

تحلیل و شبیه‌سازی فرایند کاهش وزن مولکولی هیدروکربن‌های

سنگین در شرایط عملیاتی مختلف چاه نفت مشبک شده

سپیده شمشیری^۱، بهروز میرزایی^{۲*} هادی سید باقری^۳

۱- دانشجوی دکترای دانشگاه محقق اردبیلی، گروه مهندسی شیمی،

۲- استاد دانشگاه محقق اردبیلی، گروه مهندسی شیمی، mirzayib@uma.ac.ir

۳- دکترای مهندسی شیمی، پژوهشگاه صنعت نفت

چکیده

در این پژوهش، اثر کاتالیست بر فرایند شکست هیدروکربن‌های سنگین در بخش مشبک چاه نفت با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی بررسی گردید. هندسه چاه نفت عمودی با نواحی مشبک شده در بخش انتهایی چاه به‌طور سه‌بعدی مش‌بندی و مدل‌سازی شد. در این مدل‌سازی سیال نیوتنی، تراکم‌ناپذیر و با جریان آرام فرض شد و معادلات حاکم بر جریان سیالات، انتقال جرم و واکنش‌های شیمیایی به روش المان محدود حل شدند. سپس تأثیر پارامترهایی مانند نوع کاتالیست، تغییرات دما، درصد تبدیل، حضور بخار آب، تشکیل رسوب کربن و شاخص بهره‌وری چاه بر فرایند بررسی و تحلیل گردید. نتایج نشان داد که افزایش دما در محدوده دمایی 350°C تا 425°C و استفاده از یک لایه کاتالیست بر روی نواحی مشبک، نرخ تبدیل از ۷ درصد به ۴۵ درصد افزایش می‌یابد. بررسی اثر نوع کاتالیست نشان داد که کاتالیست آلومینا-سیلیکا با انرژی فعال‌سازی پایین ($22/3 \text{ kJmol}^{-1}$) و همچنین مساحت سطح بالا ($240/553 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$)، بالاترین میزان تبدیل را ارائه می‌دهد. همچنین بررسی تأثیر بخار آب با سه نسبت مختلف بخار به نفت یعنی $0/1$ ، $0/05$ و $0/02$ نشان داد که افزایش نسبت بخار به نفت میزان درصد تبدیل را تقریباً ۶ درصد افزایش می‌دهد. افزایش قطر پرفوریشن‌ها از بازه $4/5 \text{ mm}$ تا $10/5$ موجب افزایش ۱۰ برابری نرخ بهره‌وری چاه شد که منجر به افزایش چشمگیر در نرخ تولید چاه می‌شود. یکی از چالش‌های اصلی در این فرایند، تشکیل رسوب کربن بر روی سطح کاتالیست بود که منجر به کاهش تدریجی فعالیت کاتالیستی شد. در مراحل اولیه، کاتالیست عملکرد بالایی دارد، اما با گذر زمان، فعالیت آن کاهش یافته و نرخ رسوب کک افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج مدل‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی در محدوده دمایی 350°C تا 425°C و فشار 20 bar نشان داد که نتایج شبیه‌سازی همخوانی خوبی با داده‌های تجربی دارند.

کلیدواژه: وزن مولکولی، فرایند شکست، هیدروکربن‌های سنگین، کاتالیست، نفت خام، بخش مشبک، دینامیک سیالات محاسباتی

۱- مقدمه

نفت سنگین نوعی نفت خام است که ویسکوزیته بالایی دارد و جریان آن به راحتی امکان‌پذیر نیست. این نوع نفت دارای درجه API^۱ بین ۱۰ تا ۲۰ و ویسکوزیته بیشتر از ۱۰۰ میلی‌پاسکال ثانیه است [۱]. سنگینی این نفت به نسبت پایین هیدروژن به کربن در مولکول‌ها و همچنین سایر مواد معدنی که به افزایش چگالی نفت کمک می‌کنند، نسبت داده می‌شود [۲، ۳]. اساس فرآیند بهبود نفت سنگین شکستن پیوندهای اتمی بین مولکول‌های نفت سنگین و تبدیل این ماکرومولکول‌ها به مولکول‌های کوچک است [۴]. مکانیزم‌های کاهش ویسکوزیته نفت سنگین شامل کاهش شیمیایی غیرقابل بازگشت ویسکوزیته پس از واکنش کاتالیستی و کاهش ویسکوزیته فیزیکی در رقیق‌سازی و حل شدن بین نفت خام ارتقا یافته و نفت سنگین می‌باشد [۵]. برای افزایش بهره‌برداری از نفت سنگین، نیاز فوری به توسعه روش‌های مؤثر برای کاهش ویسکوزیته و بهبود حمل‌ونقل آن وجود دارد. در فرآیند اصلاح و کاهش ویسکوزیته، ماکرومولکول‌های نفت سنگین می‌توانند توسط کاتالیزورها تجزیه شوند [۶]. تحقیقات جدید نشان می‌دهند علاوه بر روش‌های رایج مانند تزریق گازها و استفاده از کاتالیست‌های نانوساختار، می‌توان از مایعات یونی اصلاح‌شده که تأثیر بسزایی در کاهش وزن مولکولی هیدروکربن‌های سنگین دارند استفاده کرد. این ترکیبات با پایداری حرارتی بالا و توانایی شکستن پیوندهای مولکولی، گزینه‌ای کارآمد برای بهبود سیالیت نفت سنگین محسوب می‌شوند [۷]. به‌منظور مدل‌سازی دقیق‌تر رفتار هیدروکربن‌های سنگین و کاهش وزن مولکولی آن‌ها در شرایط عملیاتی مختلف، استفاده از شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی به‌عنوان یک ابزار پیشرفته مطرح شده است. این روش می‌تواند به تحلیل رئولوژی و جریان‌پذیری نفت سنگین کمک کند [۸]. سلیم^۲ و همکارانش پژوهشی با هدف بررسی پیش بینی اثر قطر و طول پرفوریشن، زاویه جریان پرفوریشن، سرعت جریان و اثر شکل نواحی مشبک بر افت فشار و سپس شاخص بهره‌وری چاه عمودی با دو ناحیه مشبک انجام دادند. در این مطالعه از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی^۳ و یک کد نرم افزاری محاسباتی ANSYS CFX15.0 برای شبیه‌سازی مدل جریان آشفته k-ε سه‌بعدی در یک چاه عمودی مشبک شده استفاده شده است. شبیه‌سازی چاه عمودی با اعمال قوانین بقای جرم و مومنوم انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهد حداکثر افت فشار اصطکاکی در محل پرفوریشن‌ها اتفاق می‌افتد که با افزایش قطر نواحی مشبک شده افزایش می‌یابد. برای تمامی قطر پرفوریشن‌ها با طول ثابت (۰/۱۵ متر) افت فشار اصطکاکی بالاتر از ۸۲ درصد فشار کل است. همچنین دریافتند که افزایش جریان ورودی به نسبت نرخ جریان باعث افزایش افت فشار کل و سپس کاهش در نرخ بهره‌وری می‌شود [۹]. لی^۴ و همکارانش بر اساس روابط مومنوم، روابط انتقال جرم و جریان گرمی متغیر در چاه افقی، مدل‌های محاسبه افت فشار از سیال در چاه‌های افقی مشبک شده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از محاسبه و تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که افت فشار اصطکاکی، افت فشار شتابی و افت فشار اختلاطی اثرات متفاوتی در افت فشار کلی سیال دارند. همچنین نشان دادند ویسکوزیته سیال، نرخ تولید و طول چاه افقی نیز دارای تأثیرات مختلفی بر انواع افت فشار هستند [۱۰]. وی^۵ و همکارانش با استفاده از شبیه‌سازی عددی، تأثیر پارامترهای مختلف مانند عمق و قطر مشبک، چگالی مشبک، ضخامت ناحیه آسیب‌دیده و تراوایی تونل مشبک را بر بهره‌وری چاه ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تراوایی تونل مشبک بیشترین تأثیر را بر بهره‌وری دارد و جلوگیری از انسداد آن می‌تواند

^۱ (API): American Petroleum Institute

^۲ Salim

^۳ Computational Fluid Dynamics

^۴ Li

^۵ Wei

بهره‌وری را بهبود بخشد. این مدل می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی چاه‌های مشبک و افزایش بهره‌وری تولید نفت و گاز کمک کند [۱۱]. این پژوهش قصد دارد با کمک ابزار دینامیک سیالات محاسباتی، فرآیند کاهش وزن مولکولی هیدروکربن‌های سنگین در چاه نفت مشبک شده تحت شرایط عملیاتی مختلف را مدل‌سازی کند. در این راستا این فرایند را از جنبه‌های مختلف مانند میزان رسوب، اثر حضور بخار آب بر عملکرد فرایند و غیره مورد بررسی قرار می‌دهد. همچنین در مدل‌سازی انجام شده، اثر پارامترهای عملیاتی نظیر دما و نوع کاتالیست بر کاهش وزن مولکولی هیدروکربن‌های سنگین مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج مدل‌سازی با داده‌های موجود در مراجع مقایسه می‌گردد. نتایج این پژوهش می‌تواند به ارائه راهنمایی‌هایی برای طراحی فرآیندهای کارآمدتر در تولید نفت و کاهش چالش‌های مرتبط با انتقال هیدروکربن‌های سنگین کمک کند.

۲- روش شناسی

۲-۱- مدل‌سازی عددی

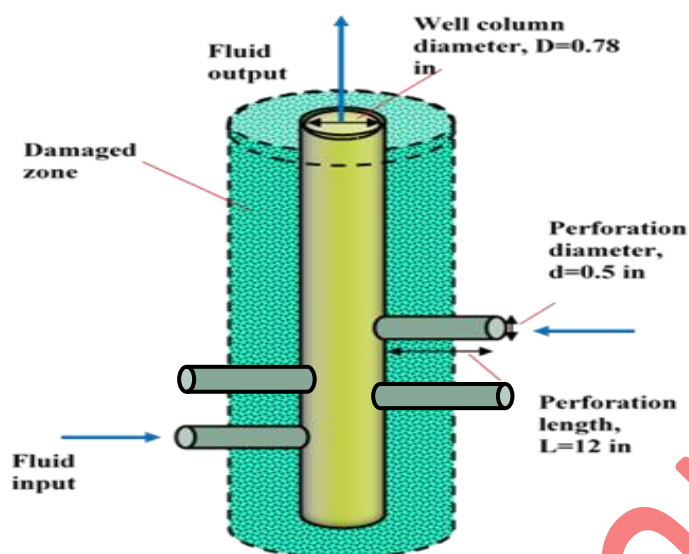
به منظور حل معادلات دیفرانسیل مربوط به جریان و واکنش‌های شیمیایی از روش عددی بر پایه المان محدود استفاده شد. این روش برای حل همزمان معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی^۱، ناویر-استوکس^۲، معادلات انتقال جرم و واکنش‌های شیمیایی به کار گرفته شد. در این مطالعه، سیال نیوتنی، تراکم‌ناپذیر و با جریان آرام در نظر گرفته شده است [۱۱]. خواص سیال در این شبیه‌سازی دانسیته 980 kg/m^3 و ویسکوزیته دینامیکی 0.49 Pa.s انتخاب شده‌اند.

۲-۲- هندسه شبیه‌سازی شده برای مختصات سه بعدی و مش‌بندی مدل

هندسه مورد مطالعه یک چاه نفت عمودی با پرفوریشن‌هایی در بخش انتهایی است. ابعاد و ویژگی‌های هندسی مطابق داده‌های تجربی گزارش شده در منابع معتبر انتخاب شده است [۱۲]. شعاع ستون چاه، طول و شعاع پرفوریشن‌ها و سایر مشخصات هندسی به دقت در مدل اعمال شده است. مش‌بندی این هندسه در مختصات سه‌بعدی انجام شده و از المان‌های خیلی بزرگ برای کاهش زمان محاسباتی استفاده شده است. بررسی استقلال از مش نشان داد که استفاده از 3463 المان منجر به نتایج پایدار و مستقل از شبکه می‌شود. هندسه شبیه‌سازی شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

² Continuity

² Navier-Stokes



شکل ۱: هندسه چاه در مختصات سه بعدی

۳-۲- معادلات حاکم بر مدل

برای مدل سازی جریان سیال با فرض جریان آرام و تراکم ناپذیر، علاوه بر معادله پیوستگی که بقای جرم را تضمین می کند، معادله ناویر-استوکس نیز برای توصیف حرکت سیال در نظر گرفته می شود. این معادلات برای جریان های سه بعدی، دائم و تراکم ناپذیر به صورت معادلات (۱) و (۲) بیان می شوند [۱۳].

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \rho g + S \quad (2)$$

در اینجا، زیرنویس i و j بیان کننده جهت در راستاهای دستگاه مختصات است. در معادلات (۲) و (۱)، P فشار، u سرعت، μ ویسکوزیته، ρ چگالی، τ تنش برشی، S نیروی سطحی و g شتاب گرانش است.

۴-۲- شرایط مرزی

شرایط مرزی برای ورودی $u=2/5$ m/s و برای خروجی $p=8000$ Pa در چاه نفت مشبک در نظر گرفته شده است. همچنین در دیواره چاه فرض شده است که جریان سیال صفر باشد، به عبارتی دیگر شرط عدم لغزش در دیواره چاه حاکم است. برای بررسی نفوذ کاتالیست در قسمت مشبک شده چاه نفت خام نیز، به ترتیب شرایط مرزی غلظت و شار خروجی برای ورودی و خروجی چاه نفت خام در نظر گرفته می شود.

۵-۲- بررسی میزان درصد تبدیل و پارامترهای موثر بر آن

برای بررسی اثر کاتالیست بر کاهش وزن مولکولی هیدروکربن‌ها، واکنش شکست در فشار ۲۰ bar و دماهای ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۲۵ °C مطابق با داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴]. در واکنش‌های شکست کاتالیستی توسط شکستن پیوندهای کربن-کربن و کربن-هترواتم، هیدروکربن‌های سنگین به هیدروکربن‌های سبک تبدیل می‌شوند. به کمک نرم‌افزار و با استفاده از روابط موجود و تعریف فیزیک‌های جدید، اثر کاتالیست روی هردو دیواره‌های نواحی مشبک مورد بررسی قرار گرفت. واکنش‌ها در این پژوهش با $n=5$ و $m=7$ انتخاب شده که n و m به ترتیب نشان‌دهنده تعداد اتم‌های کربن و هیدروژن در فرمول شیمیایی ترکیبات مورد بررسی هستند [۱۵]. همچنین غلظت اولیه هیدروکربن‌ها طبق واکنش‌های مورد استفاده ۱۰ mol/L انتخاب شده است. در این پژوهش، با فرض حاکم بودن رابطه آرنیوس و استفاده از اطلاعات اولیه واکنش‌ها (ضریب فرکانس، انرژی اکتیواسیون) که در جدول ۱ بیان شده است، تغییرات غلظت تمامی ترکیبات شیمیایی در طول زمان محاسبه شده است. بر این اساس، میزان تولید محصولات یا تبدیل واکنش‌دهنده‌ها در هر واکنش تعیین می‌شود. رابطه استفاده شده برای تعیین درصد تبدیل، رابطه ارائه شده در مقالات مورد مطالعه بوده است [۱۶]. همچنین برای بررسی اثر کاتالیست روی فرایند روابط (۳) و (۴) مورد استفاده قرار گرفته است.

$$N_A = K_g (C_{A_g} - C_{A_s}) \quad (3)$$

$$N_A = -R_A \quad (4)$$

در این روابط، N_A شار مولی در انتقال جرم، K_g ضریب انتقال جرم، C_{A_g} غلظت اولیه، C_{A_s} غلظت میانی، R_A همان نرخ واکنش است که در رابطه (۴) بیان گردیده است [۱۷]. در این مطالعه، ضرایب نفوذ مولکولی برای ترکیبات مختلف شبیه‌سازی شده در محدوده 10^{-10} تا 10^{-9} m²/s در نظر گرفته شده‌اند. این محدوده بر اساس مطالعات قبلی در مورد انتقال جرم در فرآیندهای نفت سنگین استخراج شده است [۱۸، ۱۹]. استفاده از این مقادیر به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های دقیق آزمایشگاهی و همچنین به عنوان مقادیر استاندارد برای مدل‌سازی عددی در فرآیندهای مشابه صورت گرفته است. واکنش‌های مورد استفاده در مدل‌سازی و مقادیر انرژی فعال‌سازی و ضریب فرکانس در جدول ۱ ارائه شده است.

واکنش	ضریب فرکانس ($\text{m}^3\text{mol}^{-1}\text{s}^{-1}$)	انرژی فعال سازی (kcalmol^{-1})	منابع
$C_{12}H_{28} \Rightarrow C_5H_{12} + C_7H_{16}$	۶۵۰۰۰	۲۷/۸	[۲۰, ۱۵]
$C_7H_{16} \Rightarrow C_5H_{12} + C_2H_4$	۱۰۵۵۰	۲۱/۱	[۲۰, ۱۵]
$C_{12}H_{24} \Rightarrow C_5H_{10} + C_7H_{14}$	۲۰۰۰۰	۲۱	[۲۰, ۱۵]
$C_{12}H_{25} + C_7H_{14} \Rightarrow C_7H_{14} + C_5H_9 + C$	۹۰۰	۱۴	[۲۰, ۱۵]
$n - C_7H_{16} \Rightarrow C_7H_{14} + H_2$	۸۰۰۰	۲۳/۴	[۲۰, ۱۵]
$C_5H_{10} \Rightarrow C_5H_4 + 3H_2$	۸۰۰	۲۲/۷	[۲۰, ۱۵]
$3C_7H_{14} + C_5H_{10} \Rightarrow 3C_7H_{16} + C_5H_4$	۸۰۰	۱۸/۳۱	[۲۰, ۱۵]
$3C_7H_{14} + C_5H_{10} \Rightarrow 3C_7H_{16} + C_5H_4$	۹۳۰۰	۱۹/۵	[۲۰, ۱۵]
$n - C_7H_{16} \Rightarrow i - C_7H_{16}$	۵۷۰	۴	[۲۰, ۱۵]
$n - C_7H_{14} \Rightarrow i - C_7H_{14}$	۴۹۰	۱۹	[۲۰, ۱۵]
$C_7H_{14} + CH_3CH + CHC_2H_5 + CHCH_2 \Rightarrow 2C_7H_{14} + H_2$	۳۸۰	۱۸/۳	[۲۰, ۱۵]

اثر نوع کاتالیست با مساحت سطح و انرژی فعال سازی مختلف نیز در این مدل سازی بررسی شده است. انواع کاتالیست با انرژی فعال سازی و مساحت سطح مختلف در جدول ۲ آورده شده است.

انواع کاتالیست	مساحت سطح (m^2g^{-1})	انرژی اکتیواسیون (kJmol^{-1})	منابع
SiO_2	۷۸۵-۶۰۰	۶۸/۲۴۹	[۲۱]
Nano-ZSM-5	۳۹۵	۵۸	[۲۲]
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	۲۴۰/۵۵۳	۲۲/۳	[۲۳]

۲-۶- بررسی اثر وجود بخار آب و ترکیب درصد هیدروکربن‌های واکنش داده

اثر وجود بخار آب برای سه مقدار مختلف نسبت بخار به نفت $^{۱} (۰/۵، ۰/۰۲، ۰/۰۵)$ و تأثیر رسوب کربن روی سطح کاتالیست در دمای 425°C و فشار ۲۰ bar بررسی شده است. مقدار انرژی فعال‌سازی برای واکنش‌ها با حضور بخار آب برای مدل‌سازی از مقالات آزمایشگاهی استخراج شده است [۲۰]. نتایج بدست آمده در کار شبیه‌سازی با کار آزمایشگاهی مذکور تطابق خوبی دارد. حضور بخار آب در فرایند موجب کاهش انرژی فعال‌سازی می‌گردد. همچنین در این بررسی به کمک نرم‌افزار در ابتدا و انتهای نواحی مشبک شده ترکیب درصد تمامی هیدروکربن‌های شرکت کننده در واکنش بدست آمد. بررسی ترکیب درصد در این نواحی به ارتقاء فرایند شکست کاتالیستی کمک می‌کند. هیدروکربن‌های موجود با توجه به روند واکنش و تخریب برخی پیوندها در حین واکنش در نقاط مختلف با توجه به محل ایجاد نواحی مشبک شده در هندسه شبیه‌سازی شده ترکیب درصد مختلفی دارند.

۲-۷- بررسی رسوب در فرایند کاهش وزن مولکولی و مقدار فعالیت کاتالیست در فرایند

رسوب کربن در سطح کاتالیست به طور معمول در فرایندهای کراکینگ هیدروکربن‌ها مشاهده می‌شود که می‌تواند بر فعالیت کاتالیست‌ها تأثیر بگذارد. رسوب کربن در فرایند کراکینگ کاتالیستی در این پژوهش، در دمای 425°C و فشار ۲۰ bar مورد بررسی قرار گرفته است. اثر حضور کاتالیست و عدم حضور کاتالیست بدون در نظر گرفتن نوع کاتالیست و میزان فعالیت کاتالیست در فرایند طبق مقاله Zavarukhin و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت [۲۴]. وابستگی زمانی فعالیت کاتالیست با رابطه (۵) بیان شده است.

$$\frac{da}{dt} = -k_a r^2 c_c a \quad (5)$$

که k_a نیز به صورت رابطه (۶) قابل محاسب خواهد بود.

$$k_a = k_{a_0} \exp\left(\frac{135600}{R_g T} - 32.007\right) \quad (6)$$

در اینجا k_a برابر با $10^6 \times 8/324$ ، نرخ واکنش، c_c غلظت رسوب کک و a فعالیت کاتالیست می‌باشد. این روابط در مدل‌سازی فرایند از مقالات مرتبط بدست آمده است [۲۴].

۲-۸- بررسی شاخص بهره‌وری نفت خام در چاه مشبک شده

شاخص بهره‌وری عبارت است از دبی حجمی خروجی از انتها به ابتدای چاه نفت خام، نسبت به افت فشار کل، که در رابطه (۷) ارائه شده است.

$$PI = \frac{Q}{\Delta P_t} \quad (7)$$

میزان دبی حجمی با استفاده از معادله (۸) بدست آمده است.

$$Q = NVA = NV \frac{\pi d^2}{4} \quad (8)$$

Q دبی حجمی، ΔP_t افت فشار کل، N تعداد پرفوریشن‌ها، V سرعت حرکت سیال، A مساحت و d قطر پرفوریشن‌ها می‌باشد [۲۶، ۲۵]. میزان اختلاف فشار برای محاسبه بهره‌وری از پروفایل‌های فشار به کمک مدل‌سازی محاسبه گردیده است.

۲-۹- استقلال از مش و اعتبارسنجی مدل

به منظور بررسی دقت مدل‌سازی، آزمون استقلال از مش با استفاده از چهار شبکه مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد المان‌ها از ۳۴۶۳ به ۷۰۰۲، تغییرات در درصد تبدیل هیدروکربن‌ها کمتر از ۲ درصد بوده و در نتیجه، مدل از نظر مش‌بندی بهینه است. برای اطمینان از صحت جواب حاصل از حل معادلات حاکم بر مسئله ابتدا باید استقلال از مش و سپس نتایج به دست آمده از روش حل عددی با نتایج تجربی [۲۶، ۲۷] موجود مقایسه شود. مقایسه نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که میانگین درصد خطا کمتر از ۵ درصد است، که اعتبار مدل را تأیید می‌کند. جدول (۳) بررسی استقلال از مش را در این کار نشان می‌دهد. این بررسی برای درصد تبدیل در دمای 425°C انجام گردید.

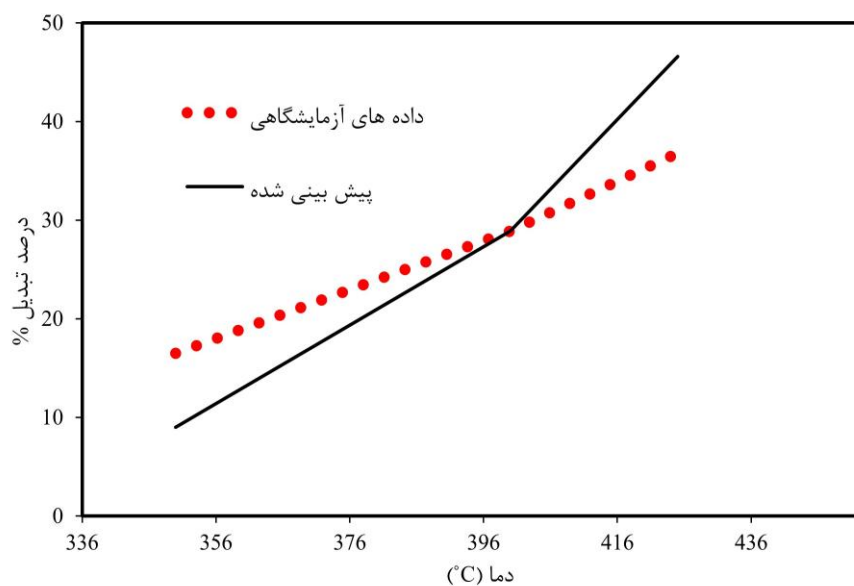
جدول ۳- نتایج بررسی استقلال از مش

تعداد المان‌های مش بندی شده	درصد تبدیل در 425°C
۳۷۱۶۸	۴۴/۷
۷۰۰۲	۴۵/۲
۶۲۴۰	۴۵/۸
۳۴۶۳	۴۶/۶

۳-نتایج و بحث

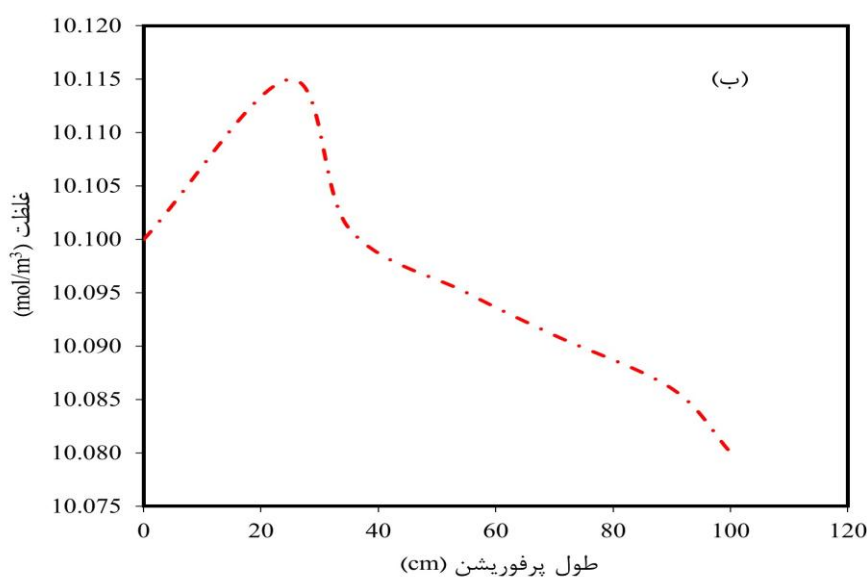
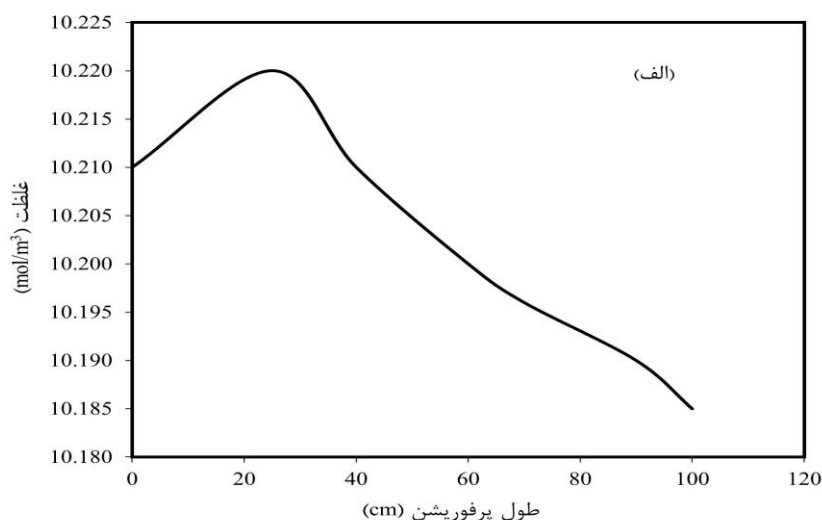
۳-۱- بررسی نرخ تبدیل در فرایند

برای شبیه‌سازی واکنش مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی در یک راکتور ناپیوسته با شرایط آزمایشگاهی هارت و همکارانش [۲۷] در دماهای 350°C ، 400°C و 425°C و فشار ۲۰ bar انجام شد. درصد تبدیل کل فرایند با استفاده از نسبت تبدیل سنگین‌ترین هیدروکربن ($\text{C}_{12}\text{H}_{28}$) به سبک‌ترین هیدروکربن (CHCH_2) در نظر گرفته شده در فرایند، محاسبه گردید [۱۶]. شکل (۲) روند افزایش درصد تبدیل را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. مقایسه داده‌های مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل عددی با داده‌های تجربی تطابق بالایی دارد و بالاترین میزان تبدیل در دمای 425°C رخ داده است، که بیانگر این است که نرخ تبدیل با افزایش دمای فرایند افزایش می‌یابد.



شکل ۲- تغییرات دما در مقابل درصد تبدیل

همچنین، شکل (۳ الف و ب) تغییرات غلظت هیدروکربن‌ها در دمای 425°C را در چاه مشبک شده نشان می‌دهد. این نتایج بیان می‌کنند که غلظت هیدروکربن‌های اولیه در بخش مشبک کاهش یافته و هیدروکربن‌ها در نواحی مشبک شده به خوبی شکسته می‌شوند.

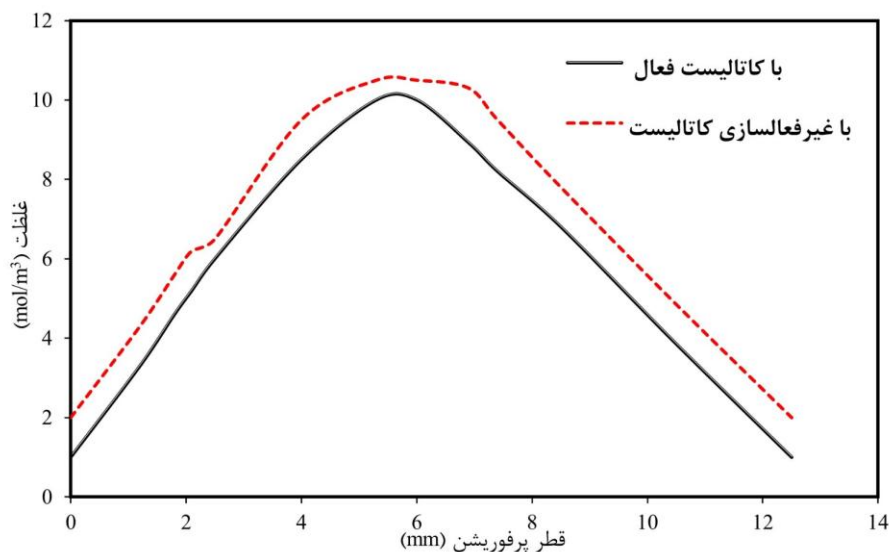


شکل ۳- الف) تغییرات غلظت سنگین ترین هیدروکربن ($\text{C}_{12}\text{H}_{28}$) نسبت به طول پرفوریشن ها ب) تغییرات غلظت سبک ترین هیدروکربن (CHCH_2) نسبت به طول پرفوریشن ها

۳-۲- اثر کاتالیست بر میزان تبدیل

در فرایند شکست به کمک کاتالیست در بخش مشبک شده چاه نفت خام، انتقال ترکیبات سنگین از ترکیبات هیدروکربنی به سمت بخش مشبک شده چاه و جذب ترکیبات روی سطح کاتالیست منجر به تبدیل هیدروکربن های سنگین به هیدروکربن های سبک می گردد. کاتالیست بدون شرکت در خود واکنش، میزان نرخ واکنش را افزایش می دهد. افزایش نرخ واکنش باعث ایجاد تغییر در غلظت واکنش دهنده ها می شود، بنابراین می تواند بر میزان تبدیل آن تأثیر بگذارد [۲۷]. در این پژوهش برای بررسی میزان اثر کاتالیست بر واکنش، پروفایل غلظت مورد بررسی

قرار گرفته است، کمترین غلظت در نواحی مشبک شده در دیواره کاتالیستی چاه و بیشترین غلظت در مرکز نواحی مشبک شده می‌باشد که در شکل (۴) برای نمونه در پروفایل غلظت C_7H_{14} به طور کامل مشخص گردیده است. این نمودار نشان می‌دهد که حضور کاتالیست موجب کاهش چشمگیر غلظت ترکیبات سنگین در دیواره نواحی مشبک چاه شده است. همچنین، بعد از غیرفعال‌سازی کاتالیست به دلیل رسوب کک، غلظت این ترکیبات افزایش یافته که بیانگر کاهش کارایی فرآیند شکست هیدروکربن‌ها است.

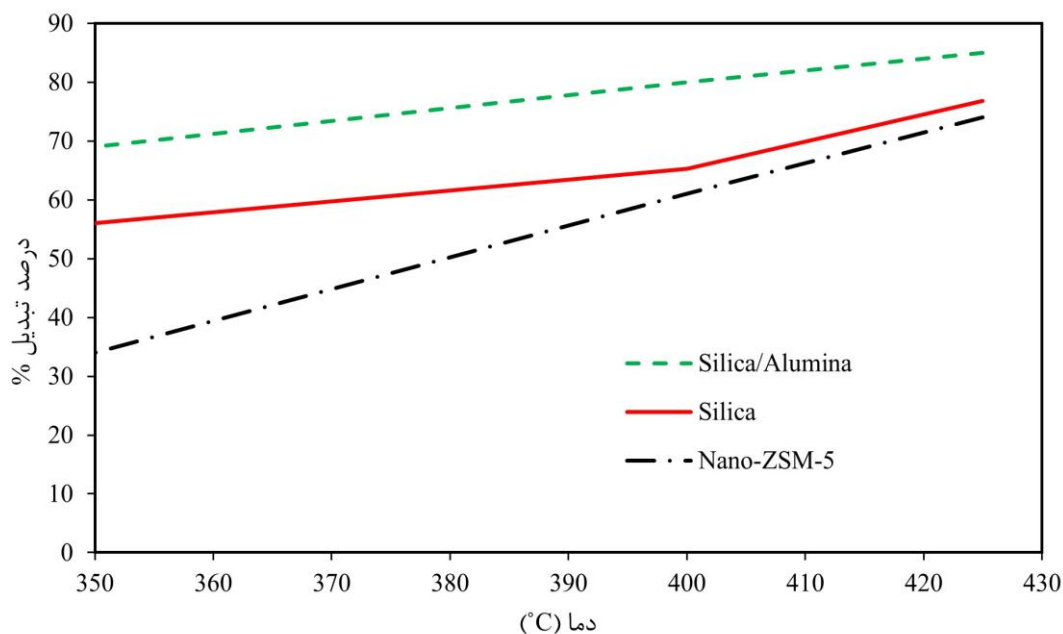


شکل ۴- پروفایل غلظت C_7H_{14} بعد اعمال کاتالیست و بعد از غیر فعال‌سازی کاتالیست در بخش مشبک شده چاه

۳-۳- تاثیر نوع کاتالیست و تغییرات دما بر درصد تبدیل

نرخ تبدیل با استفاده از سه نوع کاتالیست با مساحت سطح و انرژی فعال‌سازی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. محدوده فعال‌سازی و دما به ترتیب $20-70$ kJ/mol و $300-425$ °C در نظر گرفته شد. دما بر تمامی واکنش‌های شیمیایی تاثیر دارد و باعث افزایش سرعت واکنش‌ها می‌شود. البته شدت اثر دما بر واکنش‌های شیمیایی متفاوت است و به انرژی اکتیواسیون واکنش‌ها وابسته می‌باشد یعنی هر چه انرژی اکتیواسیون یک واکنش شیمیایی بزرگ‌تر باشد، با افزایش دما سرعت واکنش افزایش بیشتری خواهد داشت و با کاهش دما نیز سرعت واکنش با شدت بیشتری کاهش می‌یابد. همچنین کاتالیست‌ها با کاهش انرژی فعال‌سازی واکنش‌ها، دمای مورد نیاز برای شکست هیدروکربن‌ها را کاهش داده و بازده تولید محصولات ارزشمند را افزایش می‌دهند. انتخاب کاتالیست مناسب با مساحت سطح بالا، می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر کارایی فرآیند داشته باشد [۲۸]. در این پژوهش کاتالیست SiO_2/Al_2O_3 طبق جدول ۲ با کمترین انرژی فعال‌سازی، بالاترین نرخ تبدیل را دارد، اما کاتالیست‌های Nano-ZSM-5 و SiO_2 که تقریباً انرژی فعال‌سازی یکسانی دارند با افزایش دما میزان نرخ تبدیل کمتری را نسبت به SiO_2/Al_2O_3 نشان دادند. علاوه بر این با بررسی مساحت سطح کاتالیست مشخص شد که کاتالیست SiO_2 با مساحت سطح بالاتر نسبت به کاتالیست Nano-ZSM-5، نرخ تبدیل بیشتری نسبت به آن خواهد داشت. به طور کلی با افزایش دما، نرخ تبدیل در هر سه نوع کاتالیست

افزایش می‌یابد اما نسبت اثربخشی انرژی فعال‌سازی به نسبت میزان مساحت سطح بر درصد تبدیل بیشتر است که در شکل (۵) به خوبی نشان داده شده است.



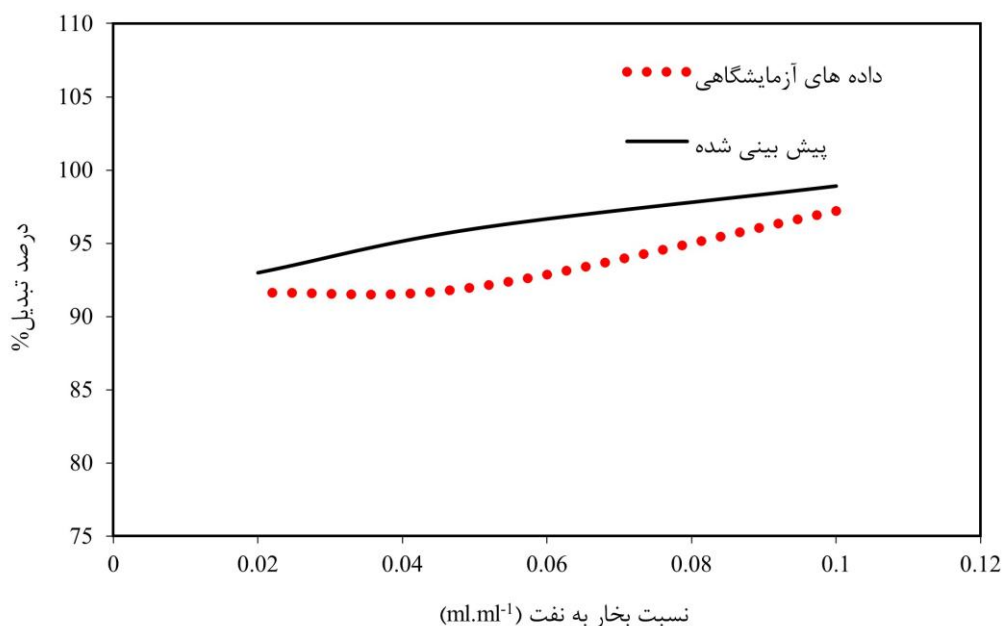
شکل ۵- اثر تغییرات دما و نوع کاتالیست در میزان درصد تبدیل

۳-۴- تاثیر تزریق بخار بر فرآیند و میزان ترکیب درصد هیدروکربن‌های سنگین

حضور بخار با سه نسبت بخار به نفت یعنی 0.1 ml/ml^{-1} ، 0.05 ml/ml^{-1} و 0.02 ml/ml^{-1} در نظر گرفته شده است. نرخ تبدیل ترکیبات نفت خام در بخش مشبک چاه نفت با حضور بخار در دمای 425°C بررسی شد. شکل (۶) نشان می‌دهد که افزایش نسبت بخار به نفت باعث بهبود درصد تبدیل هیدروکربن‌های سنگین می‌شود. مقایسه داده‌های تجربی و مدل‌سازی نشان می‌دهد که مدل CFD توانسته است رفتار سیستم را با دقت بالایی شبیه‌سازی کند [۲۹]. مقدار درصد خطا برای سه نسبت بخار به نفت در جدول (۴) لحاظ گردیده است.

جدول ۴- داده‌های تجربی و تئوری و درصد خطا در سه نسبت بخار به نفت

نسبت بخار به نفت (ml.ml^{-1})	آزمایشگاهی	پیش بینی شده	خطا %
۰/۱	۹۷/۲	۹۹	۱/۸۱
۰/۰۵	۹۲	۹۶/۱۱	۴/۲۷
۰/۰۲۰	۹۱/۶	۹۳/۳۴	۱/۸۶



شکل ۶- تغییرات درصد هیدروکربن های سنگین با حضور بخار

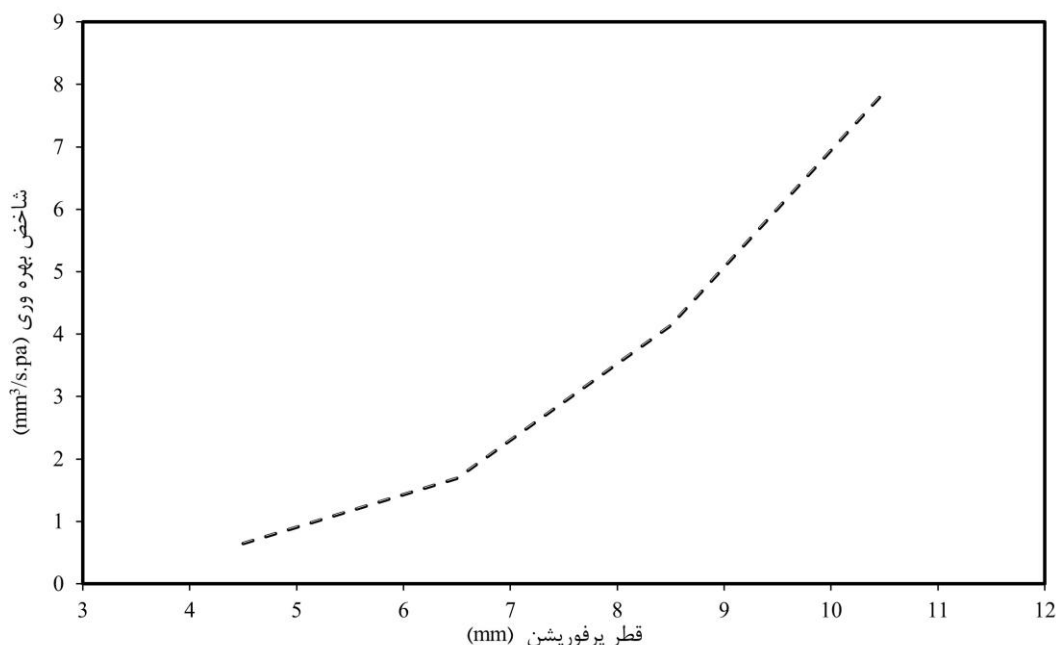
حضور بخار آب در فرآیند شکست هیدروکربن های سنگین، به عنوان یک عامل رقیق کننده و نیز شرکت کننده در واکنش ها، می تواند اثرات متفاوتی داشته باشد. بخار آب با کاهش غلظت هیدروکربن ها، احتمال برخورد مولکول ها و تشکیل محصولات ناخواسته را کاهش می دهد. همچنین، بخار آب می تواند با شرکت در واکنش های جانبی، تولید هیدروژن کرده و به بهبود کیفیت محصولات کمک کند. همانطور که در جدول (۵) نشان داده شده است، گاز هیدروژن بیشترین ترکیب درصد را در دو نقطه A (ورودی هیدروکربن های نفتی به بخش مشبک شده) و نقطه B (خروجی هیدروکربن های نفتی به سمت چاه) دارد. در نقطه A، ترکیبات سنگین تری مانند $C_{12}H_{25}$ و $C_{12}H_{28}$ تحت تأثیر فرآیند شکست کاتالیستی تجزیه شده و واکنش های جانبی مانند شکستن پیوندهای C-H و تولید گاز هیدروژن به میزان بیشتری رخ می دهد. در مقابل، در نقطه B که به چاه نفت نزدیک تر است، مقدار هیدروکربن های سبک افزایش می یابد که نشان دهنده تکمیل فرآیند شکست ترکیبات سنگین تر در طول مسیر جریان است. با توجه به این مقدار بالای گاز هیدروژن، می توان تولید گاز سنتز در فرآیند را از طریق مدل سازی استخراج کرد. گاز سنتز حاوی هیدروژن و مونواکسید کربن است که برای تولید سوخت و مواد شیمیایی در فشارهای بالا استفاده می شود. تولید هیدروژن برای پالایشگاه ها، مانند فرآوری هیدروژن و متانول، بسیار ارزشمند است [۳۰].

جدول ۵: ترکیب درصد هیدروکربن‌های سنگین در بخش مشبک شده

ترکیبات	ترکیب درصد در نقطه A	ترکیب درصد در نقطه B
CHC_2H_5	۰/۰۴۱۴۱	۰/۱۸۳۸
$\text{C}_{12}\text{H}_{24}$	۰/۰۴۰۴۱	۰/۰۳۵۱
$\text{C}_{12}\text{H}_{25}$	۰/۰۳۴۳۱	۰/۰۲۸۱
$\text{C}_{12}\text{H}_{28}$	۰/۰۵۲۵۲	۰/۰۴۲۲
C_7H_{16}	۰/۰۳۴۳۱	۰/۰۲۷۱
C_7H_{14}	۰/۰۶۱۶۲	۰/۰۵۰۳
NC_7H_{16}	۰/۰۷۳۸۲	۰/۰۶۲۳
C_5H_{10}	۰/۰۳۸۴۱	۰/۰۳۰۱
H_2	۰/۴۶۵۳۰	۰/۴۰۲۶
NC_7H_{14}	۰/۰۹۹۰۳	۰/۰۸۸۵
CHCH_2	۰/۰۱۱۲۵	۰/۰۰۹۸
CH_3CH	۰/۰۴۷۶۱	۰/۰۴۰۱

۳-۵- نتایج حاصل از بررسی شاخص بهره‌وری نفت در چاه مشبک شده

یک پارامتر اساسی که شرکت‌های نفتی برای توسعه برنامه تولید یک میدان استفاده می‌کنند، شاخص بهره‌وری چاه‌های نفتی است که پتانسیل تولید را اندازه‌گیری می‌کند [۳۱]. شاخص بهره‌وری نفت براساس اختلاف فشار در طول چاه مشبک محاسبه گردیده است. شکل (۷) اثر تغییرات قطر بر شاخص بهره‌وری در مختصات سه‌بعدی را نشان می‌دهد.

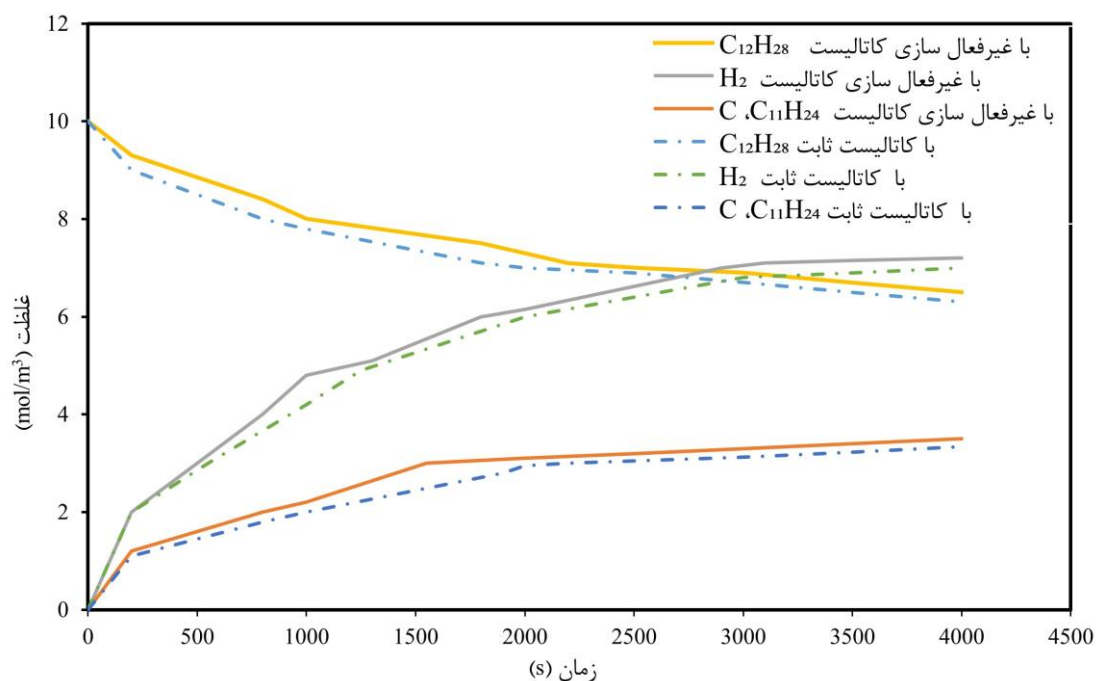


شکل ۷- شاخص بهره‌وری در مقابل تغییرات قطر نواحی مشبک شده

بر طبق شکل (۷) شاخص بهره‌وری با افزایش قطر نواحی مشبک بیش از ۱۰ درصد افزایش یافته است زیرا افزایش قطر موجب افزایش زیادی در نرخ جریان و کاهش ناچیزی در اختلاف فشار می‌گردد که هردوی این تغییرات منجر به تغییرات در شاخص بهره‌وری گردیده است.

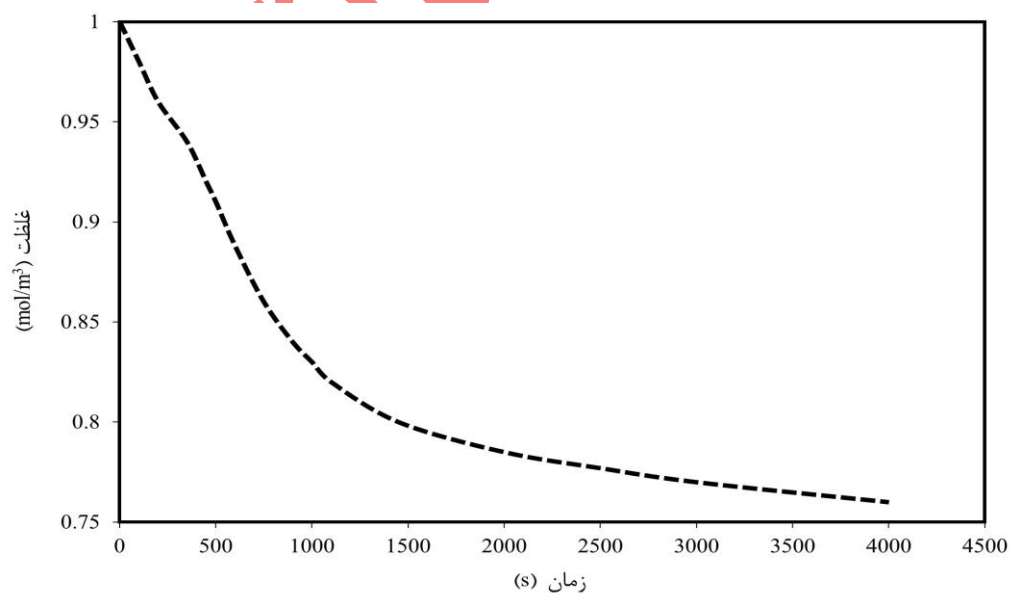
۳-۶- اثر رسوب کربن بر کاهش وزن مولکولی با کاتالیست

تأثیر رسوب کربن بر فعالیت کاتالیست در شکل (۸) نشان داده شده است. در این شکل، ترکیبات با و بدون فعال‌سازی کاتالیست نمایش داده می‌شوند. از تغییر غلظت با زمان به خوبی مشخص شده است که، هنگامی که کاتالیست در واکنش حضور دارد میزان نرخ واکنش ثابت نشان داده شده است. در حضور کاتالیست فعال، کاهش وزن مولکولی با سرعت بیشتری انجام می‌شود و در نتیجه غلظت کاهش می‌یابد. اما با غیرفعال شدن کاتالیست، کاهش غلظت ترکیبات سنگین کمتر شده و واکنش کندتر پیش می‌رود، که این امر تأثیر منفی بر درصد تبدیل هیدروکربن‌های سنگین دارد. رسوب کربن، سطح کاتالیست را می‌پوشاند و مانع رسیدن هیدروکربن‌ها به سطح کاتالیست برای انجام واکنش‌های شکست می‌گردد، به همین دلیل کک فعالیت کاتالیست را کاهش می‌دهد.



شکل ۸- نمودار تغییرات غلظت با زمان در کاتالیست ثابت و با غیرفعال سازی کاتالیست

همچنین شکل (۹) زمانی که کاتالیست در طی فرآیند در چاه نفت خام مشبک شده فعال است را نشان می‌دهد. در طی شکستن هیدروکربن‌های سنگین، کاتالیست در ابتدای فرایند به خوبی عمل کرده و در زمان کمتری فرایند شکست انجام می‌شود ولی با گذشت زمان روند فعالیت کاتالیست کندتر می‌شود که موجب رسوب کک می‌گردد [۲۴].



شکل ۹- نحوه فعالیت کاتالیست در فرایند کاهش وزن مولکولی هیدروکربن‌های سنگین نفت خام

۴- نتیجه گیری

این پژوهش با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی تأثیر کاتالیست‌ها را بر فرآیند شکست هیدروکربن‌های سنگین در بخش مشبک چاه نفت بررسی کرده و نتایج قابل توجهی ارائه داده است. استفاده از کاتالیست، شکست هیدروکربن‌های سنگین را تسریع کرده و با افزایش دما، نرخ تبدیل از ۷ درصد به ۴۵ درصد افزایش می‌یابد که بیانگر این است درصد تبدیل بیش از ۶ برابر مقدار اولیه گردیده است. در میان انواع کاتالیست‌های مورد بررسی، آلومینا-سیلیکا به دلیل انرژی فعال‌سازی پایین، بیشترین راندمان را نشان داد. همچنین، حضور بخار آب به عنوان عاملی مؤثر در افزایش نرخ تبدیل بررسی شد و مشخص گردید که نسبت‌های بالاتر بخار به نفت 1 ml.ml^{-1} ، ۰/۱ و ۰/۰۵ و ۰/۰۲ موجب افزایش ۶ درصدی در میزان تبدیل می‌شود. افزایش قطر پرفوریشن‌ها نشان داد شاخص بهره‌وری چاه تا ۱۰ برابر افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر طراحی مهندسی بر عملکرد چاه‌های نفتی است. علاوه بر این، در قسمت مشبک چاه نفت درصد ترکیبات سیال مورد بررسی قرار گرفت که مشخص شد بیشترین درصد مربوط به گاز هیدروژن است که منجر به تشکیل گاز سنتز در فرآیند گردید. یکی از چالش‌های مهم در این فرآیند، تشکیل رسوب کربن بر سطح کاتالیست بود که با گذشت زمان باعث کاهش فعالیت آن گردید. در مراحل اولیه، کاتالیست با بیشترین بازدهی عمل می‌کند، اما به مرور زمان با افزایش رسوب کک، از عملکرد آن کاسته می‌شود. بنابراین، استراتژی‌هایی مانند احیای دوره‌ای کاتالیست می‌تواند برای حفظ کارایی در بلندمدت ضروری باشد. در نهایت، مقایسه داده‌های مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که تطابق قابل توجهی بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد. به طور کلی، بررسی اثرات دما، نوع کاتالیست، وجود بخار آب و تنظیم مناسب پارمترهای طراحی نشان داده که این عوامل تأثیر قابل توجهی بر میزان کاهش وزن مولکولی هیدروکربن‌های سنگین دارند و می‌تواند به بهینه‌سازی فرآیندهای پالایشی نفت کمک کند و منجر به بهبود بهره‌وری چاه‌های نفتی و کاهش چالش‌های مربوط به هیدروکربن‌های سنگین گردد. این یافته‌ها همچنین مبنای اهمیت استفاده از مدل‌سازی CFD به عنوان ابزاری کارآمد برای طراحی و بهینه‌سازی فرآیندهای استخراج نفت و افزایش عملکرد سیستم‌های پالایشی است. در نتیجه، پژوهش‌های آینده می‌توانند به مطالعه جزئیات بیشتر در مورد رفتار کاتالیست‌ها، به‌ویژه در شرایط عملیاتی متغیر و همچنین بررسی روش‌های نوین برای کاهش رسوب کربن و حفظ کارایی کاتالیست‌ها متمرکز شوند.

Analysis and Simulation of the Molecular Weight Reduction Process of Heavy Hydrocarbons Under Different Operating Conditions of a Perforated Oil Well

ABSTRACT

In this study, the effect of catalysts on the heavy hydrocarbon cracking process in the perforated section of an oil well was investigated using computational fluid dynamics. The vertical oil well geometry with perforated sections at the bottom was meshed and modeled in three dimensions. In this simulation, the fluid was assumed to be Newtonian, incompressible, and in a laminar flow regime, with physical properties set to a density of 980 kg/m³ and a dynamic viscosity of 0.49 Pa·s. The governing equations of fluid flow, mass transfer, and chemical reactions were solved using the finite element method and then effect of parameters such as catalyst type, temperature variations, conversion rate, steam presence, carbon deposition, and well productivity index were analyzed. The results showed that increasing the temperature within the range of 350°C to 425°C and applying a catalyst layer on the perforated zones increased the conversion rate from 7% to 45%, representing more than a sixfold enhancement. The study of catalyst types revealed that alumina-silica, with a low activation energy of 22.3 kJ/mol and a high surface area of 240.53 m²/g, exhibited the highest conversion rate. Additionally, the effect of steam injection was analyzed for three steam-to-oil ratios of 0.02, 0.05, and 0.1 ml/ml, showing that increasing the steam-to-oil ratio improved the conversion rate by approximately 6%. Increasing the perforation diameter from 4.5 mm to 10.5 mm resulted in a tenfold increase in well productivity, significantly enhancing oil production rates. One of the primary challenges in this process was carbon deposition on the catalyst surface, leading to a gradual decline in catalytic activity. In the initial stages, the catalyst performed efficiently; however, over time, its activity decreased, and coke deposition rates increased. A comparison between the simulation results and experimental data within the temperature range of 350°C to 425°C and a pressure of 20 bar demonstrated good agreement.

Keywords: Molecular Weight, Cracking, Heavy Hydrocarbons, Catalyst, Crude Oil, Perforated Section, Computational Fluid Dynamics

فهرست نمادها و اختصارات

نماد	توضیح	نماد	توضیح
A	(m^2) مساحت	K_a	ثابت واکنش
Al_2O_3	اکسید آلومینیوم (کاتالیزور)	L	طول پرفوریشن (mm)
API	موسسه نفت آمریکا	N	تعداد پرفوریشن‌ها
a	فعالیت کاتالیست	N_A	جرمان مولی در انتقال جرم ($mol.m^{-2}.s^{-1}$)
C	غلظت (mol/m^3)	PI	شاخص بهره‌وری
C_7H_{14}	فرمول شیمیایی هپتان	Q	دبی جریان (m^3/s)
$C_{12}H_{28}$	فرمول شیمیایی دودکان	R_A	نرخ واکنش ($mol/m^3.s$)
C_{Ag}	غلظت اولیه (mol/m^3)	R_g	ثابت جهانی گازها ($J/mol.K$)
C_{AS}	غلظت میانی (mol/m^3)	r	شعاع چاه (mm)
CAPRI	فرآیند ارتقای کاتالیزوری در محل	s	تنش سطحی (N/m)
C_c	غلظت رسوب کک (mol/m^3)	SiO_2	سیلیسیوم دی اکسید (کاتالیزور)
$CHCH_2$	فرمول شیمیایی اتن	T	دما ($^{\circ}C$)
CFD	دینامیک سیالات محاسباتی	t	زمان (s)
D, d	قطر ستون چاه (mm)	τ	تنش برشی (Pa)
g	شتاب گرانش	ΔP	اختلاف فشار در طول چاه (Pa)
H	ارتفاع (m)	u	سرعت سیال (m/s)
H_2	گاز هیدروژن	ρ	چگالی سیال (kg/m^3)
K_m	ضریب انتقال جرم (m/s)	ZSM-5	زئولیت (کاتالیزور)

- [1] Gomaa S., Salem K.G., & Elhoshoudy A., (2024), Enhanced heavy and extra heavy oil recovery: Current status and new trends, *Petroleum*, vol. 10, no. 3, pp. 399-410., <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2023.10.001>.
 - [2] Yatimi Y., Mendil J., Marafi M., Alalou, A., & Al-Dahhan, M.H.,(2024), Advancement in heavy oil upgrading and sustainable exploration emerging technologies, *Arabian Journal of Chemistry*, p. 105610., <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105610>.
 - [3] Li Y., Wang Z., Hu Z., Xu B., Li Y., Pu W., & Zhao, J, (2021), A review of in situ upgrading technology for heavy crude oil, *Petroleum*, vol. 7, no. 2, pp. 117-122., <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2020.09.004>.
 - [4] Zhao F., Liu Y., Lu N., Xu T., Zhu G., & Wang K., (2021), A review on upgrading and viscosity reduction of heavy oil and bitumen by underground catalytic cracking," *Energy Reports*, vol. 7, pp.4249-4272., <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.094>.
 - [5] Wu Z., Chen H., Cai X., Gou Q., Jiang L., Chen K., Chen Z., & Jiang S., (2023), Current status and future trends of in situ catalytic upgrading of extra heavy oil, *Energies*, vol. 16, no. 12, p. 4610, <https://doi.org/10.3390/en16124610>.
 - [6] Li H., Gao H., Zhao X., Xia Z., Yu B., & Sun, D, (2022), Experimental study on viscosity reduction of heavy oil with water content by synergistic effect of microwave and nano-catalyst, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 208, p. 109271., <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109271>.
- [۷] نجف پور مسعود، فاتحی فر اسماعیل، خوشبوی رضا و طباطبائی نژاد علیرضا، (۱۳۹۷)، ارتقای کیفیت ترکیبات سنگین نفتی با استفاده از مایعات یونی اصلاح شده توسط نمک‌های Fe^{2+} و Al^{3+} ، پژوهش نفت، (۳۰)، ۴-۹۹، ۴۷-۵۵. <https://doi.org/10.22078/pr.2020.3691.2695>
- [۸] بوتالاری، هادی، هاشم آبادی، سیدحسن، و مرزپور، فروغ. (۱۳۸۹)، پیش بینی رفتار رئولوژیکی چند هیدروکربن خطی به کمک شبیه سازی دینامیک مولکولی. پژوهش نفت، ۲۰(۶۴)، ۱۱-۳.
- [9] Salim M.K., Sultan H.S., & AL Shara A.K., (2017), Effect of Shape and Parameters of Perforation in a Vertical Wellbore with Two Perforations (without Porous Media) on Pressure Drop, *Fluid Mechanics: Open Access*, vol. 04, 2017, <https://doi.org/10.4172/2476-2296.1000162>.
 - [10] Hua L., Yan L., Xiaodong P., Xindong L., & Laichao W. (2016), Pressure drop calculation models of wellbore fluid in perforated completion horizontal wells, *IJHT, International Journal of Heat and Technology*, vol. 34, no. 1, pp. 65-72., <https://doi.org/10.18280/ijht.340110>.
 - [11] Wei K., Ma B., Xu J., Liu Q., & Wang, C., (2024), Study of perforated well productivity by a multi-scale coupling flow model with Darcy-brinkman-Navier/Stokes, *Geoenergy Science and Engineering*, vol. 243, p. 213377, <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213377>.
 - [12] Locke, S., (1981), An advanced method for predicting the productivity ratio of a perforated well, *Journal of Petroleum Technology*, vol. 33, no. 12, pp. 2481-2488., <https://doi.org/10.2118/8804-PA>.
- [۱۳] حیاتی جعفریگی سعید، مشرف دهکردی مهدی و ضیائیراد مسعود، (۱۳۹۷)، تخمین میزان شاخص چاه برداشت نفت در مخازن هیدروکربنی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، مهندسی مکانیک مدرس، ۱۸، (۱)، ۱۷۷-۱۸۷.
- [14] Hart A., Wood J., & Greaves M., (2017), Laboratory investigation of CAPRI catalytic THAI-add-on process for heavy oil production and in situ upgrading, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 128, pp. 18-26., <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.11.004>.
 - [15] Pashikanti K., & Liu Y., (2011), Predictive modeling of large-scale integrated refinery reaction and fractionation systems from plant data. Part 2: Fluid catalytic cracking (FCC) process, *Energy & fuels*, vol. 25, no. 11, pp. 5298-5319., <https://doi.org/10.1021/ef200750x>.
 - [16] Ortiz-Moreno H., Ramírez J., Cuevas R., Marroquín G., & Ancheyta J., (2012), Heavy oil upgrading at moderate pressure using dispersed catalysts: Effects of temperature, pressure and catalytic precursor," *Fuel*, vol. 100, pp. 186-192., <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.08.005>.
 - [17] Arastoopour H., Gidaspow D., & Lyczkowski R.W.,(2022), *Transport phenomena in multiphase systems* . Springer,.

- [18] Wang x., Li j., (2020), Numerical simulation of mass transfer in porous Media for Heavy oil upgrading *Journal of Petroleum Science and Engineering*,.
- [19] Tharanivasan A.K., Yang C., & Gu, Y., (2006), Measurements of molecular diffusion coefficients of carbon dioxide, methane, and propane in heavy oil under reservoir conditions, *Energy & fuels*, vol. 20, no. 6, pp. 2509-2517,. <https://doi.org/10.1021/ef060080d>.
- [20] Corma A., Mengual J., & Miguel P.J., (2012), Steam catalytic cracking of naphtha over ZSM-5 zeolite for production of propene and ethene: Micro and macroscopic implications of the presence of steam, *Applied Catalysis A: General*, vol. 417, pp. 220-235,. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2011.12.044>.
- [21] Dehkordi J.A., Jafari A., Sabet S.A., & Karami F., (2018), Kinetic studies on extra heavy crude oil upgrading using nanocatalysts by applying CFD techniques, *Chinese journal of chemical engineering*, vol. 26, no. 2, pp. 343-355,. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.07.001>.
- [22] Konno H., Ohnaka R., Nishimura J.I., Tago T., Nakasaka Y., & Masuda T., (2014), Kinetics of the catalytic cracking of naphtha over ZSM-5 zeolite: effect of reduced crystal size on the reaction of naphthenes, *Catalysis science & technology*, vol. 4, no. 12, pp. 4265-4273,.
- [23] Rochmadi S., Mulyono P., Aziz M., & Budiman A., (2018), Kinetic study of catalytic cracking of bio-oil over silica-alumina catalyst,. <https://doi.org/10.15376/biores.13.1.1917-1929>.
- [24] Zavarukhin S.G., & Kuvshinov G.G.,(2004), The kinetic model of formation of nanofibrous carbon from CH₄-H₂ mixture over a high-loaded nickel catalyst with consideration for the catalyst deactivation," *Applied Catalysis A: General*, vol. 272, no. 1-2, pp. 219-227,. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2004.05.044>.
- [25] Mohammed H.S., Abdullah Khazal E., & Sultan H.S., (2020), Studying the effect of perforation parameters on vertical well performance, *Basrah Journal for Engineering Sciences*, vol. 20, no. 2, pp. 48-59,.
- [26] H. S. Mohammed, H. S. Sultan, and E. A. Khazal, Simulation of a perforated vertical wellbore with near wall porous media effect, *Journal of Petroleum Research and Studies*, vol. 12, no. 1, pp. 85-104, 2022. <http://doi.org/10.52716/jprs.v12i1.592>.
- [27] Alhumaidan F., Lababidi H.M.S., & Al-Rabiah, H., (2013), Thermal cracking kinetics of Kuwaiti vacuum residues in Eureka process, *Fuel*, vol. 103, pp. 923-931, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.08.005>.
- [28] Marchetti J.,(2021), *Reaction engineering, catalyst preparation, and kinetics*. CRC Press,. <https://doi.org/10.1201/9780429466847>.
- [29] Abarasi H., Gary L., Malcolm G., & Joseph W., (2014), Downhole heavy crude oil upgrading using CAPRI: Effect of steam upon upgrading and coke formation, *Energy & fuels*, vol. 28, no. 3, pp. 1811-1819,. <https://doi.org/10.1021/ef402300k>.
- [30] Padasa E., & Saenz G., (2019), Syngas Production, Properties, and Its Importance, *Sustainable Alternative Syngas Fuel*, vol. i, p. 9, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.89379>.
- [31] Nwonodi R.I., (2024), A novel model for predicting the productivity index of horizontal/vertical wells based on Darcy's law, drainage radius, and flow convergence, *Heliyon*, vol. 10, no. 3,. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25073>.