Archive of SID

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ – ۰۲۱
www.Reservoir.ir

محاسبه‌ی حداکثر دبی مجاز برای جلوگیری از سایش در چاه‌های گاز میعانی با درنظرگرفتن رابطه‌ی عملکرد چاه–مطالعه‌ی موردی

محسن پاسدار[۱]، سعید دولتی[۲]، محسن جاویدنیا[۳]، علی‌اکبر سبزی[۳]
شرکت نفت و گاز پارس، مدیریت تولید و عملیات
mohsenpasdar@gmail.com

چکیده

سایش، پدیده‌ای فیزیکی که طی آن لایه‌های فلز در اثر تماس با سیال پرسرعت برداشته می‌شود، منجر به کاهش چشمگیر ضخامت تأسیسات سرچاهی و درون‌چاهی می‌گردد. از این رو لازم است که برای جلوگیری از سایش، دبی تولیدی از چاه‌ها کنترل شود.

چاه‌های میدان پارس جنوبی، بزرگترین مخزن گاز میعانی جهان، با دبی میانگین ۱۰۰ MMSCFD و غلظت بالای H_2S (ppm ۳۰۰۰) در حال تولید می‌باشند. در چنین شرایطی سایش دور از انتظار نیست. روابط زیادی برای پیش‌بینی سرعت بحرانی سایش وجود دارند ولی بیشتر این روابط برای محیط‌هایی با تولید ماسه می‌باشند؛ اما در چاه‌های گاز میعانی پارس جنوبی نگرانی اصلی وجود قطرات میعانات گازی در جریان گاز است که در سرعت بالا باعث سایش لوله مغزی می‌شوند.

در این مطالعه حداکثر دبی مجاز برای جلوگیری از سایش در چاه‌های پارس جنوبی محاسبه می‌شود. سرعت بحرانی سایش با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی API بر اساس داده‌های نمونه‌ی چاه و سیال محاسبه شده است. رسم منحنی عملکرد چاه برای چاه نمونه با در نظر گرفتن سایش نشان می‌دهد که دبی تولیدی کنونی ایمن بوده و نگرانی عمده در مورد سایش وجود ندارد. اما در صورت تصمیم به افزایش تولید از چاه‌ها یکی از مواردی که باید مورد بررسی قرار گیرد عدم تجاوز نرخ جریان از مقدار مجاز سایش لوله مغزی می‌باشد. به دلیل تغییر عملکرد چاه و مخزن لازم است که این پدیده با گذشت عمر میدان به‌صورت دوره‌ای بررسی شود.

واژه‌های کلیدی: پارس جنوبی، تولید ایمن، چاه گازی، سایش، گاز ترش، عملکرد چاه

[۱] دانشجویدکترای مهندسی نفت- پژوهشگاه صنعت نفت
[۲] دانشجوی دکترای مهندسی نفت- انستیتو مهندسی نفت دانشگاه تهران
[۳] شرکت نفت و گاز پارس

www.SID.ir

Archive of SID

مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
۷ خرداد ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
مجری: اهم اندیشان انرژی کیمیا ۸۸۶۷۱۶۷۶ – ۰۲۱
www.Reservoir.ir

۱- مقدمه

پارس جنوبی بزرگترین مخزن گاز میعانی جهان، واقع در مرز مشترک ایران و قطر، در فاصله‌ی ۱۰۰ km از ساحل خشکی ایران قرار گرفته است. سهم ایران از این میدان مشترک بیش از ۱۸ میلیارد بشکه میعانات گازی و ۴۷۰ تریلیون فوت مکعب گاز درجا برآورد می‌شود. توسعه‌ی بخش ایرانی این میدان از سال ۱۹۹۱ آغاز شده است و در سال ۲۰۰۱ بهره‌برداری از میدان آغاز شده است. در حال حاضر ۱۰ فاز در این میدان به بهره‌برداری رسیده‌اند و ۱۴ فاز دیگر تا چند سال آینده وارد مدار تولید خواهند شد. هم‌اکنون ۱۱۰ چاه در این میدان در حال تولید هستند که در پایان توسعه‌ی میدان این تعداد به ۴۴۰ چاه افزایش خواهد یافت. ظرفیت تولیدی طراحی شده برای هر چاه به میزان ۱۰۰ میلیون فوت مکعب در روزمی‌باشد. برای رسیدن به این ظرفیت تولیدی باید هر گونه مشکل عملیاتی که منجر به کاهش تولید می‌شود مرتفع گردد.

مقدار زیاد میعانات گازی توسعه‌ی این میدان را از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر می‌کند. از طرفی دیگر درصد بالای گاز-های خورنده‌ی CO_2(20000 ppm) و H_2S(3000 ppm) تولید از این میدان را پیچیده می‌کند. در همه‌ی تأسیسات باید از آلیاژهای مقاوم در برابر خوردگی[1] استفاده کرد. چاه‌های توسعه‌ای پارس جنوبی با انحراف ۳۰۰۰ متر و عمق کلی حدود ۴۰۰۰ متر تکمیل شده‌اند. رشته‌ی تکمیل این چاه‌ها شامل جداری و آستری "۷ می‌باشد.

بعضی از مشکلات معمول در چاه‌های گاز میعانی از این قرار می‌باشند: تشکیل میعانات گازی اطراف چاه، نشت گاز به دلیل سیمان‌کاری ضعیف لوله‌های جداری، خوردگی رشته‌ی تکمیل و تأسیسات سطحی و ... . انواع خوردگی در صنعت نفت به سه دسته تقسیم می‌شوند: الف) خوردگی الکتروشیمیایی ب) خوردگی شیمیایی پ) خوردگی مکانیکی. یک نوع از خوردگی مکانیکی، سایش[2]– خوردگی می‌باشد که به طور خلاصه سایش نامیده می‌شود. دلیل اصلی سایش در چاه‌های گازی برخورد ذرات جامد و قطرات میعانات گازی با رشته‌ی تکمیل و دیگر تأسیسات می‌باشد. وجود گازهای خورنده مانند CO_2 و H_2S می-توانند بر شدت مشکل سایش بیفزایند. تولید ماسه به عنوان یکی از دلایل اصلی سایش می‌تواند بوسیله‌ی دبی جریان کنترل شود. افزایش دبی می‌تواند منجر به افزایش خوردگی و سایش شود. بنابراین منطقی است که به‌وسیله‌ی کنترل دبی از سایش جلوگیری شود. بدین منظور محققان زیادی مدل‌هایی برای محاسبه‌ی سرعت بحرانی جهت جلوگیری از سایش ارائه کرده‌اند. این محققان برای توسعه‌ی مدل‌های ارائه شده از شرایط مختلف عملیاتی استفاده کردند. از این رو برای انتخاب مدل مناسب لازم است که شرایط عملیاتی این میدان به‌طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد.

حفظ تولید در ناحیه‌ی ایمن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تولید ناایمن می‌تواند منجر به آسیب سیستم تولید شود. بنابراین سرعت بحرانی باید به‌طور دقیق محاسبه شده و ناحیه‌ی امن تولید مشخص شود.

۲- تئوری

به منظور حفظ تولید ایمن و جلوگیری از مشکلات ناشی از سایش لازم است دبی تولیدی از هر چاه به دقت کنترل شود. سایش، پدیده‌ای فیزیکی که طی آن لایه‌های فلز در تماس با سیال درون آن برداشته می‌شود، می‌تواند منجر به کاهش شدید

[1] Corrosion
[2] Erosion

www.SID.ir

Archive of SID

ضخامت در تأسیسات شود [۱]. عواملی نظیر سرعت بالای سیال، تولید ماسه، عوامل خورنده نظیر CO_2 و H_2S و وجود اتصالات به این پدیده شتاب می‌دهند [۲]. تجربه‌های صنعتی نشان می‌دهند که نرخ سایش ۰/۱-۰/۲۵ mm/year قابل قبول بوده و از نرخ‌های سایش بیشتر از این مقدار باید خودداری شود [۳]. مکانیزم‌های سایش ضمن تولید گاز به سه دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند [۴]:

- **سایش ناشی از برخورد قطرات مایع به جداره‌ی لوله**

قطرات مایع به علت انرژی جنبشی‌ای که دارند وقتی به جداره‌ی لوله برخورد می‌کنند باعث سایش آن می‌شوند؛ هرچه سرعت سیال بیشتر باشد، پدیده‌ی سایش شدیدتر خواهد بود.

- **سایش ناشی از تولید ماسه**

ذرات ماسه تولیدی به دلیل انرژی جنبشی زیادی که دارند می‌توانند منجر به سایش در تأسیسات شوند. این ذرات می‌توانند محلول در مایع و یا معلق در گاز باشند. در این مکانیزم در هر سرعتی امکان سایش وجود دارد.

- **پدیده‌ی سایش- خوردگی**

این پدیده در محیط‌های خورنده روی می‌دهد. ابتدا دیواره‌ی لوله‌ها در اثر واکنش‌های شیمیایی دچار خوردگی می‌شود. پس از آن لایه‌ی نازکی از مواد تولید شده بر روی دیواره‌ی لوله تشکیل می‌شود که می‌تواند نرخ سایش را کاهش دهد. سپس طی یک پدیده‌ی فیزیکی این لایه در اثر سرعت بالای سیال یا ذرات معلق جامد برداشته می‌شود. برداشته شدن این لایه می‌تواند خوردگی لوله را شتاب دهد.

روابط زیادی برای پیش‌بینی سرعت محاسبه‌ی سایش موجود هستند که بیشتر آنها برای سیستم‌هایی با تولید ماسه هستند. ساده‌ترین این روابط استاندارد API RP 14E می‌باشد که سیستم‌های بدون ماسه را درنظر می‌گیرد. این استاندارد برای سیستم‌های بدون تولید ماسه و خوردگی رابطه‌ای تجربی برای محاسبه‌ی سرعت بحرانی سایش ارائه داده است. در جاهایی که اطلاعات مشخصی از ویژگی‌های خوردگی – سایشی سیستم وجود ندارد این استاندارد می‌تواند برای محاسبه‌ی سرعت بحرانی سایش استفاده شود.

سرعت بحرانی سایش که در مقادیر بیشتر از آن سایش روی می‌دهد از رابطه‌ی تجربی زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$V_e = \frac{C}{\sqrt{\rho_m}} \qquad (۱)$$

ضریب C ثابت تجربی و ρ_m چگالی سیال دوفازی می‌باشد.

چگالی مخلوط گاز – مایع از رابطه‌ی زیر محایسبه می‌شود [۲]:

$$\rho_m = \frac{12409 \times S_l \times P + 2.7 \times R \times S_g \times P}{198.7 \times P + R \times T \times z} \qquad (۲)$$

دبی جرمی مجاز سایش و دبی گاز خشک به‌کمک سطح مقطع لوله و چگالی دوفازی سیال به‌دست می‌آید:

$$\dot{m} = V_e A \rho_m \qquad (۳)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$Q_{dry\ gas} = \frac{\frac{86400}{144\times1000} \times V_e A \rho_m}{77.989 \times S_g + \frac{350.4\times S_l \times Yld}{1000} + \left(\frac{350.4\times \gamma_w \times Yld}{1000}\right) \times \left(\frac{WC}{1-WC}\right)} \quad (۴)$$

$$Yld = \frac{q_{oil}}{q_{gas}} \quad (۵)$$

$$S_l = \gamma_o \left(\frac{q_o}{q_o + q_w}\right) + \gamma_w \left(\frac{q_w}{q_o + q_w}\right) \quad (۶)$$

بررسی مقادیر پیشنهادی برای ضریب C

فرمول پیشنهادی API یک رابطه‌ی تجربی است که پارامترهای دوفازی، الگوی جریان، ذرات جامد، PH و ... همگی در ضریب C خلاصه می‌شوند[۵]. تنها مشکل استفاده از فرمول API انتخاب ضریب C مناسب می‌باشد. بعضی از مقادیر پیشنهادی ضریب C به‌صورت زیر می‌باشند:

الف) API مقادیر مختلفی براساس ویژگی‌های جریان برای ضریب C ارائه کرده است [۲]:

- برای جریان پیوسته[۱] در سیستم‌های تمیز و بدون ماسه، C=۱۰۰
- برای جریان متناوب[۲] در سیستم‌های تمیز و بدون ماسه، C=۱۲۵
- برای جریان پیوسته که خوردگی با استفاده از مواد ضدخوردگی یا آلیاژهای مقاوم دربرابر خوردگی کنترل شده باشد، C=۱۵۰
- برای جریان پیوسته که خوردگی با استفاده از مواد ضدخوردگی یا آلیاژهای مقاوم دربرابر خوردگی کنترل شده باشد، C=۲۵۰

ب) شرکت Arco از مقادیر C=۱۰۰-۲۷۵ برای لوله‌های استیل – کربن به همراه مواد ضدخوردگی و مقادیر C=۱۰۰-۵۰۰ برای آلیاژ 316 SS استفاده کرده است بدون اینکه مشکل قابل توجهی ناشی از سایش وجود داشته باشد [۴][۶].

پ) Rizk & Gabert(1987) در مورد چاه‌های تولیدی گاز ترش میدان Ummshaif در ابوظبی مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که تکمیل چاه با آلیاژهای CRA می‌تواند مناسب باشد. آن‌ها از رابطه‌ی پیشنهادی API با مقدار C=۱۲۰ برای طراحی قطر لوله مغزی استفاده کردند [۷].

ت) در منطقه خانگیران در یک برهه زمانی، به دلیل نیاز به افزایش تولید، طبق یک برنامه ریزی مدون و با کنترل های لازم مبادرت به افزایش تولید از چاهها شد. طبق محاسبات انجام شده، میزان سرعت گاز در تاسیسات در این حالت، دوبرابر مقدار تعیین شده از سوی شرکت نفت مناطق نفتخیز بود. ضخامت سنجی های مستمر واحد بازرسی فنی و گزارش عدم کاهش ضخامت غیر عادی در تاسیسات، نشان داد که ضریب C که قبلا بین۱۲۵-۱۰۰ انتخاب می شد می تواند قابل افزایش به میزان حداقل ۱۶۰ باشد [۸].

---

[۱] Continuous
[۲] Intermittent

www.SID.ir

Archive of SID

۳- بحث و نتایج

به دلیل ویژگی‌های سنگ مخزن در میدان پارس جنوبی، تولید ماسه ناچیز بوده و می‌توان از رابطه‌ی پیشنهادی API که برای سیستم‌های بدون شن ارائه شده است استفاده کرد. فرمول پیشنهادی API برای محاسبه‌ی حداکثر دبی مجاز جهت جلوگیری از سایش در سیستم تولید استفاده می‌شود. در این مطالعه حداکثر دبی مجاز از منظر پدیده‌ی سایش بررسی خواهد شد. به دلیل افت فشار در رشته‌ی تولیدی، تاج چاه در مقایسه با سایر قسمت‌های بالادستی چاه دارای کمترین فشار و در نتیجه بیشترین سرعت گاز می‌باشد. بنابراین تاج چاه یکی از نقاط با پتانسیل بالا برای سایش بوده و دبی مجاز برای جلوگیری از سایش در این قسمت از رشته‌ی تکمیل بررسی می‌شود. اگر پدیده‌ی سایش در این بخش از رشته‌ی تکمیل کنترل شود در سایر قسمت‌ها سایش به‌وجود نخواهد آمد. جنس رشته‌ی تکمیل در چاه‌های گاز پارس جنوبی، آلیاژ مقاوم CRA می‌باشد که می‌تواند از خوردگی رشته‌ی تولیدی در برابر گازهای خورنده مانند CO_2 و H_2S محافظت کند. به‌خاطر ویژگی‌های ذاتی سنگ مخزن کربناته‌ی میدان، تولید ماسه بسیار بعید می‌باشد. همچنین هیچ گزارشی از تولید ماسه و تشکیل رسوب در تأسیسات پایین‌دستی نشده است. تست آزمایشگاهی رسوب به‌دست آمده از پیگ‌رانی خطوط لوله دریایی، مقدار اندک سیلیس و مواد نا-محلول را نشان می‌دهد که بیانگر تولید ناچیز ماسه می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱: ترکیب رسوب تشکیل شده در خطوط لوله دریایی

جزء	درصد جرمی
Na^+	۸/۹
K^+	۲/۵
Fe_2O_3	۰/۸۰
SO_4^{-2}	۱۴/۷۶
Ca^{2+}	۵۶
Mg^{2+}	۶/۸۰
CO_3^{-2}	۷/۱۰
HC (organic)	۱/۳۳
Si and insoluble compounds	۱/۴۰
Other compounds	۰/۴۱

با توجه به موارد گفته شده مقدار C=۱۵۰ برای رشته‌ی تکمیل انتخاب می‌شود. همچنین مقدار C=۱۲۵ برای حاشیه‌ی امنیت بیشتر نیز بررسی می‌شود. سرعت بحرانی سایش و چگالی مخلوط دوفازی در فشار سرچاهی از روابط (۱) و (۲)محاسبه می‌شوند. داده‌های سیال و تولید یک چاه نمونه در محاسبات استفاده شده‌اند:

Q_g= ۱۰۰ MMSCFD; Q_o= ۲۸۰۰ STBD; Q_w= ۲۸ STBD

S_g= ۰/۶۷γ_o= ۰/۷۷γ_w= ۱/۰۶

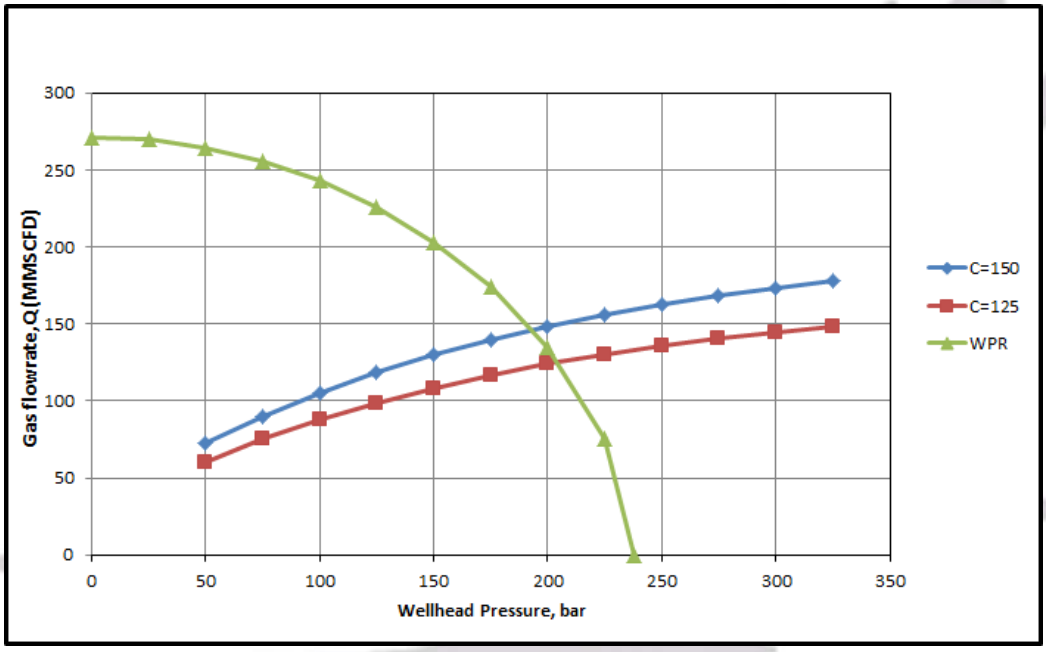
Pipe internal diameter = ۶/۱۸۴"

www.SID.ir

Archive of SID

Operating temperature = ۸۰ ˚C

سپس دبی بحرانی سایش در فشارهای مختلف سرچاهی به کمک معادله‌ی (۴) محاسبه شد. با تقاطع منحنی عملکرد چاه برای چاه نمونه و منحنی فشار سرچاهی– دبی بحرانی سایش، حداکثر دبی مجاز برای جلوگیری از سایش در فشار متناظر سرچاهی به‌دست می‌آید. منحنی عملکرد چاه با استفاده از تطابق داده‌های تست سرچاهی چاه نمونه با معادله Rawlin تشکیل می‌شود[۹]. برای دبی‌های کمتر از مقدار مجاز تولید ایمن بوده و نگرانی‌ای نسبت به سایش وجود نخواهد داشت. **Error! Unknown switch argument.** حداکثر دبی مجاز به‌دست آمده از تقاطع منحنی‌های عملکرد و منحنی فشار سرچاهی– دبی بحرانی سایش را برای چاه نمونه نشان می‌دهد (Q=۱۴۷ MMSCFD، P_{wh}=۱۹۳/۳ barg برای C=۱۵۰).



شکل ۱: حداکثر دبی مجاز برای جلوگیری از سایش

حداکثر دبی مجاز برای چاه نمونه‌ی مورد مطالعه از مقدار طراحی شده‌ی اولیه برای هر چاه به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر می‌باشد. بنابراین با تولید ۱۰۰ میلیون فوت مکعب از هر چاه نگرانی‌ای در مورد سایش وجود ندارد. همچنین برای حالت C=۱۲۵=۱۲۵/۷ میلیون فوت مکعب محاسبه می‌شود که نشان دهنده‌ی تولید ایمن بدون نگرانی-Q_g حداکثر دبی مجاز برابر با ای در مورد سایش می‌باشد.

موضوع دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد این است که منحنی عملکرد چاه براساس رفتار کنونی مخزن می‌باشد. با تولید از مخزن و افت فشار به‌وجود آمده، منحنی عملکرد چاه تغییر کرده و به سمت پایین میل می‌کند (**Error! Unknown switch argument.**) که به نوبه‌ی خود سبب کاهش حداکثر دبی مجاز جهت جلوگیری از سایش می‌شود. بنابراین محاسبه‌ی حداکثر دبی مجاز برای جلوگیری از سایش در سال‌های آتی عمر میدان ضروری می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج اصلی این مطالعه به صورت زیر می‌باشند:

www.SID.ir

Archive of SID

۱. با درنظر گرفتن ویژگی‌های سنگ کربناته‌ی مخزن و گزارش‌های موجود، تولید ماسه ناچیز بوده و رابطه‌ی پیشنهادی API می‌تواند برای محاسبه‌ی سرعت بحرانی سایش مورد استفاده قرار گیرد.
۲. با احتساب رشته‌ی تکمیل CRA و تولید ناچیز ماسه از مخزن، بر اساس راهکارهای API، مقدار C=۱۵۰ برای رابطه-ی پیشنهادی API انتخاب شده است.
۳. رسم منحنی عملکرد چاه در کنار نمودار فشار سرچاهی– دبی بحرانی سایش نشان می‌دهد که حداکثر دبی مجاز سایش از مقدار طراحی شده‌ی اولیه به مقدار قابل توجهی بیشتر بوده و نگرانی‌ای در مورد سایش وجود ندارد.
۴. به دلیل تغییر منحنی عملکرد چاه با گذشت عمر مخزن، محاسبه‌ی حداکثر دبی مجاز برای جلوگیری از سایش در طول عمر مخزن به صورت دوره‌ای لازم می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

۵- فهرست علائم و اختصارات

سطح مقطع، ft^2	A
ثابت تجربی، $(lb_m/ft.s)^2$	C
دبی جرمی، lb_m/s	$\dot{m}$
فشار، psia	P
دبی مجاز گاز خشک، MMSCFD	$Q_{dry\ gas}$
دبی گاز تولیدی، MMSCFD	q_g
دبی میعانات گازی، STBD	q_o
دبی آب تولیدی، STBD	q_w
نسبت گاز به مایع در شرایط استاندارد، SCF/STB	R
وزن مخصوص گاز در شرایط استاندارد	S_g
وزن مخصوص مایع در شرایط استاندارد	S_l
دمای عملیاتی، $^\circ R$	T
سرعت بحرانی سایش، ft/s	V_e
برش آب (کسری)	WC
ضریب تراکم‌پذیری گاز	Z
وزن مخصوص نفت در شرایط استاندارد	γ_o
وزن مخصوص آب در شرایط استاندارد	γ_w
چگالی مخلوط دوفازی، lb_m/ft^3	ρ_m

www.SID.ir

Archive of SID

۶- مراجع

[۱]Salama M.M., Venkatesh E.S., "Evaluation of API RP 14E Erosional Velocity Limitations for Offshore Gas Wells", 15th Annual OTC, Housten, Texas, 1983.
[۲]API, "API Recommended Practice 14E (RP 14E)", in, October,1991.
[۳]Terziev I., Taggart l., "Improved Procedures for Estimating the Erosional Rates in High Offtake Gas Wells: Application of University of Tulsa Flow Loop Derived Correlations", SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference, SPE 88492, Perth, Australia, 2004.
[۴]Buckingham C., Deffenbaugh" ,A Study of the Erosional-Corrosional Velocity Criterion for Sizing Multi-Phase Flow Lines", in, Minerals Management Service, Virginia, 1989.
[۵]Svedeman A.j., "Experimental Study of the Erosional-Corrosional Velocity Criterion for Sizing Multi-Phase FlowLines-PHASE II", in, Southest Research Institute, Dallas, Texas, 1993.
[۶]Salama M.M., "An Alternative to API 14E Erosional Velocity Limits for Sand Laden Fluids", Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 4-7 May 1998.
[۷]Rizk G.A., Gabert R.F" ,.Completion Design for Ummshaif Khuff Gas Producers/Uweinat Injectors", Fifth SPE Middle East Oil Show, SPE 15754, Manama, Bahrain, March 7-10, 1987.
[۸] ایرج گ., "طرح پژوهشی بررسی امکان بهره برداری از چاههای گازی پارس جنوبی با استفاده از لوله مغـزی "۸/۵ ۹", اولـین همـایش تخصصی گاز ایران, دانشگاه شیراز, ۲۰۰۶.
[۹]Rawlins E.L., Schellhardt M.A., "Back Pressure on Natural Gas Well and Their Application to Production Practices", U.S. Bureau of Mines, 1936.

www.SID.ir