

بررسی عددی نقش تزریق آب در برداشت نفت از مخازن سنگین به روش احتراق درجا

سیروس سرمستی

دانشجوی دکتری تبدیل انرژی-دانشگاه تربیت مدرس
s.sarmasti@modares.ac.ir

کیومرث مظاهری*

استاد گروه تبدیل انرژی-دانشگاه تربیت مدرس
kiumars@modares.ac.ir

چکیده

احتراق درجا یک روش گرمایی ازدیاد برداشت از مخازن نفت سنگین است که در آن کسری از نفت مخزن سوزانده می‌شود تا گرمای لازم برای جابجایی سیالات مخزن تولید شود. یکی از روشهای پیشنهاد شده برای افزایش کارایی احتراق درجا، تزریق آب به همراه هوا به مخزن جهت افزایش نرخ انتقال حرارت و نرخ برداشت است. در کار حاضر توسط شبیه‌سازی عددی احتراق نفت در یک محیط متخلخل آزمایشگاهی، نقش تزریق آب بررسی شده است. ویژگی این تحقیق این است که در شبیه‌سازی نقش آب از مکانیزم واکنشی نسبتاً کاملی استفاده شده که انواع واکنش‌های کرکینگ، احتراقی، اکسید غیراحتراقی و احتراق گونه‌های گازی را پوشش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که تزریق آب سبب تشکیل یک ناحیه بخار وسیع در جلوی جبهه احتراقی می‌شود و انتقال حرارت به بخش سرد مخزن به واسطه این ناحیه بخار انجام می‌شود. در نتیجه کسری از نفت که به عنوان سوخت مصرف می‌شود کاهش یافته و نرخ برداشت نفت نیز افزایش می‌یابد. از طرفی این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تزریق آب سبب کاهش CO₂ برداشت شده می‌شود. این پیش‌بینی برخلاف نتایج منتشر شده از تحقیقات آزمایشگاهی است. بنابراین مکانیزم‌های سینتیکی موجود توانایی مدل کردن همه جنبه‌های ناشی از تزریق آب را ندارند.

کلمات کلیدی: احتراق درجا، برداشت نفت، احتراق تر.

مقدمه

احتراق درجا^۱ یک روش ازدیاد برداشت نفت است که معمولاً در مخازن نفت سنگین کاربرد دارد. در مخازن نفت سنگین، روشهای برداشت مرسوم برای نفت سبک کارایی ندارند چرا که لزجت بسیار زیاد نفت سنگین مانع از جاری شدن آن به سمت چاه برداشت می‌شود. برای برداشت نفت سنگین، لزجت نفت با استفاده از گرم کردن نفت مخزن یا تغییر ترکیب شیمیایی آن کاهش داده می‌شود. در روش احتراق درجا، با سوزاندن کسر کوچکی از نفت مخزن گرمای لازم برای کاهش لزجت نفت مخزن ایجاد می‌شود. در این روش، از چاه تزریق اکسید کننده (هوا یا اکسیژن) به مخزن تزریق می‌شود. در ناحیه مجاور چاه، با استفاده از ابزارهای مناسب یک جبهه احتراقی ایجاد می‌شود و این جبهه با پیشروی به سمت چاه برداشت سبب جابجایی سیالات مخزن می‌شود. کاهش لزجت در اثر گرما، انبساط سیال‌های مخزن، شکست حرارتی ترکیب نفت، تبخیر و میعان و افزایش فشار مخزن در اثر تجمع محصولات احتراق از جمله مکانیسم‌های جابجایی سیالات مخزن در روش احتراق درجا هستند. استفاده عملی از احتراق درجا تا به حال محدود بوده است. دلیل این امر پیچیده بودن روش و ناشناخته بودن بسیاری از پدیده‌های آن است [۱].

مخزن نفت یک محیط متخلخل است که نفت و سایر سیالات مخزن حفره‌های سنگ مخزن را پر کرده‌اند. معمولاً علاوه بر نفت مقداری آب و

گاز نیز در مخزن وجود دارد. بنابراین فرایند احتراق درجا، احتراق در محیط متخلخل چندفازی است.

مطابق طرحواره شکل ۱، در اثر انتقال گرما، جرم و واکنشهای شیمیایی ناحیه‌های مختلفی در بالادست و پایین‌دست جبهه احتراقی روش احتراق درجا قابل تفکیک هستند.

ناحیه ۱: در این ناحیه فقط سنگ مخزن و هوای تزریق شده وجود دارد.
ناحیه ۲: این ناحیه جبهه احتراقی را نشان می‌دهد. مشخصه این ناحیه وقوع دمای بیشینه در آن است.

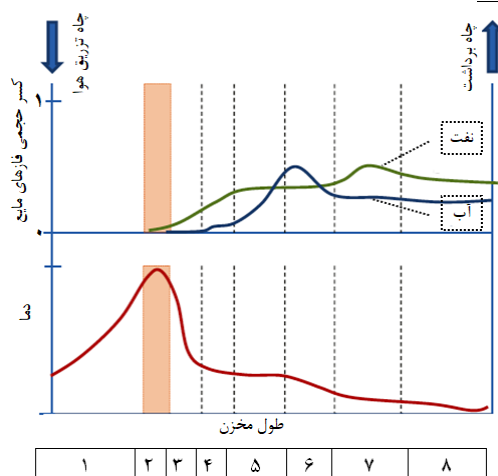
ناحیه‌های ۳ و ۴: گرمای تولید شده در ناحیه ۲ از طریق هدایت و جابجایی توسط گازهای داغ (مانند بخار آب) به پایین‌دست جبهه انتقال می‌یابد. گرمای این ناحیه سبب شکست حرارتی^۲ نفت و تشکیل کک می‌شود. در نتیجه در بخشی از ناحیه پایین دست جبهه، کک به صورت رسوب در سطح سنگ مخزن تشکیل می‌شود. کک تشکیل شده، سوخت لازم برای جبهه احتراقی را فراهم می‌کند.

ناحیه ۵: اجزاء سبک نفت که در ناحیه‌های ۳ و ۴ جدا شده‌اند در اثر فشار زیاد بالادست جبهه، به پایین دست منتقل شده و در ناحیه‌ی ۵ با سیالات سرد مخزن مخلوط شده و دوباره مایع می‌شوند.

ناحیه ۶: در ناحیه ۶ بخار آب با از دست دادن گرما به حالت مایع درمی‌آید. در نتیجه توزیع دما بین ناحیه‌ی ۵ و ناحیه‌ی ۶ یک افت ناگهانی دارد.

ناحیه ۷: بخش اصلی نفت جابجا شده در این ناحیه جمع می‌شود.

ناحیه ۸: ناحیه دست نخورده مخزن است.



شکل ۱ طرحواره ناحیه‌های مختلف تشکیل شده در احتراق درجا.

پدیده احتراق در روش احتراق درجا فرایند بسیار آهسته‌ای می‌باشد. جبهه احتراقی در روش احتراق درجا، یک برافروختگی بدون شعله (مشابه سوختن سیگار) بوده و سرعت پیشروی جبهه از مرتبه سانتی‌متر بر روز می‌باشد. دمای جبهه احتراقی نیز حدود ۷۰۰ درجه سانتیگراد است [۱]. یکی از مشخصه‌های این نوع احتراق این است که ابتدا سوخت قابل احتراق

در اثر پیرولیز تشکیل شده و سپس این سوخت با اکسیژن واکنش داده و محترق می‌شود [۱]. بنابراین شکل‌گیری و تثبیت جبهه‌ی احتراقی مستلزم انجام متوازن واکنش‌های پیرولیز و اکسید می‌باشد.

واکنش‌های شیمیایی که در احتراق درجا رخ می‌دهند معمولاً به سه دسته تقسیم می‌شوند: واکنش‌های اکسید دما پایین^۱، واکنش‌های اکسید دما بالا^۲ و واکنش‌های شکست حرارتی^۳. واکنش‌های اکسید دما پایین در صورت دسترسی گونه‌های سبک نفت خام به اکسیژن در دمای کمتر از ۳۵۰ °C انجام می‌شوند. این واکنش‌ها گرمازا بوده و محصول عمده آنها گونه‌هایی از جنس آلدئیدها، کتون‌ها و الکل‌ها است، ولی این واکنش‌ها سبب تشکیل اکسیدهای کربن و آب نیز می‌شوند. واکنش‌های دما پایین لزجت، دمای نقطه جوش و چگالی نفت را افزایش می‌دهند. به همین دلیل این واکنش‌ها در حالت کلی درجا مطلوب نیستند، به استثنای شروع فرایند که گرمای این واکنش‌ها در دمای پایین به آغاز واکنش‌های اکسید دما بالا و تشکیل جبهه احتراقی کمک می‌کنند. واکنش‌های دما بالا در دماهای بالاتر از ۳۵۰ °C بین گونه‌های سنگین نفت خام و اکسیژن انجام می‌شوند و محصول آنها اکسیدهای کربن و آب است. واکنش‌های شکست حرارتی در دماهای بالاتر از ۳۵۰ °C و بدون نیاز به اکسیژن انجام شده و سبب جدا شدن گونه‌های مختلف نفت می‌شوند. در اثر این واکنش‌ها گونه‌های سبک نفت خام جدا شده و به دلیل اینکه دمای تبخیر پایین‌تری دارند تبخیر شده و به سمت پایین دست جبهه احتراقی جابجا می‌شوند. گونه‌های سنگین نفت خام که در اثر شکست حرارتی جدا شده و در حفره‌های مخزن متخلخل رسوب می‌کنند سوخت واکنش‌های اکسید دما بالا را تشکیل می‌دهند. این گونه‌های سنگین پرکربن معمولاً کک نامیده می‌شوند.

آب به دلایل مختلفی از جمله نقطه جوش پایین و ظرفیت گرمایی زیاد خود نقش قابل توجهی در فرایند احتراق درجا دارد. به دلیل تغییر فاز آب در جبهه، علاوه بر جبهه احتراقی یک جبهه گرمایی نیز در مخزن تشکیل می‌شود که در بالادست آن آب به شکل بخار و در پایین دست آن به شکل آب مایع است (ناحیه ۶ در شکل ۱). به دلیل اینکه این ناحیه معمولاً در پایین دست جبهه احتراقی قرار دارد، این ناحیه واسطه انتقال گرما از جبهه احتراقی به نفت خام می‌شود. لذا دما و سرعت پیشروی این جبهه گرمایی تأثیر زیادی بر بازده برداشت روش احتراق درجا دارد. بنابراین یکی از روشهای پیشنهاد شده جهت افزایش سرعت پیشروی این جبهه و در نتیجه افزایش نرخ انتقال گرمای جبهه احتراقی به نفت مخزن، تزریق آب به همراه هوا به مخزن است [۲]. در این حالت احتراق درجا، از نوع تر^۴ نامیده می‌شود. آب تزریق شده، با جذب گرمای محبوس شده در پشت جبهه احتراقی (ناحیه ۱ در شکل ۱)، انتقال گرما به سمت پایین دست جبهه احتراقی و نرخ برداشت نفت را بهبود می‌دهد.

تأثیر تزریق آب به همراه هوا در احتراق درجا در مراجع مختلفی به شکل عددی یا تجربی بررسی شده است. پنبرسی و همکارانش [۳] با انجام آزمایش روی چیدمان آزمایشگاهی لوله احتراقی^۵ و توسعه یک مدل تحلیلی نشان دادند که اولاً یک ناحیه بخار قابل تفکیک در احتراق تر وجود دارد و ثانیاً دمای آن متأثر از فشار تزریق هوا و تا حدودی مقدار آب اولیه مخزن است. آلدومن و اوسابا [۴] نیز با آزمایش روی لوله احتراق

نشان دادند که تزریق آب به همراه هوا سبب افزایش نرخ برداشت نفت می‌شود. در آزمایش‌هایی که آنها انجام داده‌اند، هر چه نرخ تزریق آب بیشتر شده نرخ برداشت نیز افزایش یافته است. بورگر و سائو کوکوت [۵] احتراق درجای تر را بر اساس نسبت آب به هوای تزریق شده به سه دسته نرمال، ناقص^۶ و فوق تر^۷ تقسیم کردند. هنگام تزریق آب به همراه هوا، به دلیل افزایش نرخ جابجایی نفت و کاهش زمان ماند آن در ناحیه کک مقدار سوخت رسوب شده کاهش می‌یابد. تا زمانی که کاهش مقدار سوخت منجر به خاموشی جبهه احتراق نشود، با افزایش مقدار آب تزریق شده، ممکن است بخشی از آب تزریق شده در ناحیه سوخته تبخیر نشود و در نتیجه آب به شکل مایع به جبهه احتراقی برسد. در این صورت احتراق تر از نوع ناقص نامیده می‌شود. در صورتی که تمام آب تزریق شده به شکل مایع به جبهه احتراقی برسد احتراق تر از نوع فوق تر نامیده می‌شود. احتراق ناقص و فوق تر ممکن است سبب خاموشی جبهه شوند. بنیون و همکارانش [۶]، نتایج حاصل از آزمایش‌های احتراق درجای خشک تا فوق تر را گزارش کرده‌اند. با انجام هفت آزمایش و تغییر نسبت آب به هوای تزریق شده از صفر تا ۳/۷۲ کیلوگرم آب به مترمکعب هوا تأثیر مقدار نسبت آب به هوا روی عوامل مختلف از جمله ترکیب جریان گاز و جریان مایع برداشت شده، مقدار هوای لازم برای تثبیت جبهه، مقدار سوخت رسوب شده، نرخ برداشت و توزیع دما بررسی کرده‌اند. آنها مشاهده کردند که در نتیجه افزایش مقدار آب تزریق شده، نرخ برداشت افزایش می‌یابد ولی با افزایش بیشتر مقدار آب دمای جبهه احتراقی به حدی کاهش می‌یابد که عملاً واکنش‌های احتراقی انجام نمی‌شوند و جبهه خاموش می‌شود. گریوز [۷] به صورت تجربی احتراق درجای خشک و تر را مقایسه کرده‌اند. آنها حد بالای نسبت آب به هوا جهت حصول احتراق تر نرمال را ۲/۵ مترمکعب آب به مترمکعب هوا گزارش کرده‌اند. همچنین با تجزیه ترکیب فاز گاز برداشت شده نشان دادند که میزان CO₂ با افزایش مقدار آب تزریق شده افزایش می‌یابد. افزایش میزان CO₂ در احتراق تر در مراجع دیگری نیز گزارش شده است. باغچی [۸] طی انجام آزمایش احتراق درجای تر با چیدمان لوله احتراق مشاهده کرده است که میزان CO₂ با افزایش مقدار آب تزریق شده افزایش می‌یابد. او سه احتمال برای این موضوع مطرح کرده است: تجزیه شدن کربنات‌های سنگ مخزن در دمای بالای جبهه و آزاد شدن CO₂، تبدیل CO به CO₂ در حضور بخار آب و واکنش احتمالی بین کک و آب. لاپان و همکارانش [۹] نشان داده‌اند که نقش واکنش‌های شیمیایی آب با سایر گونه‌ها یکی از دلایل افزایش CO₂ در احتراق تر است. آنها با انجام دوازده آزمایش در شرایط مختلف به این نتیجه رسیده‌اند که در رفتار شیمیایی احتراق خشک و احتراق تر تفاوت وجود دارد و در احتراق درجای تر، علاوه بر سه دسته واکنشی که قبلاً معرفی شدند، بخار آب نیز در واکنشها شرکت می‌کند. علاوه بر تحقیق‌های تجربی معرفی شده، تحقیق‌های عددی نیز با موضوع بررسی جنبه‌های مختلف احتراق درجای تر انجام شده‌اند. اسمیت و پرکینس [۱۰] با شبیه‌سازی یک‌بعدی لوله احتراق نشان داده‌اند که اتلاف گرما از دیواره لوله احتراق در احتراق تر نقش بیشتری در مقایسه با احتراق خشک دارد. بنابراین برقراری دقیق شرط آدیاباتیک بودن دیواره لوله احتراق در احتراق تر مهم‌تر از احتراق خشک است و عدم برقراری آن ممکن است منجر به تفسیر اشتباه نتایج آزمایش شود. گنچالوز و همکارانش [۱۱] با شبیه‌سازی عددی لوله احتراق، نقش متغیرهای مختلفی از قبیل نسبت آب

¹ Low-Temperature Oxidation (LTO)

² High-Temperature Oxidation (HTO)

³ Thermal Cracking

⁴ Wet in-situ combustion

⁵ Combustion tube

⁶ Incomplete

⁷ Super wet

سرعت منسوب به فاز p (\vec{v}_p) با معادله‌ی دارسی توسعه یافته برای جریان چندفازی محاسبه می‌شود:

$$\vec{v}_p^r = -K k_p / \mu_p (\nabla P_p + \gamma_p \nabla z), \quad p \in \{o, g, w\} \quad (3)$$

که K نفوذپذیری مطلق محیط مخزن و k_{rp} نفوذپذیری نسبی فاز p و μ و γ و z به ترتیب فشار، لزجت، وزن مخصوص و عمق مخزن می‌باشند. معادله‌ی انرژی برای سیستم موردنظر به شکل زیر نوشته می‌شود [۱۲]:

$$\partial E_{tot} / \partial t = \nabla (K_c \nabla T) + \nabla \left(\sum_{p=1}^{N_f} H_p \rho_p \vec{v}_p^r \right) + S_r^E + S_w^E - S_i^E \quad (4)$$

که E_{tot} شامل انرژی داخلی فازهای سیال، جامد و سنگ مخزن است. جمله اول سمت راست هدایت گرما در مخزن با ضریب هدایت کل K_c است. دمای همه فازها و سنگ مخزن در هر نقطه ماکروسکوپی یکسان و برابر با T است. H در جمله دوم سمت راست معادله، آنتالپی مولی کل را نشان می‌دهد. جمله‌های S_r^E و S_w^E و S_i^E به ترتیب نرخ تغییر انرژی کل در اثر واکنش، تزریق یا برداشت از طریق چاه‌ها و اتلاف به محیط اطراف می‌باشند. انرژی و ضریب هدایت کل به ترتیب زیر محاسبه می‌شوند:

$$E_{tot} = \phi_f \sum_{p=1}^{N_f} S_p \rho_p E_p + \phi C_c E_c + (1 - \phi) \bar{E}_{rock} \quad (5)$$

$$K_c = \phi_f \sum_{p=1}^{N_f} S_p K_{c,p} + (\phi - \phi_f) K_{c,c} + (1 - \phi) K_{c,r} \quad (6)$$

که E_p و E_c به ترتیب انرژی داخلی مولی فاز p و فاز کک و \bar{E}_{rock} انرژی داخلی واحد حجم سنگ مخزن می‌باشند. همچنین $K_{c,p}$ ضریب هدایت فاز p و $K_{c,c}$ و $K_{c,r}$ ضریب هدایت کک و ϕ ضریب هدایت سنگ مخزن می‌باشند. جمله‌های وسط در سمت راست معادلات (۵) و (۶) مربوط به فاز جامد (کک) هستند. سنگ مخزن در معادله‌ی بقای جرم گونه ظاهر نمی‌شود ولی در معادله‌ی انرژی ظاهر می‌شود.

نسبت توزیع یک گونه بین فازهای مختلف مطابق با فرض تعادل فازی محاسبه می‌شود. برای اعمال فرض تعادل فازی با هزینه محاسباتی پایین، نسبت کسر مولی یک گونه در دو فاز $p1$ و $p2$ با استفاده از یک تابع تجربی بیان می‌شود [۱۲]:

$$K_{p1-p2,i}^* = x_{p1,i} / x_{p2,i} \quad (7)$$

که K^* تابعی از دما، فشار است. فرض شده است فازهای آب و نفت تبادل جرم ندارند.

تغییر چگالی فازها ناشی از تغییر دما و فشار مخزن در شبیه‌سازی مخزن اهمیت دارد. چگالی مولی فازها تابع فشار، دما و ترکیب فازها می‌باشد:

$$\rho_p = \rho_p(P_p, T, x_{i,p}), \quad p \in \{o, g, w\} \quad (8)$$

همچنین بین متغیرهای تعریف شده قیدهای جبری زیر نیز برقرار است:

$$\sum_{p=1}^{N_p} S_p = 1 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{N_c} x_{p,i} = 1, \quad p = 1, N_p - 1 \quad (10)$$

نرخ واکنش‌های شیمیایی به شکل زیر به دما، فشار جزئی اکسیژن و غلظت واکنش‌دهنده نسبت داده می‌شود [۱۲]:

$$R_r = A_r \exp(-E_r / RT) (P_{O_2})^{n_r} \prod_{i=1}^{N_c} (C_{i,p})^{m_i} \quad (11)$$

که $C_{i,p}$ غلظت گونه‌ی واکنش‌دهنده (هیدروکربن) i در فاز j P_{O_2} فشار جزئی اکسیژن، E_r انرژی فعال‌سازی واکنش و m_r و n_r مرتبه‌ی واکنش نسبت به غلظت گونه و نسبت به فشار جزئی اکسیژن می‌باشند. بسته به اینکه گونه

تزریق شده به هوا، زمان آغاز تزریق آب، کسر حجمی نفت و آب اولیه مخزن، پیوسته یا منقطع بودن تزریق آب و فشار تزریق را روی عملکرد احتراق درجای تر بررسی کرده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهند که سرعت جبهه احتراق و نرخ برداشت با افزایش مقدار آب تزریق شده افزایش می‌یابد تا به یک مقدار اپتیمم برسد و پس از آن کاهش می‌یابد. دمای ماکزیمم جبهه رفتار یکنواختی با افزایش میزان آب تزریق شده نشان نمی‌دهد. افزایش فشار تزریق و بالا بودن کسر حجمی نفت در مخزن، باعث افزایش نرخ برداشت در اثر تزریق آب می‌شوند و منقطع یا پیوسته بودن تزریق آب نقشی در عملکرد روش ندارد.

مرور تحقیقات انجام شده در زمینه احتراق درجای تر نشان می‌دهد که در همه پژوهش‌های عددی انجام شده از مکانیزم واکنشی بسیار ساده‌ای استفاده شده است. از آنجا که نقش واکنش‌های شیمیایی در بررسی احتراق درجا بسیار مهم است در تحقیق حاضر احتراق درجای تر با یک مکانیزم واکنشی دربرگیرنده هر سه نوع واکنش توضیح داده شده شبیه‌سازی شده و تاثیر تزریق آب همراه با هوا روی پدیده‌های مختلف بررسی شده است.

مدل ریاضی احتراق درجا

شبیه‌سازی احتراق درجا در مقیاس ماکروسکوپی انجام می‌شود. معادلات مقیاس ماکروسکوپی، رفتار متوسط جریان مقیاس حفره را بیان می‌کنند. سیال به سه فاز نفت، آب و گاز تفکیک می‌شوند. جهت توصیف واکنش‌های شیمیایی نفت سنگین به سه گونه مجازی به نام مالتن‌ها، آسفالتن‌ها و کک تفکیک می‌شود. کک جامد و دو گونه دیگر در شرایط اولیه مخزن مایع هستند. فاز آب فقط شامل گونه‌ی آب است. فاز گاز از گونه‌های اکسیژن، بخار آب، بخار گونه‌های نفتی مایع، اکسیدهای کربن، نیتروژن، هیدروژن، متان و یک گونه مجازی هیدروکربنی تشکیل شده است. برای تعیین خواص گونه‌های مجازی از مقادیر منتشر شده در مراجع استفاده شده است.

معادلات بقای جرم گونه‌ها، معادله دارسی و معادله انرژی معادلات حاکم را تشکیل می‌دهند. معادلات حاکم برای سیستمی متشکل از N_c گونه، N_p فاز (شامل N_f فاز سیال و $N_p - N_f$ فاز جامد) و N_r واکنش شیمیایی نوشته شده‌اند. فازهای گاز، نفت، آب و جامد به ترتیب با نمادهای g ، o ، w و s نمایش داده شده‌اند. لازم به تاکید است که سنگ مخزن جزء فاز جامد نمی‌باشد و فاز جامد فقط نشان دهنده کک است. نسبت حجم حفره به حجم کل، تخلخل محیط متخلخل نامیده شده و با ϕ نمایش داده می‌شود. همچنین نسبت حجم سیال به حجم حفره با ϕ_f نمایش داده می‌شود. بقای جرم گونه‌ی i در سیستم مذکور به شکل زیر می‌باشد [۱۲]:

$$\partial \sum_{p=1}^{N_f} (\phi_f S_p \rho_p x_{p,i}) / \partial t = -\nabla \cdot \left(\sum_{p=1}^{N_f} (\rho_p x_{p,i} \vec{v}_p^r) \right) + S_{r,i}^m + S_{w,i}^m \quad (1)$$

$$\partial C_c / \partial t = S_{r,i}^m \quad (2)$$

که ρ و v به ترتیب اشباع، چگالی مولی و سرعت فاز، $x_{p,i}$ کسر مولی گونه‌ی i در فاز p بوده و زیرنویس‌های p و r به ترتیب نشان دهنده‌ی فاز و واکنش هستند. جمله‌های $S_{r,i}^m$ و $S_{w,i}^m$ به ترتیب نرخ تغییر غلظت گونه‌ی i در اثر واکنش و در اثر تزریق یا برداشت از طریق چاه‌ها می‌باشند. چون شرایط جریان در چاه‌ها از جریان بسیار آرام سیالات در ناحیه‌ی بین چاه‌ها متفاوت می‌باشد لذا چاه‌ها مدل نمی‌شوند و تزریق یا برداشت از آنها به صورت یک جمله‌ی چشمه نقطه‌ای در معادلات بقا در نظر گرفته می‌شود.

واکنش دهنده هیدروکربنی i در کدام یک از فازها حضور داشته باشد تعریف $C_{i,j}$ به شکل زیر تغییر می‌یابد:

$$C_{i,p} = \begin{cases} S_p \rho_p x_{i,p} & \text{if } p \in [o, w] \\ C_c & \text{if } p = s \end{cases} \quad (12)$$

جمله‌های چشمه واکنشی در معادلات ۱ و ۴ به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$S_{r,i}^m = \sum_{r=1}^{N_r} S_{r,i} R_r \quad S_r^E = \sum_{r=1}^{N_r} (-\Delta H)_r R_r \quad (13)$$

که $S_{r,i}$ ضریب استوکیومتری گونه‌ی i در واکنش r و ΔH گرمای واکنش می‌باشد. ضریب استوکیومتری واکنش دهنده‌ها منفی و محصولات مثبت در نظر گرفته می‌شود.

جهت محاسبه مقدار گرمایی که از طریق انتقال به لایه‌های مذکور هدر می‌رود از یک روش شبه‌تحلیلی استفاده شده است. در این روش شبه‌تحلیلی که در مرجع [۱۳] ارائه شده است هدایت در جهت عمود بر سطح مشترک، به عنوان مکانیزم غالب در انتقال گرما از مخزن به اطراف در نظر گرفته شده است.

نفوذپذیری نسبی یک متغیر تجربی است که به دو شکل جدول یا رابطه‌های ریاضی بیان می‌شود. اکثر کارهای آزمایشگاهی جهت تعیین نفوذپذیری نسبی، برای جریان‌های دوفازی انجام شده‌اند. در نتیجه مدل‌هایی که در شبیه‌سازی مخزن استفاده می‌شوند از تعمیم مدل‌های تجربی دوفازی به سه فازی حاصل شده‌اند.

جزئیات بیشتر در مورد تعریف خواص فازها و گونه‌ها در مرجع [۱۴] توضیح داده شده است.

روش حل

معادلات حاکم از معادلات دیفرانسیل جزئی و معادلات جبری تشکیل شده‌اند. معادلات به دو بخش اصلی و فرعی^۱ تقسیم می‌شوند. معادلات بقای جرم، معادله داری و معادله انرژی (یعنی معادلات ۱ تا ۴) معادلات اصلی و بقیه معادلات، فرعی نامیده می‌شوند. متغیرها نیز مشابه با معادلات به دو دسته اصلی و فرعی تقسیم می‌شوند. در هر گام زمانی، ابتدا با استفاده از مقادیر متغیرهای فرعی در ابتدای گام زمانی، معادلات اصلی حل شده و مقادیر جدید متغیرهای اصلی حساب می‌شوند. سپس با استفاده از مقادیر جدید متغیرهای اصلی، معادلات فرعی حل شده و مقادیر جدید متغیرهای فرعی محاسبه می‌شوند.

معادلات اصلی به روش تفاضل محدود و کاملاً ضمنی گسسته‌سازی شده‌اند. قبل از گسسته‌سازی مقدار سرعت از معادله ۳ در معادله‌های ۱ و ۴ جاگذاری شده است. مشتق‌های مکانی به صورت تفاضل مرکزی و مشتق زمانی به صورت مرتبه اول تقریب زده شده‌اند. به عنوان مثال، معادله گسسته اکسیژن در یک میدان یک بعدی به شکل معادله (۱۴) می‌باشد.

$$R_{x_{g,O_2}} = (W^{n+1} - W^n) / \Delta t - (S_{r,O_2}^m)^{n+1} - (S_{w,O_2}^m)^{n+1} - 1 / \Delta x \left[\left(T_{i+1/2} (P_{g,i+1} - P_{g,i}) / \Delta x \right) - \left(T_{i-1/2} (P_{g,i} - P_{g,i-1}) / Hx \right) \right] = 0 \quad (14)$$

$$(T_{i+1/2})^{n+1} = \begin{cases} (T_{i+1})^{n+1} & \text{if } P_{g,i+1} - P_{g,i} > 0 \\ (T_i)^{n+1} & \text{if } P_{g,i+1} - P_{g,i} < 0 \end{cases}$$

$$W = \phi_f S_g \rho_g x_{g,O_2}$$

$$T = K x_{g,O_2} \rho_g k_{rg} / \mu_g$$

دستگاه معادلات حاصل از گسسته‌سازی غیرخطی می‌باشد. این دستگاه معادلات به روش نیوتن خطی شده و حل می‌شود. گام زمانی مناسب توسط رابطه زیر تعیین می‌شود [۱۲]:

$$\Delta t^{n+1} = \Delta t^n \min_{i,k} \left[(1 + \omega) / (\delta_i / \eta_{i,k} + \omega) \right] \quad (15)$$

که $\eta_{i,k}$ مقدار تغییر متغیر اصلی i در گام زمانی Δt^n ، δ_i مقدار مجاز تغییر متغیر مذکور طی یک گام زمانی و ω مقدار ثابتی بین صفر و یک می‌باشد. زیر نویس k نشان‌دهنده‌ی سلول‌های محاسباتی می‌باشد. Δt_{max} حداکثر مقدار مجاز گام زمانی می‌باشد.

مطالعه‌ی موردی تحقیق حاضر

در مطالعه حاضر چیدمان آزمایشگاهی لوله احتراق دانشگاه کلگری به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. دلیل این انتخاب این است که تحقیقات نسبتاً جامعی در مورد خواص، مکانیزم شیمیایی و روش انجام آزمایش با این چیدمان منتشر شده است و داده‌های لازم برای شبیه‌سازی آن در دسترس هستند (مراجع [۱۵] و [۱۶]). نفت استفاده شده در این لوله احتراق از نوع نفت بسیار سنگین می‌باشد که جهت بیان رفتار فیزیکی و شیمیایی آزمایش موردنظر به چهار شبه‌گونه آسفالتن‌ها، مالتن‌ها، گاز هیدروکربنی و کک تفکیک شده است. خواص این شبه‌گونه‌ها در مرجع [۱۶] منتشر شده است. واکنش‌های شیمیایی مربوطه در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند. واکنش‌های R1 تا R3 کرکینگ، R4 و R5 اکسید غیراحتراقی، R6 احتراق کک جامد و R7 و R8 واکنش‌های احتراق فاز گازی می‌باشند. آزمایش با هوای خشک غنی از اکسیژن (۹۵ درصد مولی اکسیژن) انجام شده است [۱۶]. کسر مولی اکسیژن در سیال تزریق شده طی ۰/۷ ساعت اول از شروع آزمایش، به صورت خطی از صفر به ۰/۹۵ افزایش یافته سپس در مقدار ۰/۹۵ ثابت می‌ماند. نرخ تزریق سیال ۵۶gmol/day است [۱۶]. مشخصات لوله احتراق در جدول ۲ ذکر شده است. مبادله‌ی جرم و گرما فقط از طریق چاه‌ها انجام می‌شود. شرایط مرزی مذکور با صفر قرار دادن شارهای جابجایی در ضلع‌های مرزی شبکه‌ی محاسباتی اعمال شده‌اند.

جدول ۱ مکانیزم واکنشی استفاده شده در مطالعه حاضر [۱۵]

R1	Maltenes → 0.372 Asphaltenes
R2	Asphaltenes → 83.23 Coke
R3	Asphaltenes → 37.683 HydroGas
R4	Maltenes+3.431 O ₂ → 0.372 Asphaltenes
R5	Asphaltenes +7.513 O ₂ → 101.539 Coke
R6	Coke + 1.232 O ₂ → 0.899 CO ₂ + 0.1003 CO + 0.565 H ₂ O
R7	CH ₄ + 2 O ₂ → CO ₂ + 2 H ₂ O
R8	HydroGas + 2 O ₂ → CO ₂ + 0.9695CO + 2 H ₂ O

جدول ۲ مشخصات لوله احتراق [۱۶].

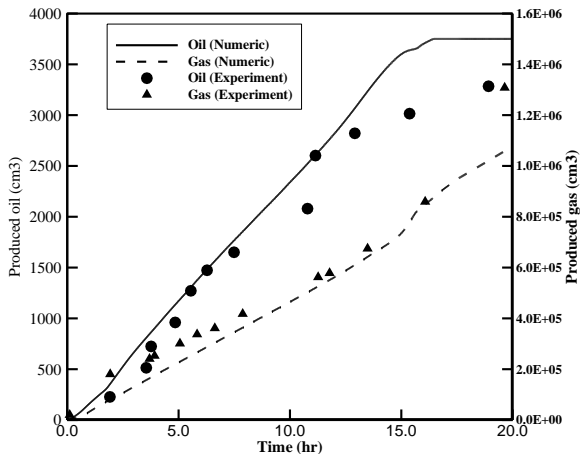
واحد	مقدار	کمیت
m	۱/۸۳	طول لوله احتراق
m ⁻²	۱۱×۱۰ ^{-۱۲}	نفوذپذیری مطلق
-	۰/۴۱۲	تخلخل
-	۰/۷	اشباع اولیه نفت
-	۰/۱۸	اشباع اولیه آب
C	۹۰	دمای اولیه مخزن
kPa	۴۱۰۰	فشار اولیه مخزن

^۱. Primary and secondary equations

نتایج

مساله تعریف شده در قسمت قبل به صورت یک بعدی و با چهار شبکه حاصل شد. لذا نتایج چاپ شده با استفاده از شبکه متشکل از ۲۰۰ سلول و ۴۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰ و ۸۰۰ سلول حل شد. استقلال از شبکه در ۲۰۰ سلول حاصل شد. دست آمده اند.

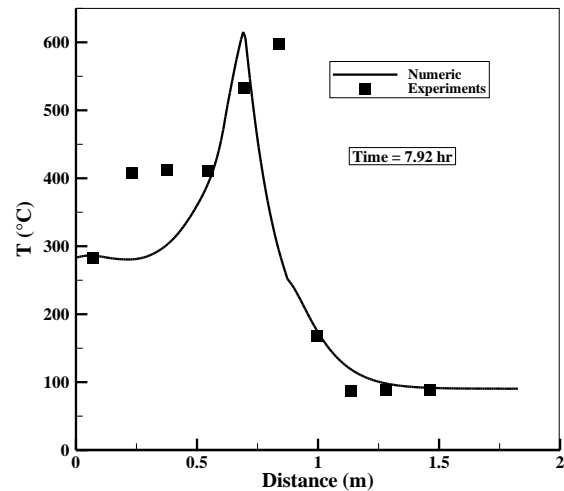
جهت صحت سنجی کد، در شکل‌های ۱ تا ۳ توزیع دما در زمانهای ۷/۹۲ و ۱۱/۷۴ ساعت پس از شروع فرآیند و همچنین حجم نفت و فاز گازی برداشت شده با نتایج تجربی منتشر شده در مرجع [۱۶] مقایسه شده اند. نتایج محاسبه تطابق خوبی با نتایج تجربی دارند و صحت روش حل را تایید می کنند.



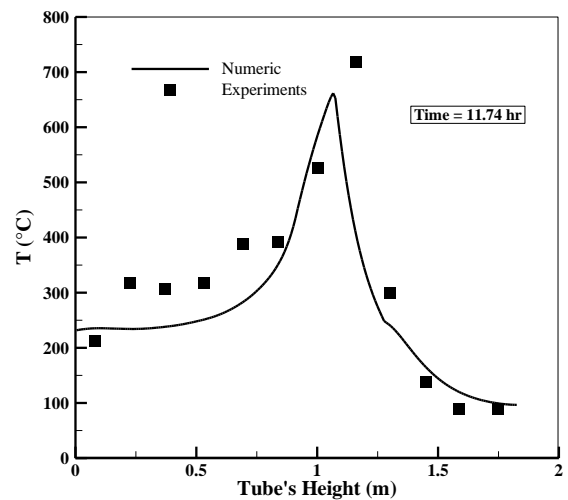
شکل ۳: مقایسه حجم نفت و فاز گازی برداشت شده با نتایج تجربی [۱۶].

جهت بررسی تاثیر تزریق آب، تغییراتی در شرایط مساله صحت سنجی داده شده است. به جای هوای غنی شده با اکسیژن، هوای معمولی تزریق شده است و برای اینکه جبهه احتراقی بتواند تشکیل شود نرخ تزریق هوا به 100 gmol/day افزایش یافته است. دلیل این تغییر این است که شرایط مساله به حالت واقعی میدان شبیه تر باشد. مقدار نرخ تزریق هوا با سعی و خطا و به گونه ای انتخاب شده که اولاً جبهه احتراقی شکل بگیرد و ثانیاً در فاز گاز برداشت شده اکسیژن اضافی وجود نداشته باشد. این مساله یک بار با هوای خشک و بار دیگر به همراه تزریق آب شبیه سازی شده است. نسبت آب به هوا (در شرایط استاندارد) در مخلوط تزریق شده 50% مولی انتخاب شده است. این مقدار با در نظر گرفتن مقادیر منتشر شده در مراجع برای ماکزیمم مقدار آب تزریق شده (70% مولی در مرجع [۶] و 65% مولی در مرجع [۷]) در نظر گرفته شده است. در صورتی که مقدار آب تزریق شده بیشتر از حد مجاز باشد جبهه احتراقی خاموش خواهد شد. این مقدار بحرانی آب بستگی به خواص نفت و محیط متخلخل دارد [۵]. در حالت احتراق تر، تزریق آب یک ساعت پس از شروع تزریق هوا شروع شده است تا شرایط اولیه شکل گیری جبهه در هر دو حالت یکسان باشد. دمای تزریق در چهار ساعت اول فرایند 400 درجه سانتیگراد است و بعد از چهار ساعت به 90 درجه (برابر با دمای اولیه محیط متخلخل) کاهش می یابد.

در شکل ۴، توزیع دما و غلظت کک در لوله در زمان ۱۴ ساعت پس از شروع فرآیند نشان داده شده است. بر اساس این شکل، غلظت کک (سوخت جبهه) در احتراق تر حدود 50% نسبت به احتراق با هوای خشک کاهش یافته و ناحیه تشکیل کک نیز عقب تر است. همچنین دمای ماکزیمم در هر دو حالت تقریباً یکسان است ولی محل دمای ماکزیمم در احتراق تر عقب تر است. اگر ناحیه احتراق (نشان داده شده در شکل ۱) در محل دمای ماکزیمم در نظر گرفته شود، شکل ۴ به این معنی است که در احتراق تر سرعت جبهه احتراقی کمتر شده است. از طرف دیگر انتقال گرمای جبهه به پایین دست جبهه در حالت احتراق تر بیشتر شده است. کاهش غلظت کک تا زمانی که منجر به خاموشی جبهه احتراقی نشود به معنای کاهش نفت سوزانده شده است. بنابراین تزریق آب به همراه هوا موجب افزایش انتقال گرمای جبهه احتراقی به پایین دست آن شده است.



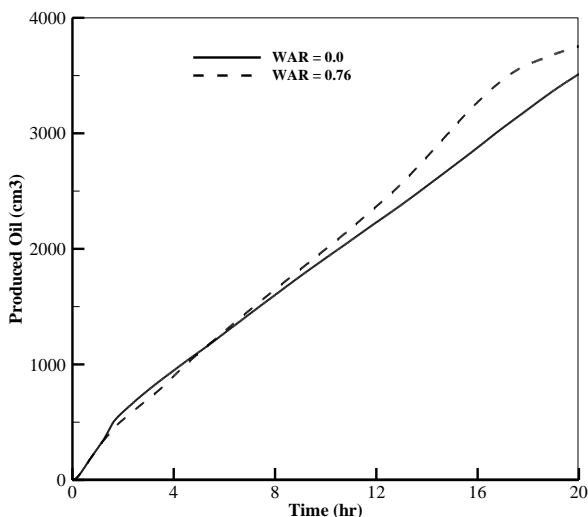
شکل ۱: مقایسه توزیع دمای لوله ۷/۹۲ ساعت پس از شروع احتراق با نتایج تجربی [۱۶].



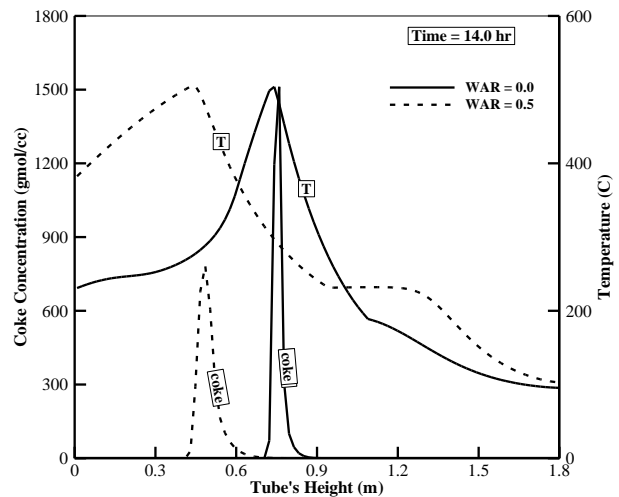
شکل ۲: مقایسه توزیع دمای لوله ۱۱/۷۴ ساعت پس از شروع احتراق با نتایج تجربی [۱۶].

تشکیل این ناحیه گرم در بالادست جبهه احتراقی بررسی خواهد شد. شکل ۵ همچنین نشان می‌دهد که جابجایی نفت در احتراقی تر بیشتر متاثر از توزیع بخار آب است تا محل جبهه احتراقی. در احتراق هوای خشک، جبهه احتراقی نفت را جاروب کرده و به سمت پایین دست می‌راند. در احتراق هوای خشک، نفت زیادی در پایین دست جبهه جمع می‌شود. در احتراق تر، اگر چه جبهه احتراقی هنوز اثر جاروبی دارد ولی جبهه گرمایی تشکیل شده در انتهای ناحیه بخار نیز تاثیر قابل توجهی در جابجایی نفت دارد. در نتیجه، در احتراق تر نفت کمتری در جلوی جبهه جمع می‌شود و کک کمتری نیز تشکیل می‌شود.

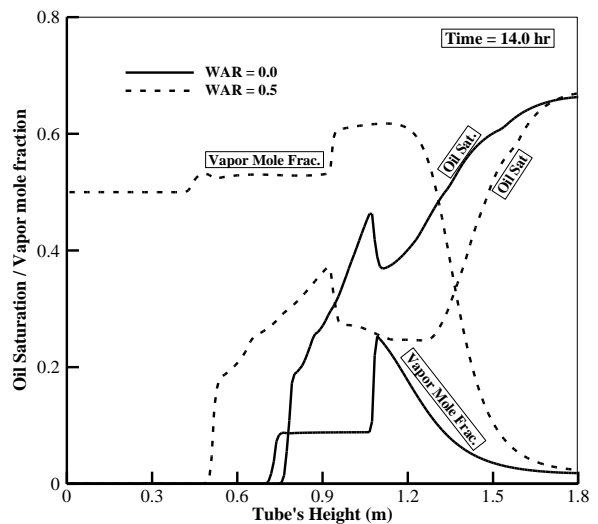
در شکل ۶ حجم نفت برداشت شده طی احتراق درجا برای دو حالت هوای خشک و هوای مرطوب نشان داده شده است. همانطوری که انتظار می‌رفت تزیق آب، نرخ برداشت نفت را افزایش داده است. در شکل ۷ حجم گاز CO_2 برداشت شده برای دو حالت باهم مقایسه شده است. مشاهده می‌شود حجم CO_2 برداشت شده در احتراقی تر کمتر از احتراق خشک است. دلیل این موضوع این است که مطابق شکل ۴ غلظت کک در احتراقی تر کمتر از احتراق خشک است و در نتیجه سوخت کمتری محترق می‌شود. با وجود اینکه این موضوع با سایر نتایج شبیه‌سازی حاضر همخوانی دارد ولی با آنچه که در مطالعات تجربی مشاهده شده است مطابقت ندارد (مراجع [۷] و [۸]). احتمال دارد بخشی از CO_2 از پدیده‌هایی تولید می‌شود که در مدل حاضر گنجانده نشده‌اند. واکنش مستقیم کک با بخار آب در احتراقی تر از جمله این پدیده‌هاست. به عبارت دیگر، عدم تطابق شکل ۷ با مشاهدات منتشر شده از تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که بخار آب تزیق شده علاوه بر تاثیر فیزیکی در انتقال حرارت تاثیر شیمیایی نیز دارد. در سالهای اخیر، تحقیقاتی در مورد اثر شیمیایی بخار آب نیز انجام شده است. در ادامه تحقیق این تاثیر شیمیایی بررسی خواهد شد.



شکل ۶: حجم نفت برداشت شده طی احتراق درجا برای دو حالت هوای خشک و هوای مرطوب.



شکل ۴: توزیع دما و غلظت کک در لوله در زمان ۱۴ ساعت پس از شروع فرآیند با و بدون تزیق آب. WAR نشان دهنده نسبت مولی آب به هوا در سیال تزیق شده است.



شکل ۵: توزیع بخار آب و فاز نفت در لوله در زمان ۱۴ ساعت پس از شروع فرآیند با و بدون تزیق آب. WAR نشان دهنده نسبت مولی آب به هوا در سیال تزیق شده است.

در شکل ۵ توزیع کسر مولی بخار آب در فاز گاز و اشباع (کسر حجمی) فاز نفت در زمان ۱۴ ساعت پس از شروع فرآیند نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که برخلاف جبهه احتراق هوای خشک که در آن، بخار آب حاصل از واکنش‌های شیمیایی و نیز تبخیر آب اولیه محیط متخلخل در پایین دست جبهه جمع شده‌اند، در احتراقی تر بخار آب قابل توجهی در بالادست جبهه وجود دارد. همچنین عرض ناحیه بخار (شکل ۱) در احتراقی تر بسیار بیشتر از احتراقی هوای خشک است. حضور بخار آب سبب افزایش انتقال حرارت در لوله (هم در بالادست و هم در پایین دست جبهه) شده است. در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت چنانچه در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود دما در بالادست جبهه احتراقی تر بیشتر از احتراقی هوای خشک است. این امر سبب پیش‌گرمایش هوای ورودی به جبهه احتراقی و افزایش نرخ واکنش‌های شیمیایی می‌شود. در تحقیقات بعدی، تاثیر این پیش‌گرمایش هوا روی تثبیت جبهه احتراقی و همچنین عوامل موثر بر

N_r	تعداد واکنش‌ها
P	فشار
R	ثابت گازها
R_r	نرخ واکنش
S	اشباع (کسر حجمی) فاز
T	دما
t	زمان
v	سرعت منتسب به فاز (در معادله داری)
x	کسر مولی
Z	عمق مخزن

فهرست علائم یونانی

ρ	چگالی
μ	لزجت
γ	وزن مخصوص
ΔH	گرمای واکنش
Δt	گام زمانی

زیرنویس‌ها

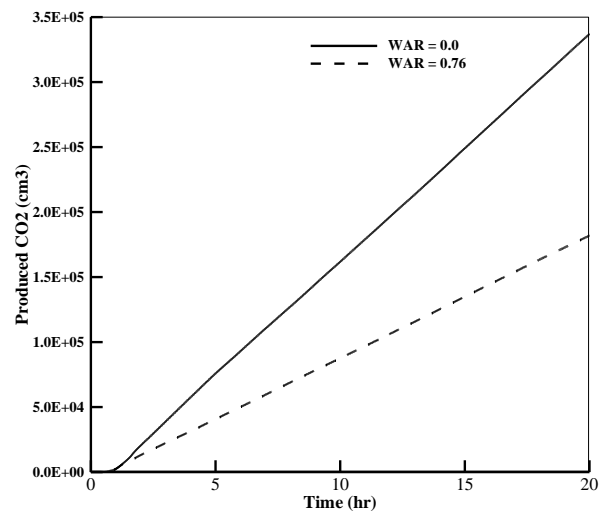
c	کک
i	گونه
g	فاز گاز
o	فاز نفت
r	واکنش
$rock$	سنگ مخزن
s	فاز جامد (کک)
tot	کل فازها
W	چاه تزریق یا برداشت
w	فاز آب

بالانویس‌ها

E	انرژی
m	جرم

مراجع

- 1- Sarathi, P. In-Situ Combustion Handbook Principles and Practices, *National Petroleum Technology Office: Tulsa, OK, 1999*, Report DOE/PC/91008-0374, OSTI ID 3174.
- 2- http://petrowiki.org/In-situ_combustion, Visited at December 6, 2017.
- 3- Penberthy Jr, W.L., Berry, H.J. and Ramey Jr, H.J., 1968, January. "Some fundamentals of steam-plateau behavior in combustion oil recovery", In *Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*. Society of Petroleum Engineers.
- 4- Alderman, J.H. and Osoba, J.S., 1971, January. "A Study of Oil Recovery by In-Situ Combustion with the Addition of Water", In *SPE California Regional Meeting*. Society of Petroleum Engineers.
- 5- Burger, J.G. and Sahuquet, B.C., 1973, "Laboratory research on wet combustion", *Journal of Petroleum Technology*, 25(10), pp.1-137.
- 6- Bennion, D.W., Donnelly, J.K. and Moore, R.G., 1977, "A laboratory investigation of wet combustion in



شکل ۷: حجم CO₂ برداشت شده طی احتراق درجا برای دو حالت هوای خشک و هوای مرطوب.

نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی یک‌بعدی یک چیدمان آزمایشگاهی احتراق درجا با و بدون تزریق آب به همراه هوا نشان می‌دهد تزریق آب سبب افزایش نرخ انتقال حرارت جبهه احتراقی به پایین دست جبهه و در نتیجه افزایش بازده برداشت نفت می‌شود. جابجایی نفت در حالتی که آب تزریق می‌شود مستقیماً توسط جبهه احتراقی انجام نمی‌شود بلکه جبهه احتراقی گرمای لازم برای تشکیل یک ناحیه بخار در پایین دست جبهه را فراهم می‌کند و ناحیه بخار مذکور سبب جابجایی نفت می‌شود. تزریق آب، در ماکزیمم دمای جبهه تأثیری نداشته ولی انتقال حرارت از جبهه به پایین دست جبهه را افزایش داده است.

شبیه‌سازی حاضر نشان می‌دهد که تزریق آب به همراه هوا سبب کاهش حجم CO₂ برداشت شده می‌شود. این موضوع اگرچه با سایر نتایج شبیه‌سازی از جمله کاهش غلظت کک در احتراق تر همخوانی دارد اما نتایج منتشر شده از آزمایش‌های تجربی احتراق تر خلاف این امر را نشان می‌دهند. بنابراین به نظر می‌رسد آب تزریق شده علاوه بر نقش فیزیکی در افزایش انتقال حرارت، نقش شیمیایی نیز داشته باشد. در ادامه این پژوهش نقش شیمیایی احتمالی آب در احتراق تر بررسی خواهد شد.

فهرست علائم

C	غلظت
E	انرژی مولی
E_r	انرژی فعال‌سازی واکنش
H	آنتالپی مولی
K	نفوذپذیری مخزن متخلخل
K^*	تابع تجربی تعادل فازی
K_c	ضریب هدایت گرما
k_r	نفوذپذیری نسبی فاز سیال
m_r	مرتبه واکنش نسبت به غلظت ترکیب نفتی
n_r	مرتبه واکنش نسبت به اکسیژن
N_c	تعداد گونه‌ها
N_f	تعداد فازهای سیال
N_p	تعداد فازها

- the Athabasca oil sands", *The Oil Sands of Canada-Venezuela*, 17, pp.334-45.
- 7- Greaves, M., Field, R.W. and Al-Shalabe, M.I., 1987, "In situ combustion studies of North Sea Forties and Maya crude oils", *Chemical engineering research & design*, 65(1), pp.29-40.
- 8- Bagci, A.S., 2006, "Wet forward combustion for heavy oil recovery", *Energy Sources, Part A*, 28(3), pp.221-232.
- 9- Lapene, A., Castanier, L.M., Debenest, G., Quintard, M.Y., Kamp, A.M. and Corre, B., 2009, "Effects of water on kinetics of wet in-situ combustion", In *SPE Western Regional Meeting*. Society of Petroleum Engineers.
- 10- Smith, F.W. and Perkins, T.K., 1973, "Experimental and numerical simulation studies of the wet combustion recovery process", *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 12(03).
- 11- Gonçalves, L.I.B. and Trevisan, O.V., 2009, "Numerical Simulation of Combustion Lab Experiments on Wet Forward Combustion", 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, RS, Brazil.
- 12- Coats, K.H., 1980, "In-situ combustion model", *Society of Petroleum Engineers Journal*, 20(06), pp.533-554.
- 13- Vinsome, P.K.W. and Westerveld, J., 1980, "A simple method for predicting cap and base rock heat losses in thermal reservoir simulators", *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 19(03).
- 14- S. Sarmasti, K. Mazaheri, "Investigating reservoir's initial oil saturation effect on in-situ combustion recovery method performance using numerical simulation", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 191-202, 2015 (In Persian).
- ۱۴- سیروس سرمستی، کیومرث مظاهری، ۱۳۹۴، "بررسی تاثیر اشباع اولیه نفت مخزن در عملکرد روش برداشت احتراق درجا با استفاده از شبیه سازی عددی"، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۵، شماره ۱۱، صفحه ۲۰۲-۱۹۱.
- 15- Yang, X. and Gates, I.D., 2009, "Combustion kinetics of Athabasca bitumen from 1D combustion tube experiments", *Natural resources research*, 18(3), pp.193-211.
- 16- Belgrave, J.D.M., Moore, R.G., Ursenbach, M.G. and Bennion, D.W., 1993, "A comprehensive approach to in-situ combustion modeling", *SPE Advanced Technology Series*, 1(01), pp.98-107.