شبیه‌سازی عددی و آنالیز حساسیت فرایند احتراق درجا در یک سیستم آزمایشگاهی

احسان کاشانی‌نیا، امیر صرافی*، علی محبی

کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی، بخش مهندسی شیمی

پیام نگار: **sarafi@mail.uk.ac.ir**

چکیده

پیچیدگی‌های فرایند احتراق درجا در مخازن نفت سنگین موجب شده است تا محققان جهت بررسی این فرایند به شبیه‌سازی عددی، در مقایسه با مدل‌سازی آزمایشگاهی، گرایش بیشتری داشته باشند. از سوی دیگر توسعه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مخازن نفت و گاز این تمایل را افزایش داده است. در این تحقیق با ساخت یک مدل به وسیله شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار، به بررسی تغییرات تولید به روش احتراق درجا در اثر تغییر برخی پارامترها پرداخته‌شده است. به بیان دیگر با انجام آنالیز حساسیت، میزان اهمیت این تغییرات ارزیابی شده است. متغیرهای عملیاتی که در این تحقیق به آنها پرداخته‌شده است عبارتنداز: درجه پیش‌گرمایش، پیش‌گرمایش با استفاده از بخارآب، شدت جریان هوای تزریقی، همچنین مقایسه تزریق هوای معمولی در مقابل هوای غنی‌شده (اکسیژن با درصد بالاتر).

کلمات کلیدی: احتراق درجا، نفت سنگین، بررسی حساسیت، جبهه احتراق

۱- مقدمه

مخازن نفت سنگین در تأمین انرژی جهان، در حال حاضر، نقشی اساسی دارند و با توجه به محدودیت مخازن نفت سبک، این نقش در آینده ای نه چندان دور بسیار مهمتر و پر رنگ‌تر خواهد بود. با توجه به خصوصیات مخازن نفت سنگین به ویژه گرانروی بسیار بالای نفت درجای آنها، معمولاً مکانیزم‌های موجود برای بهره برداری از مخازن نفت سبک در مورد آنها چندان کارایی نخواهد داشت. جهت استخراج و افزایش بهره‌برداری از اینگونه مخازن، فرایندهای گرمایی در نیمه دوم قرن گذشته مورد توجه قرار گرفتند. با توجه به حساسیت بالای گرانروی نفت سنگین به تغییرات دمایی، اینگونه روش‌ها با ایجاد حرارت در درون مخزن یا انتقال حرارت به مخزن، گرانروی نفت را تا حد امکان پایین آورده و تولید آن را ممکن می‌سازند[۱].

فرایند احتراق درجا به عنوان نخستین فرایند گرمایی در بسیاری از مخازن نفت سنگین دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش با سوزاندن قسمتی از نفت، انرژی مورد نیاز جهت تولید مابقی نفت درون مخزن تامین می‌گردد[۲]. در حالت سادهٔ این فرایند، دو چاه حفر می‌گردد. چاه اول که چاه تزریقی خوانده می‌شود جهت تزریق یک سیال حاوی اکسیژن و چاه دوم که چاه تولیدی نام دارد جهت تولید نفت مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت ایجاد احتراق از یک جرقه‌ساز در چاه تزریقی استفاده می‌شود[۳].

شبیه‌سازی فرایندهای گرمایی به‌صورت آزمایشگاهی، عددی و همچنین تحلیلی بسیار پیچیده است. تلاش‌های بسیاری در این زمینه در دهه‌های گذشته صورت گرفته است. از جمله می‌توان به مطالعات بوسعید و ریمی اشاره کرد[۴]. آنها سینتیک واکنش اکسایش را در این فرایند بررسی کردند و سرعت واکنش بین کربن

Archive of SID
www.

و اکسیژن را در محیط متخلخل محاسبه نمودند. آنها به این نکته اشاره کرده‌اند که سرعت احتراق نفت خام در محیط متخلخل به غلظت کربن، دمای احتراق و فشار جزئی اکسیژن بستگی دارد. همچنین دریافتند که اثر کاتالیزگری رس در احتراق نفت بسیار قابل توجه است. طبق مشاهدات آنها افزودن ۲۰٪ رس به سنگ مخزن باعث کاهش ده درصد در انرژی فعالسازی واکنش احتراق می‌شود. بگسی و همکارانش فرایند احتراق را در سنگ آهک حاوی نفت سنگین به‌صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند و سه ناحیهٔ را مشخص کردند. دمای پایین، دمای بالا و یک ناحیهٔ گذار بین این دو که در آن سوخت ذخیره‌سازی می‌شود و دما افزایش می‌یابد. آنها دریافتند که برای نفت‌های مختلف میزان اکسیژن مصرفی بیشتر از اکسیدهای کربن تولیدی در دمای پایین است که جزء خصوصیات واکنش‌های دما پایین است و در اکسایش در دمای بالا میزان اکسیژن مصرفی با افزایش درجهٔ API افزایش می‌یابد[۵]. در یک تحقیق جدید، مصطفوی و همکارانش فرایند احتراق درجا را در مخازن کربناتهٔ حاوی نفت سنگین بررسی کردند. در این تحقیق آنها دریافتند که در طی این فرایند خطر تجزیهٔ سنگ مخزن وجود ندارد. همچنین آنها دریافتند که اثر رس در کم کردن انرژی فعالسازی و بالا بردن حداکثر دمای احتراق قابل توجه است[۶]. در سال ۱۹۸۰، کوتز یک مدل کاملاً ضمنی برای احتراق درجا طراحی کردند که احتراق خشک پیشرو، احتراق مرطوب و احتراق معکوس را در یک، دو و سه فاز شبیه‌سازی می‌کرد. در این مدل، هر تعداد جزء با هر تعداد واکنش قابل اعمال بود[۷]. در این تحقیق شبیه‌سازی عددی این فرایند با نرم‌افزار انجام شده است و پس از ساخت کامل مدل، حساسیت نتایج نسبت به پارامترهای مختلف از قبیل سرعت تزریق درصد اکسیژن و شدت جریان هوای تزریقی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- ساخت مدل

جهت ساخت مدل در این تحقیق از بسته نرم‌افزارهای CMG استفاده شده است. این بسته شامل چهار نرم‌افزار شبیه ساز به نامهای IMEX، GEM، STARS و WIN PROP است. نرم‌افزار IMEX جهت شبیه‌سازی مدل نفت سیاه، GEM جهت شبیه‌سازی مدل نفت ترکیبی، STARS جهت شبیه‌سازی فرایندهای گرمایی و WIN PROP جهت ساخت مدل‌های PVT سیالات کاربرد دارند. با توجه به نیاز این تحقیق از نرم‌افزار شبیه‌سازی STARS استفاده شده است. از آنجا که در مدلسازی آزمایشگاهی فرایند احتراق درجا از محفظه احتراق[1] استفاده می‌شود، یک نمونه از این محفظه با ابعاد ۱×۰/۸۴×۰/۵۵ فوت به‌عنوان بلوک شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که در مدل‌های آزمایشگاهی جهت پایداری بیشتر، هوای تزریقی از بالا تزریق می‌شود و محصولات از پایین محفظه تولید می‌گردند. این روش اصطلاحاً (Top-Down) نام دارد. در مدل نرم‌افزاری نیز چاه تزریقی در ردیف اول گریدها و چاه تولیدی در پایین‌ترین ردیف گریدها تعریف شده است. جهت شباهت هرچه بیشتر با مخازن نفت سنگین ایران میزان تخلخل ۰/۴۱ و میزان نفوذپذیری بلوک ۱۲۷۰ md در نظر گرفته شده است. سایر مشخصات مدل در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- مشخصات کلی مدل آزمایشگاهی

ابعاد توده سنگی (cm)	۱۶/۷ × ۲۵/۶ × ۳۰/۵
تخلخل (درصد)	۰/۴۱۴۲
نفوذپذیری (md)	۱۲۷۰
گرانروی سیال در شرایط اولیه مخزن (cp)	۲۲۵۰
فشار اولیه (psi)	۳۱۴/۷
دمای اولیه (°F)	۱۴۰
شدت جریان اولیه تزریق هوا (L/min)	۴/۸

روش‌های گرمایی تحلیل ثقل سنجی گرمایی یا تحلیل اختلاف گرماسنجی انرژی تولید شده یا مصرف شده توسط نفت را با توجه به اینکه دمای آن در محیط گازی اکسیدکننده افزایش می‌یابد اندازه‌گیری می‌کنند. با استفاده از این روش‌ها می‌توان معادله سینتیک واکنش را به دست آورد[۸]. در این روش یک معادلهٔ توانی واکنش با مرتبهٔ نامعلوم در نظر گرفته می‌شود. ثابت واکنش، تابع دما در نظر گرفته می‌شود و بر اساس معادلهٔ آرنیوس:

1. Combustion Tube

www.SID.ir

$$-\frac{d\alpha}{dt} = K\alpha^{n} P_{O_2}^{m} A^{l}$$

$$\alpha = \frac{W - W_f}{W_i - W_f}$$

$$K = F_f \exp(\frac{-E}{RT})$$

A = سطح ویژهٔ دانهٔ سنگ

l, n, m = ثابت‌های توان که باید اندازه‌گیری شوند

W = وزن واکنشگر در هر زمان

W_f = وزن نهایی نفت خام یا مخلوط سنگ

W_i = وزن اولیهٔ نفت خام یا مخلوط سنگ

α و $\frac{d\alpha}{dt}$ مستقیماً از منحنی‌های تحلیل ثقل سنجی گرمایی و اختلاف ثقل سنجی گرمایی خوانده می‌شوند. اگر از روش تحلیل اختلاف گرماسنجی استفاده شود مدل به‌صورت زیر خواهد بود.

$$-\frac{dH}{dt} = KH^{n} P_{O_2}^{m} A^{l}$$

که dH/dt سرعت گرمای آزاد شده بر حسب زمان و H آنتالپی آزاد شده در هر لحظه است. H نسبت مستقیم با α دارد و H و $\frac{dH}{dt}$ را مستقیماً از گراف‌های تحلیل اختلاف گرماسنجی می‌توان خواند.

۲-۱ بررسی سیستم درجه‌بندی وانتخاب بهینهٔ آن

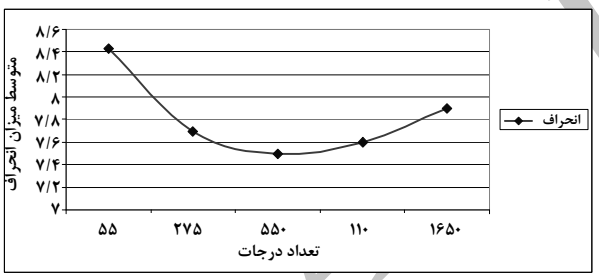
ابتدا به بررسی درجه‌بندی‌های مختلف پرداخته شد تا از بین آنها، مدل بهینه درجه‌بندی به دست آید. چهار مدل با درجه‌بندی‌های مختلف در نظر گرفته شد و نتایج حاصل از اجرای آنها با هم مقایسه شدند. مشخصات مدل که در جدول (۱) آمده است در درجه‌بندی‌های مختلف ثابت است. توضیحات مربوط به این مدل‌ها اعم از تعداد درجه‌های آنها و نام این مدل‌ها در جدول (۲) آمده است. سپس با اجرای مدل‌هایی که با این نوع درجه‌بندی‌ها ساخته شده‌اند میزان تولید تجمعی و شدت جریان روزانه نفت در آنها را به دست آورده وبا هم مقایسه کردند. در شکل (۲) و (۳) میزان شدت جریان نفت تولیدی و درصد بازیافت در طی شصت ساعت شبیه‌سازی در مقابل تعداد درجه‌ها رسم شده است. افزایش تعداد درجه‌ها به هر میزانی الزاماً موجب کاهش خطا نمی‌شود[۹]. از سوی دیگر با افزایش تعداد درجه‌ها، تعداد معادلات چاه و مخزن افزایش یافته و در نتیجه زمان اجرا بالا می‌رود. بنابراین، به دست آوردن درجه‌بندی بهینه امری حیاتی است. از این رو میزان خطا نسبت به داده‌های آزمایشگاهی تولید تجمعی برای پنج نوع درجه‌بندی مختلف براساس رابطه متوسط خطا (۱) محاسبه گردید. مقادیر به دست آمدهٔ خطا برای هر نوع درجه‌بندی در شکل (۱) آمده است. با توجه به شکل (۱) مناسب‌ترین درجه‌بندی، ریز یکنواخت است که کمترین خطا را نسبت به داده‌های آزمایشگاهی تولید تجمعی دارد. تعداد درجه‌ها در این مدل ۵۵۰ (۵۰×۱×۱۱) می‌باشد.

$$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(m_{ei} - m_{si}\right)^2}}{n} \qquad (۱)$$

m_{ei} = جرم تجمعی تولیدی براساس اندازه‌گیری آزمایشگاهی در لحظه i

m_{si} = جرم تجمعی تولیدی بر اساس محاسبه شبیه ساز در لحظه i

n = تعداد نقاط



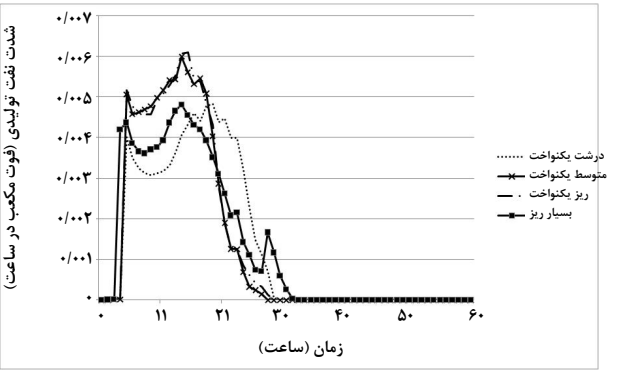
شکل ۱- مقایسه میزان خطا در پنج نوع درجه‌بندی

جدول ۲- مشخصات درجه‌بندی‌های مختلف

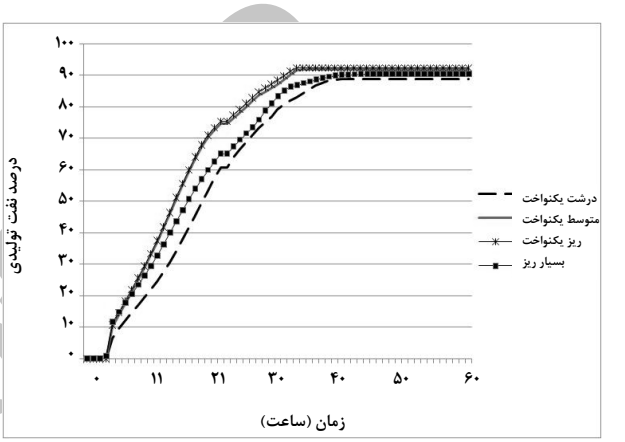
نوع درجه‌بندی	تعداد درجه
درشت یکنواخت	۵۵
متوسط یکنواخت	۲۷۵
ریز یکنواخت	۵۵۰
بسیار ریز	۱۶۵۰

Archive of SID

www.



شکل ۲- اثر درجه‌بندی‌های مختلف بر شدت جریان تولیدی

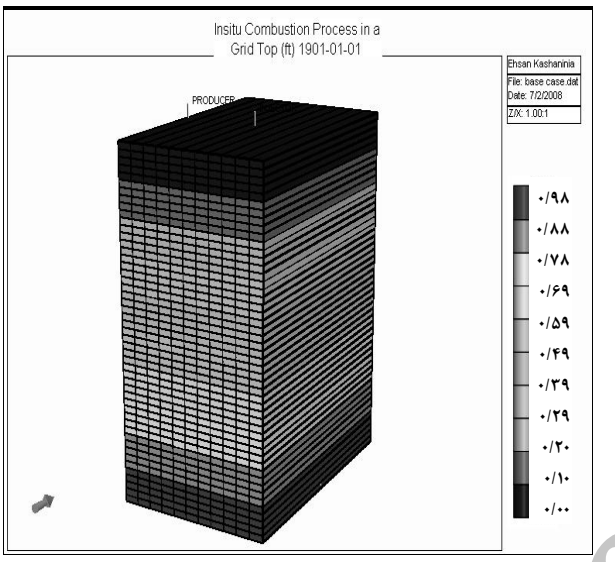


شکل ۳- اثر درجه‌بندی‌های مختلف بر تولید تجمعی

با توجه به شکل (۲) مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد درجه‌ها میزان تولید روزانه افزایش یافته و همچنین همانطور که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود این درجه‌بندی بیشترین تولید تجمعی را نشان می‌دهد که این نیز نشانگر صحت این نوع درجه‌بندی است. لازم به ذکر است که بین دو نوع درجه‌بندی ریز یکنواخت و بسیار ریز، درجه‌بندی ریز یکنواخت ارجح‌تر است به دلیل اینکه از شدت جریان و بازیافت نسبی بالاتری برخوردار است.

همانطور که اشاره شد با افزایش تعداد درجات، تعداد معادلات چاه ومخزن افزایش یافته و در نتیجه مدت اجرا بالا می‌رود. بنابراین به دست آوردن درجه‌بندی بهینه امری حیاتی است. به هر حال با توجه به شکل‌های (۱) تا (۳) مناسب‌ترین درجه‌بندی، ریز یکنواخت می‌باشد. تعداد درجات در این مدل ۵۵۰ (۵۰×۱×۱۱) می‌باشد.

مخزن مورد مطالعه در شبیه‌ساز STARS در حقیقت الگویی است از تعداد زیادی الگو[1] که در میدان، توسعه یافته‌اند، بنابراین شرط مرزی برای شبیه‌سازی هر یک از این الگوها به‌صورت مرز بدون جریان[2] می‌باشد. در ادامه به آنالیز حساسیت در فرایند احتراق درجا پرداخته شده است.



شکل ۴- درجه‌بندی مخزن به‌صورت ریزیکنواخت (3D view)

۳- بررسی متغیرهای عملیاتی و تأثیر آنها بر ISC

۳-۱ بررسی اثر درجه پیش‌گرمایش

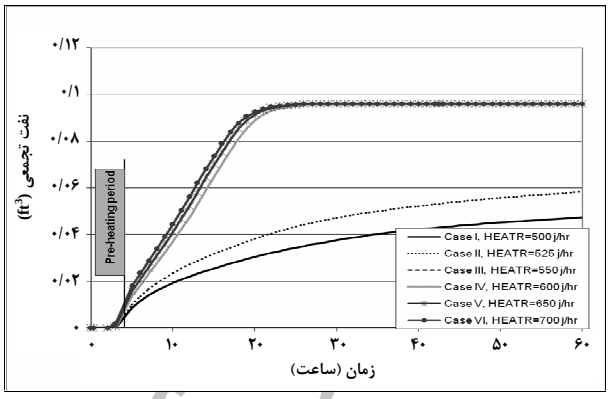
در این بخش به بررسی درجه پیش‌گرمایش و اثر میزان گرمای اولیه که به سیستم وارد می‌شود پرداخته شده است. پیش‌گرمایش مرحله‌ای از روند اجرای پروژه است که در آن با گرم کردن قسمتی از مخزن شرایط اولیه برای شروع عمل احتراق فراهم می‌گردد. این مرحله به دو صورت می‌تواند انجام گیرد؛ پیش‌گرمایش به روش الکتریکی و یا با تزریق بخار آب.

در این قسمت به پیش‌گرمایش به روش الکتریکی پرداخته شده که در نرم‌افزار STARS با کلیدواژه HEATR ضریب انتقال گرما را به درجه‌های مدل نسبت می‌دهیم. با تغییر این عدد و شبیه‌سازی مدلهای مختلف اثر درجه پیش‌گرمایش را بر احتراق درجا مطالعه می‌کنیم. پنج حالت متفاوت برای درجه پیش‌گرمایش را در نظر می‌گیریم، بقیه خواص سنگ، سیال و مخزن با هم یکسانند. مقدار ضریب انتقال گرما در حالات مختلف به ترتیب برابر است با

1. Pattern
2. No-Flow Boundary

www.SID.ir
Archive of SID

(j/day)۵۰۰، ۵۵۰، ۶۰۰، ۶۵۰ و ۷۰۰. گرما با این نرخ‌های انتقال گرما و به مدت ۳ ساعت و به روش گرماساز الکتریکی در بالای مدل قرار داده شده و با افزایش دما شرایط را برای شروع احتراق آماده می‌کند. در شکل (۵) رابطه بین درجه پیش‌گرمایش و مقدار نفت (تولیدی- تجمعی) را نشان می‌دهد.



شکل ۵- اثر درجه پیش‌گرمایش بر فرایند احتراق درجا

همانطور که در شکل (۵) می‌بینیم با تغییر درجه پیش‌گرمایش مقدار نفت تولیدی تغییر می‌کند و این به دلیل تغییر در زمان شروع احتراق می‌باشد. هرچه درجه پیش‌گرمایش بیشتر باشد جبهه احتراق زودتر تشکیل شده و در نتیجه نفت زودتر تولید می‌شود. البته به این نکته نیز باید توجه داشت که اگر درجه پیش‌گرمایش از یک حدی پایین‌تر باشد جبهه احتراق تشکیل نشده و تولید به روش احتراق درجا آغاز نمی‌گردد. این نکته را می‌توان در منحنی حالتI در شکل (۵) ملاحظه کرد. و همچنین، اگر درجه پیش‌گرمایش از حدی فراتر رود چندان به تولید کمکی نمی‌کند و شکل مربوط به حالت V مؤید این نکته است.

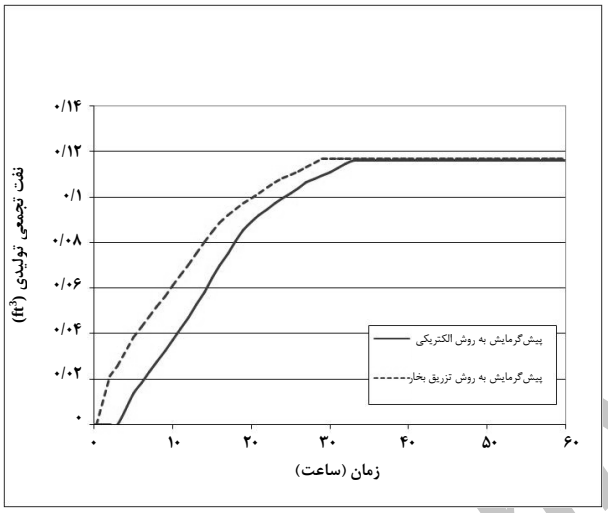
۳-۲ بررسی نوع پیش‌گرمایش

همانطور که قبلا هم ذکر شد برای فاز پیش‌گرمایش می‌توان از دو روش استفاده کرد؛ اول پیش‌گرمایش به روش الکتریکی و دوم به روش تزریق بخار آب. حال در این قسمت می‌خواهیم این دو روش را با هم مقایسه کنیم و تفاوت‌های آنها را مورد بررسی قرار دهیم.

در بخش قبلی در مورد پیش‌گرمایش به روش الکتریکی بحث شد و در اینجا فقط در مورد پیش‌گرمایش با بخار آب بحث خواهیم کرد.

در ابتدا بخار آب با شدت جریان ۰/۰۱(ft^3/hr) از چاه تزریقی در بالای مدل برای مدت ۲ ساعت وارد مخزن شده و با دمای بالایی که داراست باعث گرم شدن نسبی محیط اطراف چاه تزریقی می‌شود و بعد از ۱ ساعت فاز خیس خوردگی[1] با تزریق هوای حاوی اکسیژن، جبهه احتراق تشکیل می‌شود و درنتیجه با انتقال حرارت ناشی از آن، مخزن گرم شده و نفت به سوی چاه تولیدی جریان می‌یابد.

لازم به ذکر است که مدت زمان تزریق و خیس‌خوردگی محیط متخلخل در این روش با پیش‌گرمایش به روش الکتریکی یکسان، و برابر ۳ ساعت می‌باشد. در شکل (۶) میزان بازدهی این دو روش با هم مقایسه شده‌اند.



شکل ۶- مقایسه دو روش مختلف پیش‌گرمایش و تأثیر آن بر تولید

همانطور که در این شکل ملاحظه می‌کنیم میزان تولید هنگامی که برای پیش‌گرمایش از روش تزریق بخار استفاده می‌شود بیشتر است. یکی از دلایل آن این است که در تزریق بخار از همان زمان اولیه که فرایند تزریق آغاز می‌گردد با نیروی رانشی که بخار ایجاد می‌کند نفت به سمت چاه تولیدی حرکت داده می‌شود. دلیل دیگر آن می‌تواند وجود نوع دیگری از انتقال گرما به نام انتقال همرفت[2] در روش تزریق بخار باشد که باعث می‌شود دمای نواحی اطراف چاه تزریقی به میزان مناسبی بالا رفته و زمینهٔ لازم برای تشکیل جبهه احتراق را فراهم کند، زیرا همانطور که می‌دانیم اگر دما به حد کافی

1. Soak
2. Convection Heat Transfer

Archive of SID

www.

نرسد جبهه احتراق تشکیل نمی‌شود و یا اینکه پایدار نمی‌ماند.

با توجه به نکات اشاره شده در این بخش نتیجه می‌گیریم که تا حد امکان بهتر است برای فاز پیش‌گرمایش از روش تزریق بخار استفاده شود.

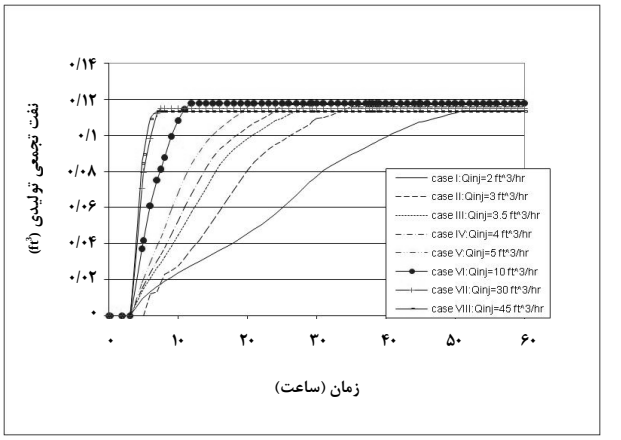
۳-۳ بررسی اثر شدت جریان هوای تزریقی

شدت جریان هوای تزریقی یکی از مهم‌ترین پارامترهای عملیاتی در فرایند احتراق درجا می‌باشد. این مقدار باید به اندازه‌ای باشد که اکسیژن مورد نیاز برای انجام واکنش‌های دما پایین (LTO) و همچنین دما بالا (HTO) را مهیا کند. در غیر این صورت جبهه احتراق یا تشکیل نمی‌شود و یا اینکه اگر تشکیل شود بعد از مدتی خاموش می‌گردد. البته شدت جریان بالا نیز باعث ناپایداری روند پیشروی جبهه احتراق می‌گردد.

با افزایش شدت جریان هوای تزریقی انتظار می‌رود که تولید نفت افزایش یابد زیرا اکسیژن کافی فراهم می‌شود تا واکنش‌ها انجام شوند ولی شدت جریان تزریقی نباید از یک حد آستانه[1] فراتر رود چون اگر شدت جریان خیلی بالا باشد هوا با سرعت زیاد وارد فضای متخلخل شده و به‌صورت نفوذآنی[2] از چاه تولیدی خارج می‌شود. این، یعنی اینکه اکسیژن بدون تأثیر بر انجام واکنش‌های سوختن از مخزن خارج می‌شود و امکان دارد در این حالت حتی جبهه آتش، خاموش گردد. این نکته را در شکل (۷) می‌توان ملاحظه کرد. شایان ذکر است که سایر مشخصات مدل که در جدول (۱) آمده است ثابت می‌باشند.

با توجه به این شکل می‌بینیم که با افزایش شدت جریان هوا از ۱۰(ft^3/hr) به ۳۰ و ۴۵(ft^3/hr) نه تنها تولید افزایش نیافته بلکه حتی کاهش یافته است. همچنین با دقت به شکل می‌بینیم که با افزایش هرچه بیشتر شدت جریان، زمان نفوذآنی کاهش می‌یابد یعنی سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

در جدول (۳) حالات مختلف شدت جریان تزریق و مقدار آنها ذکر شده است.



شکل ۷- بررسی اثر شدت جریان هوای تزریقی بر فرایند احتراق درجا

جدول ۳- مقادیر مختلف شدت جریان تزریقی بخار

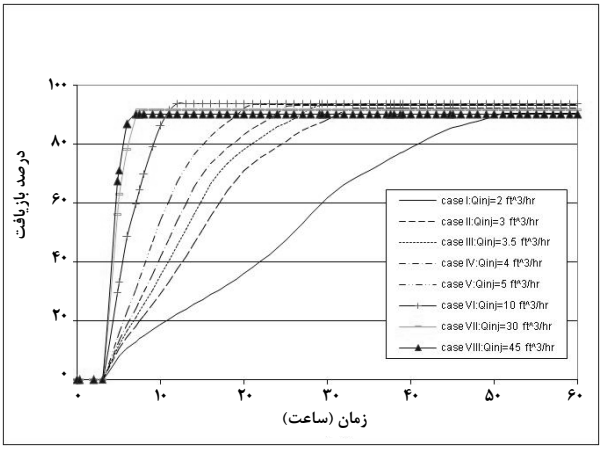
حالت‌های مختلف شدت جریان	شدت جریان نفت تزریقی (فوت مکعب در ساعت)
حالت I	۲
حالت II	۳
حالت III	۳,۵
حالت IV	۴
حالت V	۵
حالت VI	۱۰
حالت VII	۳۰
حالت VIII	۴۰

در شکل (۸) نیز با نمایش درصد بازیافت به ازای شدت جریان‌های تزریقی مختلف می‌توان به نتایج ذکرشده در بالا پی برد. در شکل (۹) نیز شدت جریان نفت تولیدی را می‌توان مشاهده کرد. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش شدت جریان تزریق هوا به بالاتر از ۵ فوت مکعب در ساعت، شدت جریان تولید نفت در زمانهای اولیه به شدت افزایش یافته و ناگهان کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند ناشی از فشار پیستونی هوای تزریقی به نفت و نفوذ آنی سریع آن به انتهای بلوک باشد.

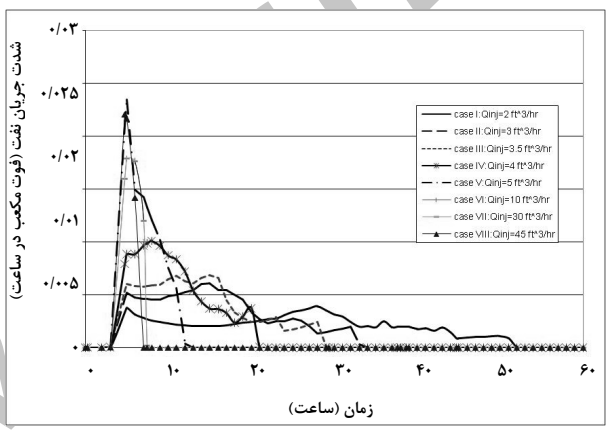
از مقایسه شکل‌های (۷) تا (۹) مشاهده می‌شود که بهترین بازیافت و تولید مربوط به حالت ششم یعنی حالتی است که شدت جریان تزریقی در آن ۱۰(ft^3/hr) می‌باشد.

1. Maximum Critical Injection Rate
2. Break Through

www.SID.ir
Archive of SID



شکل ۸ - اثر شدت جریان هوای تزریقی بر درصد بازیافت فرایند احتراق درجا

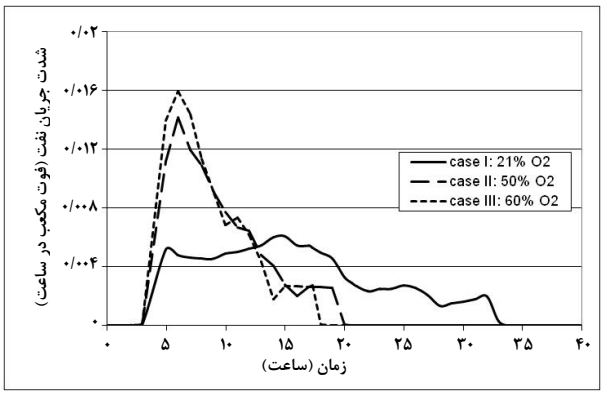


شکل ۹- اثر شدت جریان هوای تزریقی بر شدت جریان نفت تولیدی در فرایند احتراق درجا

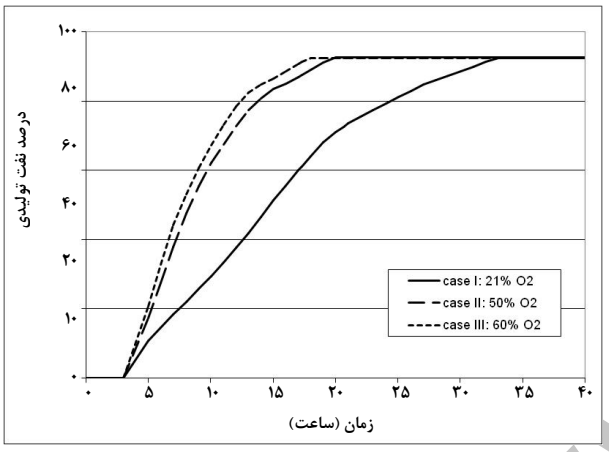
۳-۴ مقایسه تزریق هوای معمولی در مقابل هوای غنی‌شده

در این قسمت به مقایسه تزریق هوای معمولی که درصد اکسیژن آن ۲۱٪ است و در مقابل، هوای تزریقی غنی‌شده دارای اکسیژن ۵۰٪ و ۶۰٪ می‌پردازیم. سایر مشخصات مدل که در جدول (۱) آمده است ثابت می‌باشند. همانطور که در شکل (۱۰) ملاحظه می‌کنیم با افزایش درصد اکسیژن، شدت جریان تولیدی نیز افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش درصد اکسیژن در هوای تزریقی، اکسیژن بیشتری برای انجام واکنش‌های LTO و HTO فراهم آمده و این واکنش‌ها بهتر انجام می‌شوند.

با توجه به دو شکل (۱۰) و (۱۱) مشاهده می‌کنیم که افزایش میزان اکسیژن ورودی به سیستم، باعث می‌گردد که واکنش‌های احتراق سریع‌تر انجام شوند و در زمان کوتاه‌تری به بازیافت نهایی برسیم.



شکل ۱۰- مقایسه شدت جریان تولیدی هوای معمولی و غنی‌شده



شکل ۱۱- مقایسه درصد بازیافت هوای معمولی و غنی‌شده

۳-۵ اثر گرانروی

در برخی از فرایندهای ازدیاد برداشت همانند سیلاب زنی یا تزریق بسپار یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که بر تولید نفت ازمخازن نفت سنگین تأثیر بسزایی دارد گرانروی نفت اولیه پیش از اعمال فرایند است. هفت مدل مختلف با گرانروی‌های متفاوت با STARS شبیه‌سازی شده‌اند که اطلاعات آن در جدول (۴) ارائه شده است. سایر مشخصات مدل که در جدول (۱) آمده است ثابت می‌باشند. همانطور که در شکل (۱۲) ملاحظه می‌شود هرچه گرانروی نفت سنگین افزایش می‌یابد شدت جریان تولیدی در زمان‌های آغازین نسبتاً کاهش می‌یابد که البته یک نتیجه منطقی است. زیرا با افزایش گرانروی، تحرک‌پذیری نفت سرد در جلوی جبهه کاهش می‌یابد. البته هدف فرایند احتراق درجا کاهش گرانروی نفت است که با هدایت گرمایی در جلوی جبهه این امر اتفاق می‌افتد.

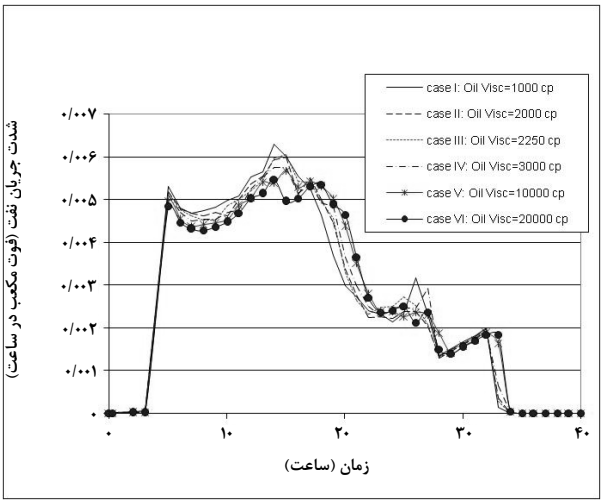
Archive of SID

www.

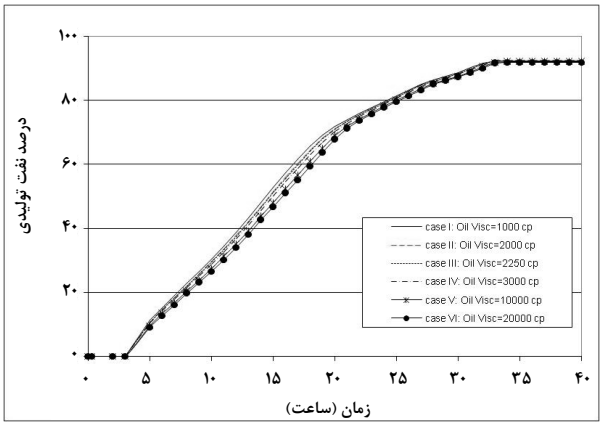
در شکل (۱۳) می‌توان به مقایسه درصد بازیافت در حالات ذکر شده پرداخت. در این شکل، تفاوت محسوسی بین بازیافت مدل‌های مختلف مشاهده نمی‌شود و می‌توان نتیجه گرفت که اگر جبهه احتراق با موفقیت تشکیل شود و به پیش رود گرانروی نفت جلوی جبهه آنقدر کاهش می‌یابد که نهایتاً بر بازیافت نفت تقریباً بی‌اثر است. به عبارت دیگر بازهٔ بزرگی از مقادیر گرانروی‌های نفت اولیه که در اینجا شبیه‌سازی شده‌اند بر اثر این فرایند، همگی تقریباً به یک عدد بسیار کوچک‌تر همگرا شده اند. این شاید بزرگ‌ترین ویژگی فرایند احتراق در جا باشد.

جدول ۴- مقادیر مختلف گرانروی نفت مخزن

حالت‌های مختلف	گرانروی نفت (cp)
حالت I	۱۰۰۰
حالت II	۲۰۰۰
حالت III (شرایط اولیه)	۲۲۵۰
حالت IV	۳۰۰۰
حالت V	۱۰۰۰۰
حالت VI	۲۰۰۰۰



شکل ۱۲- اثر گرانروی اولیه نفت بر شدت جریان تولیدی در فرایند احتراق درجا



شکل ۱۳- اثر گرانروی اولیه نفت بردرصدبازیافت نفت تولیدی در فرایند احتراق درجا

۳-۶ تغییرات فشار اولیه مخزن

با تغییر فشار اولیه مخزن، تأثیر آن بر میزان تولید بررسی می‌شود. در این قسمت، پنج حالت با هم مقایسه می‌شوند که در جدول (۵) مقادیر این متغیرها آمده‌اند. سایر مشخصات مدل که در جدول (۱) آمده است ثابت می‌باشد. با توجه به اینکه در مدل آزمایشگاهی فشار اولیه ۳۱۴/۷ psi بود، مقادیر در نظر گرفته شده برای فشار بین ۲۸۰ تا ۳۵۰ پام انتخاب شدند. این بازه با مقدار اولیه فشار، حدود ۱۲ درصد انحراف دارد.

جدول ۵- مقادیر مختلف فشار اولیه مخزن

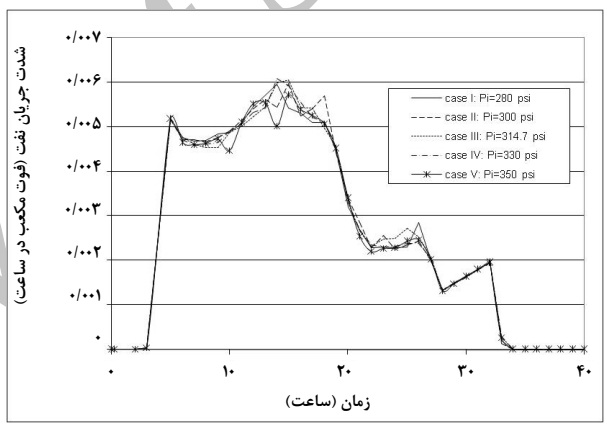
حالت‌های مختلف فشار اولیه مخزن	فشار اولیه مخزن
حالت I	۲۸۰
حالت II	۳۰۰
حالت III	۳۱۴/۷
حالت IV	۳۳۰
حالت V	۳۵۰

در شکل (۱۴) کاملاً آشکار است که فشار اولیه مخزن بر روند تولید از یک مخزن نفت سنگین که به روش احتراق درجا تولید می‌شود تأثیری ندارد. این گفته را می‌توان در شکل (۱۵) نیز که درصد بازیافت را در حالات مختلف نشان می‌دهد به روشنی ملاحظه کرد. در برخی از فرآیندها مانند تزریق امتزاجی گاز، فشار اولیه مخزن

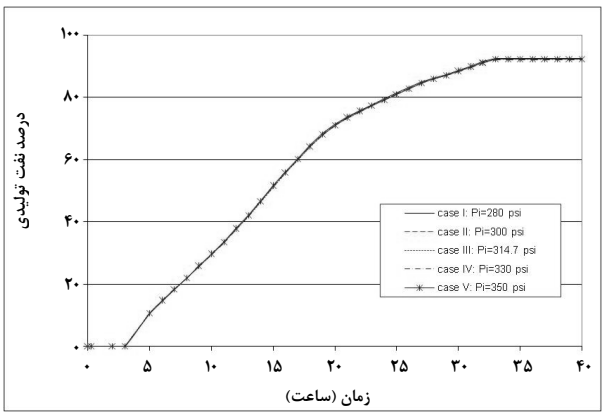
Archive of SID

www.SID.ir

اهمیت خاصی دارد و تغییر آن در میزان برداشت تأثیر گذار خواهد بود. از این رو این پارامتر جهت بررسی آنالیز حساسیت در این فرایند انتخاب شد. اگر بر اثر تولید طبیعی از مخزن مقداری تغییر فشار به وجود آید، در محاسبات ارزیابی فرایند احتراق درجا برای آن مخزن تأثیر چندانی نخواهد داشت و نیازی به محاسبات دقیق برای تزریق نیست. دیگر اینکه طراحی کمپرسوری که فشار عملیاتی آن دقیقا برابر با فشار مخزن باشد بسیار مشکل و پر هزینه است و بعضا بنا به دلایل فنی در طول عملیات فشار تزریق تغییر می‌کند. نتایج حاصل در این بخش نشان می‌دهند که تغییرات فشار که بر اثر عوامل فوق‌الذکر در عملیات پدید خواهند آمد بر فرایند احتراق درجا بی تأثیر است. نکته جالب آنست که با اعمال ۱۲ درصد انحراف از فشار مدل آزمایشگاهی باز هم درصد بازیافت تغییر نکرده است.



شکل ۱۴- اثر فشار اولیه بر شدت جریان نفت تولیدی



شکل ۱۵- اثر فشار اولیه بر درصد بازیافت نفت تولیدی

۴- نتایج

از مطالعه و بررسی مدل‌های شبیه‌سازی‌شده در STARS می‌توان نتایج زیر را برای فرایند احتراق درجا استنتاج کرد:

- شدت جریان تزریق باید مقداری بهینه داشته باشد که جبهه احتراق به سمت چاه تولیدی حرکت کند. یعنی اینکه از یک عدد مشخص کمتر نباشد که طی آن جبهه خاموش شود و یا اینکه بیشتر از یک حد معین نباشد که هوای تزریقی بدون انجام واکنشهای مربوطه به سمت چاه تولیدی نفوذآنی کند.
- به طور کلی فرایند احتراق درجا در مخازن نفت سنگین که طی دیگر فرایندهای بازیافت تخلیه شده‌اند می‌تواند توسط این فرایند به بازیافت نهایی برسد. البته این، منوط بر آن است که هیدروکربن کافی در مخزن موجود باشد که فرآیند آغاز شود.
- فرایند احتراق درجا در مخازن نفت سنگین باعث کاهش گرانروی نفت تولیدی به میزان قابل توجهی می‌گردد.
- اگر در یک مخزن نفت سنگین از احتراق درجا استفاده شود باید توجه شود که نفت گرم‌شده در جلوی جبهه باید از طریق چاه تولیدی خارج شود که در غیراینصورت این نفت نیز به عنوان سوخت در فرایند از بین می‌رود و بازیافت نهایی کاهش می‌یابد.
- با تغییر درجه پیش‌گرمایش مقدار نفت تولیدی تغییر می‌کند و این به دلیل تغییر در زمان شروع احتراق می‌باشد. هرچه درجه پیش‌گرمایش بیشتر باشد جبهه احتراق زودتر تشکیل شده و در نتیجه نفت زودتر تولید می‌شود. البته به این نکته نیز باید توجه شود که اگر درجه پیش‌گرمایش از یک حدی پایینتر باشد جبهه احتراق تشکیل نشده و تولید به روش احتراق درجا آغاز نمی‌گردد.
- برای فاز پیش‌گرمایش روش تزریق بخار بهترین روش است که باعث می‌شود دمای نواحی اطراف چاه تزریقی به میزان مناسبی بالا رود و زمینهٔ لازم برای تشکیل جبهه احتراق را فراهم کند، زیرا همانطور که می‌دانیم اگر دما به حد کافی نرسد جبهه احتراق تشکیل نمی‌شود و یا اینکه پایدار نمی‌ماند. با توجه به نکات اشاره شده در این بخش نتیجه می‌گیریم تا حد امکان بهتر است برای فاز پیش‌گرمایش از روش تزریق بخار استفاده شود.

Archive of SID

www.

- با افزایش شدت جریان هوای تزریقی تولید نفت افزایش می‌یابد زیرا اکسیژن کافی فراهم می‌شود تا واکنش‌ها انجام شوند ولی شدت جریان تزریقی نباید از یک حد آستانه فراتر رود چون اگر شدت جریان خیلی بالا باشد هوا با سرعت زیاد وارد فضای متخلخل شده و به‌صورت نفوذآنی از چاه تولیدی خارج می‌شود.
- افزایش میزان اکسیژن ورودی به سیستم باعث می‌گردد واکنش‌های احتراق سریعتر انجام شوند و در زمان کوتاهتری به بازیافت نهایی برسیم.
- فرآیند احتراق درجا در مخازن نفت سنگین باعث کاهش گرانروی نفت تولیدی به میزان قابل توجهی می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در نفوذپذیری‌های بالا کاهش گرانروی وابستگی چندانی به گرانروی نفت اولیه درجا ندارد.
- تغییرات فشار اولیه مخزن برای یک ترکیب مشخص از نفت، پارامتر تأثیرگذاری در شدت جریان تولید و بازیافت نهایی نیست.

مراجع

[1] Butler, R. M. Thermal Recovery of Oil and Bitumen, First Edition, Prentice-Hall inc., pp416-417, (1991).

[2] Farouq Ali, S. M. "Redeeming Features of In-situ Combustion", presented at DOE/NIPER, Symposium on In-situ combustion Practices-Past, Present and Future, Tulsa, OK, USA, (April 21-22, 1994).

[3] Whilhite G. Paul, Green W. Don, Forney H. Ross "Enhanced Oil Recovery", SPE, Richardson, TX, (1986).

[4] Bousaid, I. S., Ramey, H. J., Jr.: "Oxidation of Crude Oil in Porous Media" pp. 137-148, Trans., AIME, 243, SPE J. (June 1968).

[5] Suat Bagci A. Okandan E. "Dry and Wet Combustion Studies of Different API Gravity Crude Oils From Turkish Oil Fields", Journal of Canadian Petroleum Technology, (1988).

[6] Mostafavi V., Razzaghi S. and Kharrat R, "Feasibility Study of In-Situ Combustion in a Carbonate Reservoir", SPE 105576, Presented at 15th SPE Middle East Oil and Gas Show held in Bahrain International Exibition Centre, (11-14 March 2007).

[7] Coats, Keith H. "In-Situ Combustion Model", Paper SPE 69705-MS, pp 168-175, SPE J. (April 2001).

[8] Vossoughi, S. and El Shoubary, Y. "Kinetics of Crude-Oil Coke Combustion" Paper SPE 16268, pp 72-81, SPE J. (May 1989).

[9] Aziz, K. and Settari, A. "Petroleum Reservoir Simulation" Second Edition, Applied Science Pub. Ltd., London, (1979).

Archive of SID

www.SID.ir