت همدما در نظر می‌گرفتیم. لذا در این مخازن همزمان که سیال به سمت فرایند تولید حرکت می‌کند با کاهش دما و فشار آن انرژی جنبشی بین مولکولی کاهش یافته و مولکول‌ها تمایل به تشکیل droplet پیدا می‌کنند.



شکل ۱۵-۱ نمودار P-T برای مخازن گاز تر

مشخصات wet gas Reservoir

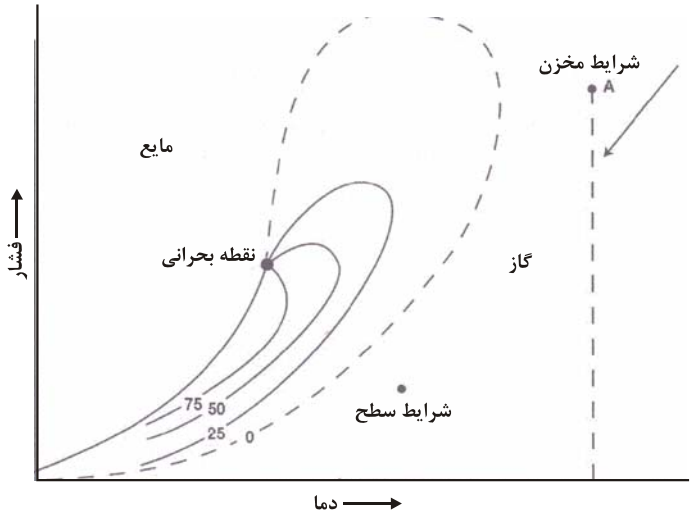
- $۶۰۰۰۰ < R_s < ۱۰۰۰۰۰ [\frac{Scf}{STB}]$
- $API > ۶۰^{\circ}$
- رنگ مایع تولیدی در سطح بی‌رنگ کدر است.
- شرایط سطح به صورت دوفازی است.

۴) مخازن گاز خشک Dry gas reservoir

هنگامی که دمای مخزن بالاتر از حداکثر دمای دوفازی $(T_{ct} < T)$ باشد و سیال مخزن، هم در شرایط مخزن و هم در شرایط سطح به صورت گاز باشد با مخازن گاز خشک روبرو هستیم. تنها مایع تولیدی در سطح آب است. شکل ۱۵-۱ نمودار P-T این نوع از مخازن گازی را به ما نشان می‌دهد.

🕮 نکات

- نکته: برای مخازن گاز خشک R_s تعریف نمی‌شود
- نکته: به شکل نمودارها و تغییر مکان نقطه بحرانی و وضعیت خطوط کیفیت توجه کنید.



شکل ۱۶-۱ نمودار P-T برای مخازن گاز خشک

با توجه به توضیحات یاد شده مخازن با توجه به شرایط مخزن و شرایط تولید می‌توانند به صورت فاز گازی یا فاز مـایع مشاهده شوند. مطالب بیان شده در این فصل را می‌توان در جداول زیر خلاصه نمود.