



Research Article



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2058245.1996



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

Experimental Evaluation and Simulation of Potency for Precipitation of Sulfate Particles

Zahra Zare¹, Leila Mahmoodi¹, M. Reza Malayeri^{1*}

¹ Department of Chemical Engineering, School of Chemical and Petroleum Engineering, Shiraz University, Iran

Received: 17 Feb 2025 Accepted: 10 May 2025

Abstract

Water injection into oil reservoirs is mainly used to maintain pressure and increase oil recovery. However, mixing seawater and formation water can lead to mineral precipitation including sulfated particles which can lead to reduced permeability, and blockage of production wells and operating equipment. Therefore, it would decrease the production rate in addition to the cost of dealing with scale formation. In this study, calcium, barium, and strontium sulfate precipitation have been experimentally investigated under static conditions of 90 °C and atmospheric pressure. Additionally, for a detailed analysis of the structure and elemental composition of the precipitated particles, scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectrometry were also used. Simulation software of Aspen Plus and PHREEQC were employed to confirm the accuracy and precision of the experimental data via a reasonable agreement which showed that the precipitation potential was from higher to lower for calcium sulfate, strontium sulfate, and barium sulfate.

Keyword: Aspen Plus, PHREEQC, High-Temperature Static Test, Precipitation, Sulfated Scales.

* malayeri@shirazu.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Zare, Z., Mahmoodi, L., Malayeri, M.R., "Experimental Evaluation and Simulation of Potency for Precipitation of Sulfate Particles", Journal of Farayandno – Vol. 20 – No. 89, pp. 39-56, In Persian, (2025).



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2058245.1996



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

ارزیابی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی پتانسیل ترسیب ذرات سولفات

زهرا زارع¹، لیلا محمودی²، محمدرضا ملایری^{3*}

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی و نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز

² محقق پسادکتری، دانشکده مهندسی شیمی و نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز

³ استاد تمام، دانشکده مهندسی شیمی و نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز

دریافت: 1403/11/29 پذیرش: 1404/02/20

چکیده

تزریق آب به مخازن نفتی به منظور حفظ فشار، یکی از روش‌های متداول در صنعت نفت است. با این حال، اختلاط آب دریا با آب‌های سازندی می‌تواند منجر به ترسیب رسوبات معدنی شود که این پدیده باعث کاهش تراوایی مخزن، انسداد چاه و آسیب به تجهیزات شده و هزینه‌های عملیاتی را افزایش دهد. در این پژوهش، فرآیند ترسیب رسوبات کلسیم، باریم و استرانسیوم سولفات در دمای 90 درجه سانتی‌گراد و فشار محیط توسط تست‌های استاندارد استاتیک در 7 روز، مورد بررسی قرار گرفت و به منظور تحلیل ساختارشناسی و تعیین ترکیب عنصری ذرات ترسیب‌یافته، از میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌سنج پراش انرژی پرتو ایکس استفاده شد. همچنین، ارزیابی صحت داده‌های تجربی توسط شبیه‌سازی‌های اسپن‌پلاس و فری‌کیوسی انجام گردید که نتایج حاصله، تطابق مناسبی با یافته‌های آزمایشگاهی نشان داد به طوری که در شرایط مشابه، پتانسیل رسوب‌گذاری به ترتیب از بیشترین به کمترین برای کلسیم‌سولفات، استرانسیوم‌سولفات و باریم‌سولفات است.

کلمات کلیدی: آزمایش استاتیک دما بالا، اسپن‌پلاس، ترسیب، رسوبات سولفات، فری‌کیوسی.

* malayeri@shirazu.ac.ir

1- مقدمه

تشکیل رسوبات معدنی در طول فرآیند استخراج، می‌توانند منجر به مشکلات عملیاتی عمده‌ای شوند [1, 2]. این مشکلات شامل آسیب به مخازن، انسداد در منافذ یا لایه‌های سازند، محدودیت در عبور سیال و انسداد کامل در خطوط جریان، خرابی شیرهای ایمنی و چوک، سایش پمپ‌ها و همچنین خوردگی می‌باشند [3, 4]. یکی از عوامل رایج در ترسیب ذرات و تشکیل رسوبات معدنی، ناسازگاری شیمیایی آب‌های سازندی و آب‌های تزریقی، که به منظور حفظ فشار مخزن و افزایش نرخ تولید به کار می‌روند، است که در فرآیند تولید و بهره‌برداری دیده می‌شود [5]. رایج‌ترین انواع این رسوب‌ها، کربناته و سولفات هستند [6]. رسوب‌های کربناته عمدتاً از کلسیم کربنات تشکیل می‌شوند در حالی که رسوب‌های سولفات شامل کلسیم سولفات، باریت سولفات و استرانسیوم سولفات می‌باشند [7].

رسوب‌های سولفات به‌عنوان یکی از سخت‌ترین انواع رسوب شناخته می‌شوند. از آن‌جا که این نوع رسوبات به pH و فشار وابسته نیستند، انحلال آن‌ها در اسید بسیار اندک است [8, 9]. این ویژگی، حذف آن‌ها را به یک چالش جدی تبدیل کرده که نیازمند کنترل مؤثر و دقیق در فرآیندهای تولید صنایع نفتی است [10]. عواملی مانند غلظت یون‌ها و دما بر حلالیت و ترسیب ذرات سولفات تأثیر دارند [11, 12]. با افزایش غلظت یون‌های ناسازگار تا فراتر از حد اشباع (حالت فوق‌اشباع)، ترسیب که به معنای خروج فاز سنگین‌تر (مانند نمک‌های سولفات) از فاز سبک‌تر (محلول آبی) است، آغاز می‌شود [13]. همچنین تغییرات دما می‌تواند پایداری این یون‌ها و میزان ترسیب را تحت تأثیر قرار دهد [14, 15]. بنابراین، پیش‌بینی نوع و مقدار ترسیب برای مدیریت و جلوگیری از پدیده‌های بعدی مانند ته‌نشست، و همچنین انتخاب بازدارنده رسوب مناسب ضروری است [16, 17].

پژوهش‌های اخیر در رابطه با ترسیب رسوبات سولفات شامل رویکردهای تجربی و مدل‌سازی ترمودینامیکی در میدان‌های نفتی نشان می‌دهند که این پدیده تحت تأثیر عوامل محیطی و شیمیایی متعددی قرار دارد که در صورت عدم کنترل، می‌تواند مشکلات زیادی در فرآیندهای استخراج نفت ایجاد کند. الملحم و همکاران در پژوهش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های خود، حداقل غلظت سولفات لازم برای تشکیل رسوب را تعیین کردند. نتایج نشان داد که در غلظت‌های بالاتر از 300 میلی‌گرم در لیتر سولفات، ترسیب کلسیم سولفات و استرانسیوم سولفات شروع می‌شود و با افزایش غلظت، شدت ترسیب نیز افزایش می‌یابد [18]. گروسکا و همکاران با انجام آزمایش‌های میدانی نشان دادند که ترسیب باریت سولفات به شدت وابسته به ترکیب شیمیایی آب و دمای محیط است. این آزمایش‌ها همچنین تأیید کردند که اختلاط آب‌های ناسازگار، به‌ویژه آب‌های سازندی غنی از باریت با آب دریا حاوی غلظت بالای سولفات، از مهم‌ترین عوامل ترسیب باریت سولفات در فرآیندهای تزریق آب است [19]. حال طی یک مطالعه آزمایشگاهی تأثیر دما بر ترسیب باریت سولفات را بررسی کرد و دریافت که افزایش دما، میزان ترسیب را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. این موضوع می‌تواند باعث انسداد منافذ و کاهش نفوذپذیری سنگ مخزن شود که در نهایت به کاهش تولید نفت منجر می‌شود [20]. پورقاسمی و همکاران با انجام آزمایش‌های استاتیک و دینامیک در شرایط دما و فشاری متفاوت، نشان دادند که افزایش دما و نسبت بالای آب سازند به تزریق، به‌طور قابل توجهی سرعت ترسیب باریت سولفات را افزایش می‌دهد. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که کاهش نرخ تزریق موجب تسریع تشکیل مقادیر قابل توجه ته‌نشست می‌گردد [14]. پژوهش محمد و همکاران با تمرکز بر رسوب کلسیم سولفات، که شامل مکانیسم‌ها، فازهای تشکیل‌شده (ژئوپس/انیدریت) است، نشان داد که نوع فاز رسوب به دما و سطح اشباع وابسته است

[21]. همچنین ولدبیگیان و همکاران با استفاده از آزمایش‌های استاتیک و دینامیک با تمرکز بر یافتن درصد اختلاط بحرانی، گزارش کردند بیشترین مقدار رسوب باریم‌سولفات در نسبت اختلاط 90 درصدی آب سازند مشاهده شده و رقیق‌سازی آب تزریق تا 5 برابر نیز رسوب را 44 درصد کاهش می‌دهد [22]. خرمعلی و همکاران در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی، فرآیند ترسیب هم‌زمان کلسیم‌سولفات و استرانسیم‌سولفات را در دماهای مختلف بررسی کردند. محلول‌های اولیه شامل یون‌های کلسیم، استرانسیوم و سولفات بودند و در شرایط کنترل‌شده، رفتار ترسیب مورد پایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش دما، رسوب‌گذاری استرانسیم‌سولفات نسبت به کلسیم‌سولفات زودتر آغاز می‌شود و دوره القای رسوب کاهش می‌یابد که این رفتار بیانگر حساسیت بالای استرانسیم‌سولفات به تغییرات دمایی در مقایسه با کلسیم‌سولفات است [23]. در یک پژوهش میدانی، کیریوا و همکاران غلظت استرانسیوم در آب‌های سازندی و نقش آن در ترسیب استرانسیم‌سولفات را بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که افزایش غلظت استرانسیوم به‌طور چشمگیری احتمال ترسیب استرانسیم‌سولفات را افزایش می‌دهد که این امر می‌تواند نفوذپذیری مخزن را کاهش دهد و مانعی برای استخراج بهینه نفت ایجاد کند [24]. در یک مطالعه شبیه‌سازی، غالبی و همکاران با نرم‌افزار فری‌کیوسی به بررسی نسبت‌های مختلف اختلاط آب‌های ناسازگار پرداختند و دریافتند که بهترین نسبت اختلاط برای جلوگیری از ترسیب رسوبات سولفاته، 90:10 به ترتیب میان آب تزریقی و آب سازند است [25]. فو و همکاران با استفاده از نرم‌افزار فری‌کیوسی تأثیر آب‌های ناسازگار بر سنگ مخزن در میدان نفتی میلر را شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ترکیب آب‌ها منجر به تولید و انحلال گونه‌های معدنی متفاوتی می‌شود که به زمان تماس سیالات وابسته است و بر استحکام و پایداری سنگ مخزن اثر می‌گذارد [26].

با توجه به نتایج تحقیقات اخیر و پیچیدگی پدیده ترسیب ذرات سولفاته در شرایط مختلف عملیاتی، نیاز به مطالعات گسترده‌تر برای درک دقیق‌تر این پدیده و تاثیر عوامل متفاوت بر آن، برداشت می‌شود. بدین ترتیب که این دسته پژوهش‌ها بتوانند به بررسی دقیق‌تر پارامترهای مؤثر بر ترسیب پرداخته و به ارائه راهکارهای عملی و بهینه برای کنترل و کاهش آن گردد. لذا هدف از مطالعه حاضر، بررسی آزمایشگاهی پدیده ترسیب رسوب‌های سولفاته شامل کلسیم‌سولفات، باریم‌سولفات و استرانسیم‌سولفات با بهره‌گیری از آزمایش‌های استاتیک دما بالا (دمای 90 درجه سانتی‌گراد و فشار اتمسفریک) و رویکرد نوآورانه شبیه‌سازی شامل به‌کارگیری نرم‌افزار اسپن پلاس¹ در کنار نرم‌افزار فری‌کیوسی² است. همچنین، مورفولوژی و آنالیز عنصری ذرات ترسیب یافته حاصل از مطالعه آزمایشگاهی، به ترتیب با استفاده از آنالیزهای دستگاهی نظیر میکروسکوپ الکترونی روبشی³ و طیف‌سنج پراش انرژی پرتو ایکس⁴ بررسی شده است. به‌علاوه، تأثیر دما در نسبت‌های بحرانی اختلاط متفاوت، به منظور شبیه‌سازی رفتار آب‌های ناسازگار در صنعت نفت و اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی، مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در ادامه به تفصیل ارائه می‌شود.

¹Aspen Plus

²PHREEQC

³Scanning Electron Microscopy (SEM)

⁴Energy-Dispersive X-Ray (EDX)

2- مطالعه آزمایشگاهی

2-1- مواد

برای ساخت محلول‌های کاتیونی و آنیونی مورد مطالعه در این پژوهش که به ترتیب غنی از کاتیون مد نظر (کلسیم/باریم/استرانسیوم) و آنیون (سولفات) هستند، نمک‌های مورد استفاده با درجه خلوص آزمایشگاهی تهیه شده‌اند. غلظت یونی محلول‌های مورد بررسی به همراه جرم نمک‌های مورد نیاز برای سنتز این محلول‌ها در جدول 1 آمده است. لازم به ذکر است که مقادیر غلظت یونی برای محلول‌های کاتیونی و آنیونی مورد بررسی در این مطالعه بر اساس آب‌های ناسازگار دریای شمال در مطالعه‌ای مشابه، در نظر گرفته شده است [27].

جدول 1- مشخصات محلول‌های مورد بررسی و نمک‌های مورد استفاده

جرم نمک (گرم در لیتر)	نمک مورد استفاده	غلظت یون (میلی‌گرم در لیتر)	یون	نوع محلول
7/723	کلسیم کلراید دوآبه	2000	کلسیم	کاتیونی
0/504	باریم کلراید دوآبه	296	باریم	
1/468	استرانسیوم کلراید	771	استرانسیوم	
4/376	سدیم سولفات	2960	سولفات	آنیونی

2-2- روش انجام آزمایش

به منظور ارزیابی و تحلیل پدیده ترسیب ذرات سولفات‌ها تحت شرایط دمایی بالا در این جا، آزمایش‌های استاتیک برای بررسی سازگاری محلول‌های کاتیونی و آنیونی انجام شده‌اند [28, 29]. ابتدا محلول‌های آبی با استفاده از نمک مد نظر برای سنتز آب‌های ناسازگار با غلظت مشخص تهیه شدند. سپس، نمک‌های مورد نظر به‌طور جداگانه در آب دوبار تقطیر حل شدند تا محلول‌های کاتیونی و آنیونی با غلظت‌های معین به دست آیند. به این ترتیب، هر محلول به‌طور مستقل شامل یک نوع کاتیون (یون کلسیم، باریم و یا استرانسیوم) و محلول دیگر شامل یک نوع آنیون (یون سولفات) بوده است چنان چه که پیش‌تر در جدول 1 ارائه شد.

در ادامه، محلول آنیونی و کاتیونی مورد بررسی در یک بطری شیشه‌ای ریخته شده تا اختلاط صورت گیرد. از آنجایی که این آزمایش‌ها به‌منظور بررسی سازگاری آب‌های ناسازگار انجام می‌شوند، اختلاط آن‌ها در نسبت‌های معین، باید در بطری‌های درب‌دار (به‌منظور جلوگیری از تبخیر آب) انجام گیرد. پس از اطمینان از اختلاط کامل، درب بطری‌ها به‌طور محکم بسته شده و نمونه‌ها به گرمکن⁵ در فشار اتمسفریک و دمای 90 درجه سانتی‌گراد منتقل شدند.

از آنجا که فرآیند هسته‌زایی و ترسیب زمان‌بر است، برای حصول اطمینان از شرایط تعادلی و دریافت حداکثر پتانسیل ترسیب ذرات، می‌بایست به محلول اختلاط یافته به‌اندازه کافی زمان داده شود تا فرآیند ترسیب رخ دهد. لذا نمونه‌ها به مدت 7 روز در گرمکن قرار گرفتند [30, 31]. جزئیات نسبت‌های اختلاط و شرایط آزمایشگاهی در جدول 2 ارائه شده است.

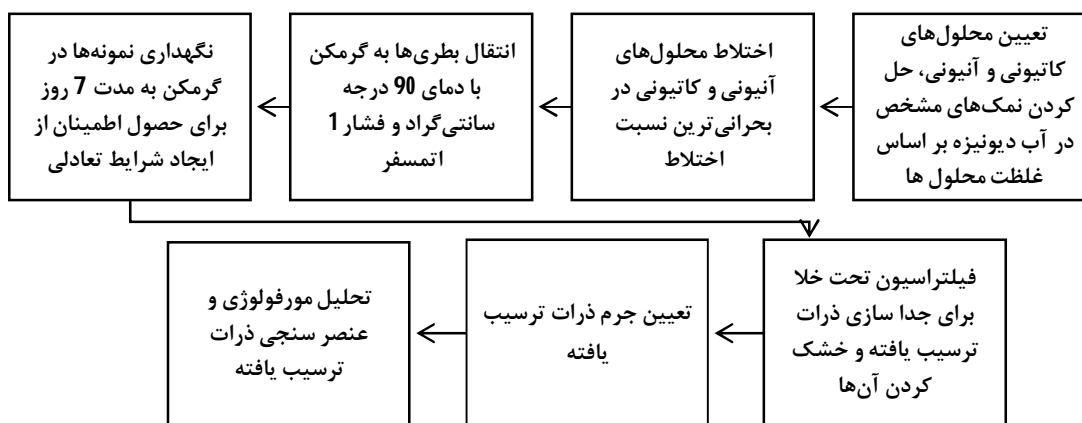
⁵Oven

لازم به ذکر است که چنانچه در مطالعات پیشین نیز اشاره شده، برخلاف رسوبات کربناته که به شدت به فشار و pH وابسته‌اند [9, 32]، رسوبات سولفاته مانند کلسیم، باریم و استرانسیم سولفات دارای انحلال پذیری بسیار کم بوده و وابستگی قابل توجهی به فشار ندارند و رفتار آن‌ها عمدتاً تابع غلظت یون‌ها، دما و نسبت فوق اشباع محلول است [33]. بنابراین تست‌های استاندارد استاتیک در این مطالعه مد نظر قرار گرفته شد.

جدول 2- شرایط آزمایشگاهی بررسی پدیده ترسیب کلسیم، باریم و استرانسیم سولفات

شرایط	دما (درجه سانتی‌گراد)	فشار (اتمسفر)	حجم نهایی (لیتر)	نسبت اختلاط محلول آنیونی: کاتیونی (درصد)	زمان حرارت‌دهی (روز)
کلسیم سولفات	90	1	0/2	40:60	7
باریم سولفات	90	1	0/2	90:10	7
استرانسیم سولفات	90	1	0/2	70:30	7

پس از گذشت مدت زمان معین، نمونه‌های مورد بررسی از گرمکن خارج شده و بلافاصله فیلتراسیون تحت خلأ انجام پذیرفت به نحوی که نمونه از فیلتر سلولز نیترات با قطر منافذ 0/2 میکرومتر عبور داده شده و ذرات ترسیب یافته بر روی فیلتر جمع‌آوری و سپس خشک شدند. برای تعیین دقیق جرم ذرات، فیلترها قبل و بعد از فیلتراسیون با ترازوی دقیق وزن کشی شده و سپس جرم رسوب‌های تشکیل شده به عنوان تفاوت وزن فیلتر در حالت قبل و بعد از فیلتراسیون ثبت گردید. در آخر، به منظور بررسی مورفولوژی و آگاهی از ترکیب عنصری ذرات ترسیب یافته، به ترتیب از آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌سنج پراش انرژی پرتو ایکس بهره برده شد که نتایج آن در بخش 4-1-1 ارائه شده است. برای درک بهتر روند آزمایش، نمودار گرافیکی مراحل آزمایش در شکل 1 نمایش داده شده است.



شکل 1- روند نمای مراحل انجام آزمایش در بررسی ترسیب رسوب‌های سولفاته

لازم به ذکر است که جهت پیش‌بینی حداکثر میزان ترسیب قابل انتظار از اختلاط آب‌های موردنظر و تعیین نسبت اختلاط بحرانی مذکور، از نرم‌افزار فری کیوسی که یکی از نرم‌افزارهای رایج شبیه‌سازی تشکیل رسوب در شرایط استاتیک می‌باشد، استفاده شده است [29, 31]. برای هر نوع ترسیب مورد بررسی در این پژوهش، نسبت اختلاط

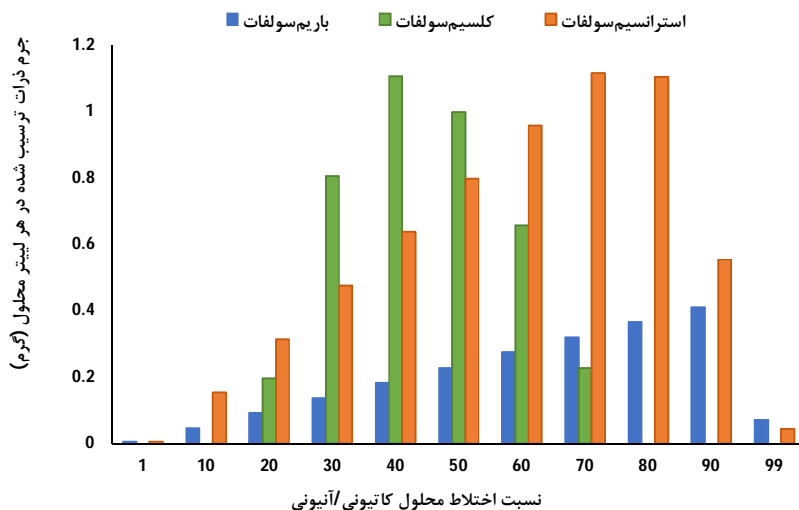
بحرانی محلول‌ها با استفاده از این شبیه‌ساز در دمای 90 درجه سانتی‌گراد تعیین گردید که در بخش 3-1 به تفصیل توضیح داده شده است.

3- مطالعه شبیه‌سازی

3-1- شبیه‌ساز فری کیوسی

نرم‌افزار فری کیوسی به‌عنوان یک ابزار شبیه‌ساز ژئوشیمیایی در بررسی‌های تعادلات شیمیایی محلول‌های آبی و پتانسیل ترسیب و نیز ته‌نشست ذرات معدنی شناخته شده است [31, 34]. شبیه‌ساز مذکور با استفاده از داده‌های ترمودینامیکی، امکان پیش‌بینی نوع و مقدار ترسیب ذرات معدنی متنوع را بر حسب پارامترهای مورد بررسی مانند دما فراهم می‌کند [30, 31]. بدین ترتیب، در این پژوهش، شبیه‌سازی‌های فری کیوسی تحت شرایط مشابه با مطالعه آزمایشگاهی و در شرایط محیطی مشابه با شبیه‌سازی اسپن پلاس و بر حسب بحرانی‌ترین نسبت اختلاط، انجام شد تا رفتار سیستم آب‌های ناسازگار بررسی و صحت‌سنجی شود.

شایان ذکر است که نسبت‌های اختلاط بحرانی در این پژوهش، مستقیماً از نتایج شبیه‌سازی‌های اولیه با شبیه‌ساز فری کیوسی به دست آمده (شکل 2) و در نظر گرفته شده است. با توجه به بیش‌ترین میزان ترسیب پیش‌بینی شده در نسبت اختلاط مشخص از دو محلول مشخص کاتیونی شامل کاتیون کلسیم، باریوم و استرانسیم؛ و آنیونی شامل غلظت مشخص از آنیون سولفات، و در نظر گرفتن آن به عنوان نسبت بحرانی، شکل 2 نشان می‌دهد که در مطالعه ترسیب ذرات کلسیم سولفات، باریوم سولفات و استرانسیم سولفات، نسبت‌های اختلاط بحرانی به ترتیب برابر با 40 به 60، 90 به 10، و 70 به 30 از محلول کاتیونی به آنیونی است.



شکل 2- جرم ترسیب ذرات مورد مطالعه در شبیه‌ساز فری کیوسی بر حسب درصد اختلاط محلول کاتیونی به آنیونی

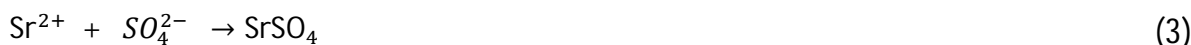
پارامترهای این شبیه‌سازی‌ها در جدول 3 قابل مشاهده است. همچنین برای بررسی تأثیر دما بر فرآیند ترسیب و امکان مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌ساز اسپن‌پلاس، شبیه‌سازی‌ها در چندین بازه دمایی مختلف انجام شد و نتایج حاصل از این تحلیل‌ها در بخش 4-2-2 به تفصیل ارائه گردیده است.

جدول 3- شرایط شبیه‌سازی برای ترسیب ذرات سولفات‌ها در شبیه‌ساز فری‌کیوسی

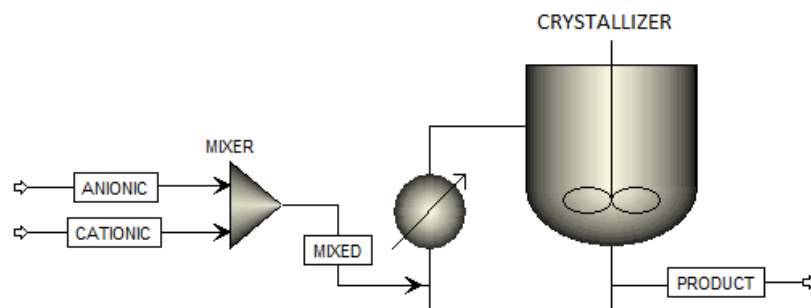
ترسیب مورد بررسی	نوع محلول	نسبت اختلاط (درصد)	فشار (اتمسفر)	دما (درجه سانتی‌گراد)
کلسیم سولفات	کاتیونی	40	1	90
	آنیونی	60		
باریم سولفات	کاتیونی	90	1	90
	آنیونی	10		
استرانسیم سولفات	کاتیونی	70	1	90
	آنیونی	30		

3-2- شبیه‌ساز اسپن‌پلاس

شبیه‌سازی فرآیند ترسیب با استفاده از نرم‌افزار اسپن‌پلاس، بر اساس اختلاط محلول کاتیونی شامل یون‌های کلسیم/باریم/استرانسیم و کلرید؛ و محلول آنیونی شامل یون‌های سدیم و سولفات، بر اساس نمک‌های مورد استفاده در مطالعه آزمایشگاهی مطابق جدول 2، در دما و فشار معین و تعریف واکنش‌های مد نظر در شرایط یونی محلول‌ها و تشکیل ذرات جامد مشخص، انجام گردید. با ایجاد فرض ساده شونده در این شبیه‌ساز بر اساس تعریف واکنش‌ها بر پایه استکیومتری (معادلات 1 تا 4)، امکان پیش‌بینی مقدار ذرات ترسیب شده فراهم شد.



شکل 3 نمایی از نمودار جریان فرآیند شبیه‌سازی شده در اسپن‌پلاس را نشان می‌دهد که در آن محلول‌های کاتیونی و آنیونی در حجم‌های معین به عنوان خوراک به مخلوط‌کن بدون افت فشار، وارد شده و سپس جریان خروجی از آن وارد کریستالایزر شده است. واکنش‌های ترسیب در دمای 90 درجه سانتی‌گراد و فشار 1 اتمسفر، در کریستالایزر صورت پذیرفته و جریان خروجی مقدار ترسیب حاصل را بیان کرده است. لازم به ذکر است که با علم به این موضوع که نرم‌افزار اسپن‌پلاس حالت دینامیک برای کریستالایزر دارد و جریان‌ها بر واحد زمان در نظر گرفته می‌شوند، داده‌های حاصل از شبیه‌سازی برای زمان 7 روز معادل مطالعه آزمایشگاهی نرمالایز شده است.



شکل 3- نمایی از نمودار جریان فرایند شبیه‌سازی شده

جزئیات شرایط و پارامترهای شبیه‌سازی برای انواع ترسیب ذرات کلسیم، باریم و استرانسیم سولفات در جدول 4 ارائه شده است. در انتها، برای بررسی اثر تغییر دمای کریستالایزر بر پدیده ترسیب، شبیه‌سازی در بازه دمایی مشخص از 25 تا 95 درجه سانتی‌گراد انجام شد که نتایج حاصل از آن در بخش 4-2-1 به تفصیل بیان شده است.

جدول 4- شرایط شبیه‌سازی برای ترسیب کلسیم، باریم و استرانسیم سولفات در شبیه‌ساز اسپن پلاس

پارامتر	جریان	نسبت اختلاط (درصد)	حجم نهایی (لیتر)	دمای مخلوط کن (درجه سانتی‌گراد)	فشار کریستالایزر (اتمسفر)	دمای کریستالایزر (درجه سانتی‌گراد)	نوع ترسیب
کلسیم سولفات	کاتیونی	40	0/2	25	1	90	
	آنیونی	60					
باریم سولفات	کاتیونی	90	0/2	25	1	90	
	آنیونی	10					
استرانسیم سولفات	کاتیونی	70	0/2	25	1	90	
	آنیونی	30					

4- بحث و تحلیل نتایج

4-1- پتانسیل رسوب‌گذاری: آزمایشگاهی

چنان‌چه پیش‌تر بیان شد، پتانسیل ترسیب ذرات سولفات‌ها در آزمایش‌های استاتیک دما بالا مورد بررسی قرار گرفت. جدول 5، بیانگر نتایج جرمی از میزان ذرات ترسیب شده ذرات سه‌گانه سولفات‌ها در دمای 90 درجه سانتی‌گراد است. بر اساس آن، میزان ترسیب ذرات کلسیم سولفات در یک لیتر محلول 15/84 گرم بوده است که بیشترین مقدار را در مقایسه با استرانسیوم سولفات (1/10 گرم) و باریم سولفات (0/45 گرم) نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که درصد اختلاط بحرانی در شرایط آزمایشگاهی همان درصد اختلاط‌های پیش‌بینی شده از شبیه‌ساز فری کیوسی (شکل 2 و جدول 3) است.

جدول 5- جرم ذرات ترسیب شده انواع رسوب‌های سولفات‌ها در دمای 90 درجه سانتی‌گراد و درصد اختلاط بحرانی تحت

شرایط آزمایشگاهی

نوع ترسیب	کلسیم سولفات	باریم سولفات	استرانسیم سولفات
-----------	--------------	--------------	------------------

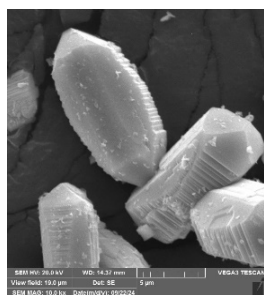
1/10	0/45	15/84	جرم ذرات ترسیب شده به ازای یک لیتر محلول نهایی اختلاط (گرم)
------	------	-------	--

داده‌های جدول 5 بر اهمیت تاثیر دما و غلظت کاتیون شرکت کننده در فرآیند ترسیب و نهایتاً رسوب گذاری، تأکید دارد. به عبارتی، با توجه به غلظت اولیه بیشتر یون کلسیم در محلول مورد بررسی نسبت به یون‌های استرانسیوم و باریم، این تفاوت در مقدار ترسیب ذرات متفاوت، قابل انتظار است. این موضوع نیز توسط رضوی راد و همکاران [35] تأیید شده است که نشان می‌دهد غلظت بالاتر کاتیون‌های اصلی سبب افزایش رسوب گذاری می‌شود.

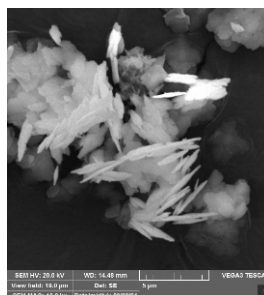
از طرف دیگر، چنانچه پیش‌بینی می‌شد، افزایش دما می‌تواند حلالیت یون کلسیم را کاهش داده و منجر به ترسیب بیشتر کلسیم سولفات شود. همین امر برای انحلال پذیری استرانسیوم سولفات نیز صادق است به طوری که مطالعات نشان داده‌اند که با افزایش دما، حلالیت استرانسیوم سولفات کاهش یافته و این امر منجر به تشدید فرآیند ترسیب می‌شود. هرچند که حلالیت باریم سولفات با افزایش دما بیشتر می‌شود، میزان ترسیب آن در دماهای بالا کاهش می‌یابد که این رفتار با تحلیل ترمودینامیکی نیز تأیید شده است [36]. در همین راستا، جمالی و همکاران [37] در مطالعه‌ای گزارش کردند که افزایش دما باعث افزایش حلالیت باریم سولفات شده و در نتیجه میزان ترسیب آن کاهش می‌یابد. به علاوه، در مطالعه مردها و همکاران [38] پیرو انجام تست‌های استاتیک در محدوده دمایی 40 تا 90 درجه سانتی‌گراد و استفاده از آب‌های شور با غلظت‌های مختلف یون سولفات، نشان داده شده است که افزایش دما موجب افزایش ترسیب کلسیم سولفات و استرانسیوم سولفات و کاهش ترسیب باریم سولفات شده است که ناشی از تغییر در حلالیت این ترکیبات می‌باشد.

4-1-1- مورفولوژی ذرات ترسیب یافته

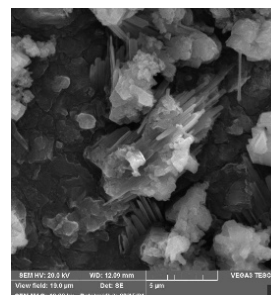
نتایج حاصل از آنالیز دستگاهی میکروسکوپ الکترونی روبشی به منظور صحت سنجی از ساختار کریستالی و مورفولوژی ذرات ترسیب یافته، در شکل 4 نمایش داده شده است. ساختار سوزنی کریستال‌های تشکیل شده در ذرات ترسیب یافته کلسیم سولفات (شکل 4-الف)، پولک‌های متراکم و منظم کریستال‌های باریم سولفات (شکل 4-ب) و مخروط‌های چندوجهی و تیز کریستال‌های استرانسیوم سولفات (شکل 4-پ)، صحه‌ای بر نتایج به دست آمده پیشین است، به طوری که غلظت نسبتاً زیاد یون کلسیم در بررسی‌های آزمایشگاهی، نقش کلیدی در افزایش نرخ ترسیب ایفا کرده و موجب تشکیل بلورهای بزرگ‌تر، پایدارتر و منظم‌تری از کلسیم سولفات شده است. لازم به ذکر است که این تصاویر حاکی از شرایط مطلوب برای ترسیب در دما و غلظت‌های مشخص در بحرانی‌ترین نسبت اختلاط هستند، به گونه‌ای که در این شرایط ترسیب به میزان قابل توجهی رخ داده است.



(پ)



(ب)



(الف)

شکل 4- مورفولوژی ذرات ترسیب یافت در دمای 90 درجه سانتی گراد حاصل از آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی:
الف) کلسیم سولفات (ب) باریم سولفات (پ) استرانسیم سولفات

بر اساس توضیحات پیشین، از آنالیز طیف سنج پراش انرژی پرتو ایکس نیز به عنوان یک روش مکمل برای شناسایی عنصری ترکیب ذرات ترسیب یافته در مقیاس میکروسکوپی استفاده شد که نتایج در جدول 6 ارائه شده است. بر اساس داده‌های این جدول، درصد وزنی عناصر کلسیم، باریم و استرانسیم با نتایج آزمایشگاهی و جرم ذرات ترسیب یافته جدول 5 همخوانی قابل قبولی دارد. بنابراین، مجدداً می‌توان نتیجه گرفت که ترتیب میزان حضور عناصر در ذرات ترسیب یافته مورد بررسی به ترتیب برای کلسیم بیشتر از استرانسیم و استرانسیم بیشتر از باریم است. لازم به ذکر است که میزان ناچیزی از عناصر سدیم و کلر شناسایی شده دال بر آن است که مقداری سدیم کلرید حاصل از واکنش‌ها (معادلات 1 تا 4) نیز ما بین کریستال‌ها ترسیب و جا مانده است.

جدول 6- آنالیز طیف سنج پراش انرژی پرتو ایکس از ذرات ترسیب یافته

درصد وزنی							نوع ترسیب
سولفور	کلر	سدیم	اکسیژن	استرانسیم	باریم	کلسیم	
8/5	0/9	2/9	67/5	-	-	20/2	کلسیم سولفات
1/6	0/45	0/5	6	-	91/45	-	باریم سولفات
13/5	0/7	1/3	41/5	43	-	-	استرانسیم سولفات

4-2- پتانسیل رسوب گذاری: شبیه سازی

4-2-1- شبیه ساز اسپن پلاس

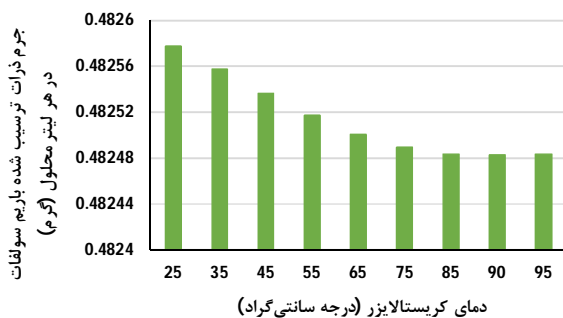
بر اساس روند شبیه سازی سیستم مورد مطالعه، جدول 7 نشان دهنده جرم ذرات ترسیب یافته در دمای 90 درجه سانتی گراد به ازای هر لیتر محلول حاصل در شبیه ساز اسپن است. نتایج بیانگر افزایش قابل توجه میزان ترسیب کلسیم سولفات در مقایسه با باریم و استرانسیم سولفات است که روند حاصله مجدداً با داده‌های آزمایشگاهی (جدول 5) همخوانی دارد. لازم به ذکر است که مقادیر جرم حاصل از مطالعه آزمایشگاهی و شبیه سازی متفاوت است که طبعاً می‌تواند ناشی از فرضیات ساده شونده در مطالعه شبیه سازی نیز باشد.

جدول 7- جرم ذرات ترسیب شده انواع رسوب‌های سولفات در دمای 90 درجه سانتی گراد حاصل از شبیه ساز اسپن پلاس

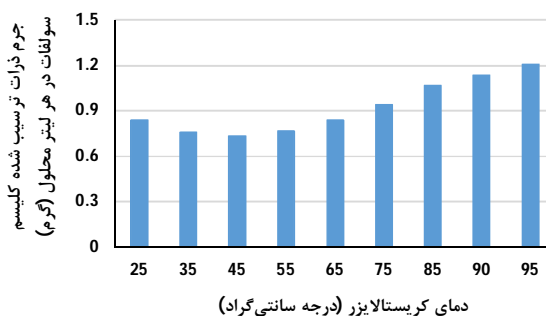
استرانسیم سولفات	باریم سولفات	کلسیم سولفات	نوع ترسیب
1/127	0/482	1/134	جرم ذرات ترسیب شده به ازای یک لیتر محلول نهایی اختلاط یافته (گرم)

همچنین در این پژوهش، تأثیر دما بر فرآیند ترسیب رسوب‌های سولفات با استفاده از شبیه ساز اسپن پلاس بررسی شده است. شکل 5 تغییرات جرم ذرات ترسیب یافته را با افزایش دمای کریستالایزر نمایش می‌دهد. شکل 5-الف، تغییرات جرم کلسیم سولفات را در برابر دمای کریستالایزر نشان می‌دهد و نشانگر افزایش جرم ترسیب با افزایش دما است. این امر بیانگر آن است که در دماهای بالاتر، حلالیت کلسیم سولفات کاهش یافته و منجر به ترسیب بیشتر می‌شود. در بازه دمایی 25 تا 45 درجه سانتی گراد، میزان ترسیب کاهش یافته، اما با عبور از دمای 45 درجه

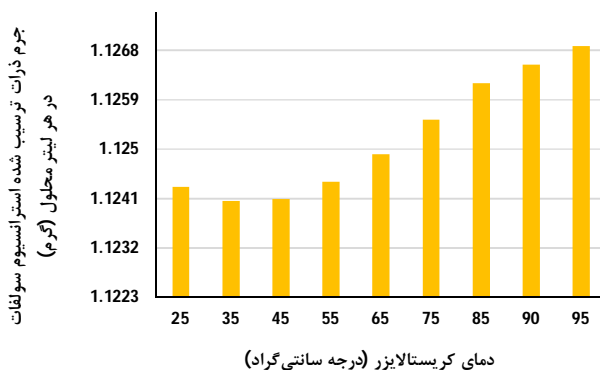
سانتی‌گراد، جرم ترسیب دوباره افزایش می‌یابد. این رفتار می‌تواند حاکی از این است که حلالیت کلسیم سولفات در دماهای بالاتر از 40 درجه سانتی‌گراد کاهش پیدا می‌کند، که در نتیجه به افزایش جرم ذرات ترسیب شده منجر می‌شود، چنانچه در مطالعات پیشین نیز بررسی و تایید شده است. چنین رفتاری در مطالعات نیکو و همکاران [30] و کمال همکاران [32] نیز به‌طور تجربی مورد تأیید قرار گرفته است. در شکل 5-ب، روند تغییرات جرم باریم سولفات در برابر دمای کریستالایزر نشان داده شده است. جرم ترسیب شده باریم سولفات با افزایش دما، برخلاف کلسیم سولفات، کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل افزایش حلالیت باریم سولفات در دماهای بالاتر است که پیش‌تر نیز ذکر شد. همچنین این نکته قابل توجه است که در دماهای بالا، تغییرات حلالیت باریم سولفات به یک حد مشخص می‌رسد و تقریباً ثابت باقی می‌ماند و میزان ترسیب تغییر قابل ملاحظه‌ای ندارد چرا که در دماهای بالا، سیستم مورد بررسی از لحاظ ترمودینامیکی بیشتر به حفظ حلالیت بالا در باریم سولفات گرایش دارد و ترسیب آن کاهش می‌یابد. نهایتاً، شکل 5-پ، تغییرات جرم ذرات ترسیب جامد استرانسیم سولفات در دماهای مختلف کریستالایزر را نشان می‌دهد که باز هم دیده شده است که با افزایش دما تمایل به ترسیب بیشتر شده است. که این یافته، همسو با نتایج گزارش شده توسط مردها و همکاران [38, 39] است. بنابراین، صحت سنجی مطالعه شبیه‌سازی صورت گرفته و نتایج حاصله تطابق بسیار خوبی با نتایج مطالعات پیشین دارند که نهایتاً توانمندی شبیه‌سازی مورد استفاده در تحلیل پدیده رسوب را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)



(پ)

شکل 5- تغییرات جرم ترسیب حاصله در شبیه‌سازی اسپن پلاس نسبت به دمای کریستالایزر برای: الف) کلسیم سولفات ب) باریم سولفات پ) استرانسیم سولفات

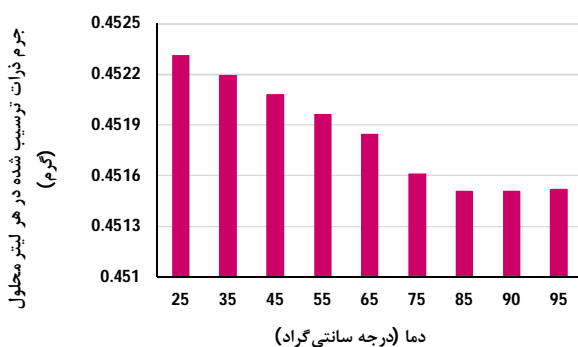
4-2-2- شبیه‌ساز فری کیوسی

نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با نرم‌افزار فری کیوسی تأییدکننده نتایج آزمایشگاهی و نرم‌افزار اسپن پلاس هستند. جدول 8 میزان ترسیب را به صورت مجزا در دمای 90 درجه سانتی‌گراد تحت شرایط مشابه کار آزمایشگاهی نشان می‌دهد که، مشخص می‌کند کلسیم سولفات در مقایسه با باریم و استرانسیم سولفات، پتانسیل ترسیب بیشتری دارد، که این روند با یافته‌های آزمایشگاهی و نتایج اسپن پلاس کاملاً همخوانی دارد.

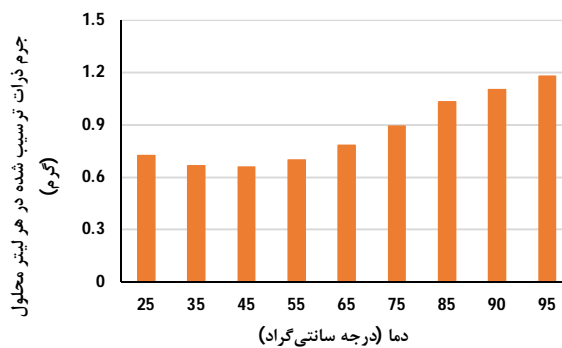
جدول 8- جرم ذرات ترسیب شده انواع ذرات سولفات در دمای 90 درجه سانتی‌گراد حاصل از شبیه‌ساز فری کیوسی

نوع ترسیب	کلسیم سولفات	باریم سولفات	استرانسیم سولفات
جرم ذرات ترسیب شده به ازای یک لیتر محلول نهایی اختلاط یافته (گرم)	1/102	0/451	1/116

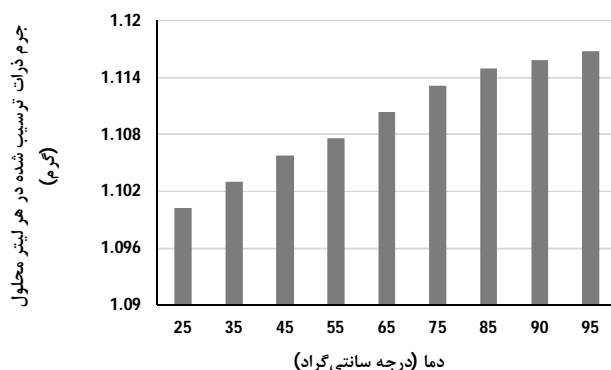
باز هم به روال پیشین، تأثیر دمای اختلاط آب‌های ناسازگار بر مقدار ترسیب سولفات‌های کلسیم، باریم و استرانسیم، این بار در شبیه‌ساز فری کیوسی و مطابق شکل 6 بررسی شده است. شکل‌های 6-الف، ب و پ نشان‌دهنده تغییرات جرم ذرات ترسیب یافته شده کلسیم سولفات، باریم سولفات و استرانسیم سولفات با افزایش دما است. روند تغییرات دمایی هر سه دسته ترسیب مورد بررسی در شبیه‌سازی ژئوشیمیایی فری کیوسی، منطبق بر نتایج شکل 5 است به نحوی که هر دو ابزار شبیه‌سازی مورد استفاده در این پژوهش، یکدیگر را تأیید می‌کنند.



(ب)



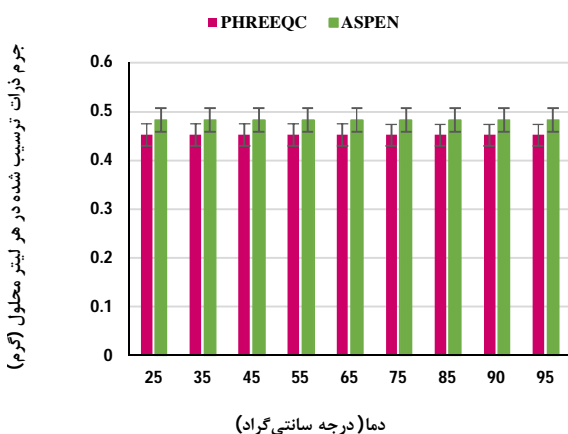
(الف)



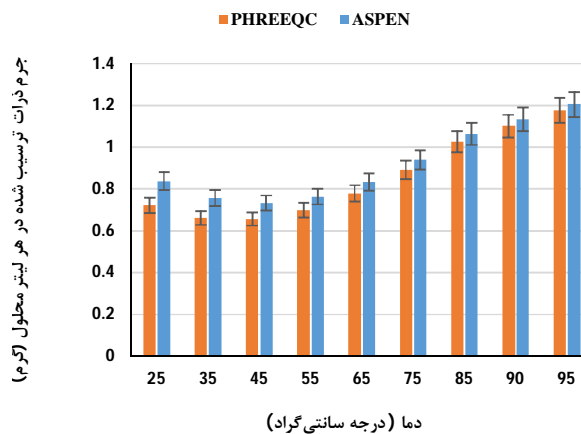
(پ)

شکل 6- تغییرات جرم ترسیب حاصله در شبیه‌سازی فری کیوسی برای: الف) کلسیم سولفات (ب) باریم سولفات (پ) استرانسیم سولفات بر حسب دما

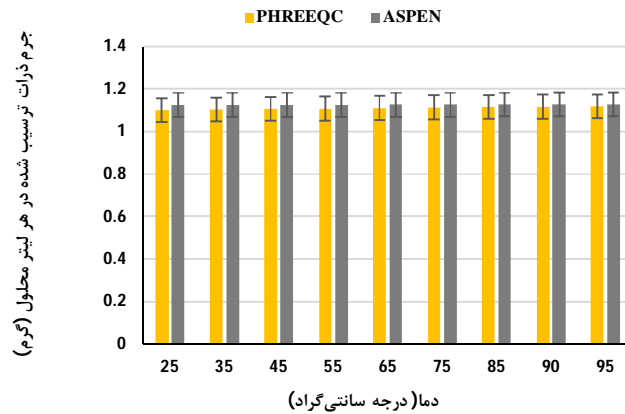
در یک مقایسه کلی از نتایج شبیه‌سازی حاصل در این پژوهش، شکل 7 نشان می‌دهد که هر دو شبیه‌سازی به‌طور کلی روند ترسیب را با دقت بالا و تفاوت ناچیز؛ پیش‌بینی کرده‌اند. مشخصاً، این تفاوت جزئی به ماهیت تحلیل‌های انجام‌شده برمی‌گردد. ارزیابی داده‌های حاصل از نتایج شبیه‌سازی در هر دو شبیه‌سازی نشان می‌دهد که حداکثر خطای نسبی برای داده‌های حاصل از شبیه‌سازیها، به ترتیب برای کلسیم سولفات، باریم سولفات و استرانسیم سولفات برابر با 12، 6 و 2 درصد است که می‌تواند ناشی از تفاوت ماهوی (رویگرد سینتیک اسپن پلاس و ترمودینامیکی فری کیوسی) در اساس عملکرد این دو نرم‌افزار دانست. بنابراین، با توجه به این تفاوت و پیچیدگی پدیده‌های محلول-جامد، این میزان خطا را در محدوده قابل قبول برای شبیه‌سازی سیستم‌های طبیعی می‌توان دانست به‌نحوی که نه تنها موجب کاهش اعتبار نتایج پژوهش نمی‌گردد، بلکه تحلیل تطبیقی بین این دو رویکرد مدل‌سازی می‌تواند به درک عمیق‌تر از رفتار رسوب‌گذاری و اعتبارسنجی متقابل داده‌ها کمک نماید.



(ب)



(الف)



(پ)

شکل 7- مقایسه تغییرات جرم ترسیب حاصله در شبیه‌سازی فری کیوسی و اسپن پلاس برای: الف) کلسیم سولفات ب) باریم سولفات پ) استرانسیم سولفات

5- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، پدیده ترسیب ذرات سولفات شامل کلسیم سولفات، باریم سولفات، و استرانسیم سولفات ناشی از اختلاط آب‌های ناسازگار به‌طور جامع و از طریق آزمایش‌های استاتیک دما بالا، شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری اسپن و فری کیوسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از تحلیل‌های آزمایشگاهی با نتایج حاصل از مطالعات شبیه‌سازی تطبیق داده شدند تا میزان صحت و دقت داده‌های تجربی و شبیه‌سازی ارزیابی شود و درک بهتری از شرایط ترسیب در حالت استاتیک فراهم گردد. با علم به این موضوع که شرایط دینامیکی (جریان پیوسته) می‌تواند شباهت بیشتری با شرایط واقعی میدان‌های نفتی داشته باشد و به عنوان چشم‌اندازی برای مطالعات آینده مدنظر در مرحله توسعه پژوهش قرار گیرد، یافته‌های اصلی این پژوهش به شرح زیر است:

- 1) تعامل میان دما، حلالیت و واکنش‌های ترسیب برای پیش‌بینی فرآیند ترسیب و رفتار شیمیایی آن‌ها ضروری است.
- 2) نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش غلظت اولیه کاتیون‌ها، میزان ترسیب ذرات نیز افزایش یافت. این امر نشان می‌دهد که غلظت‌های بالاتر کاتیون‌ها در محلول‌ها، پتانسیل بالاتری برای واکنش با یون‌های سولفات فراهم می‌کنند و در نتیجه، ترسیب بیشتری رخ می‌دهد. به عنوان مثال، کلسیم سولفات بالاترین جرم ترسیب شده را در این شرایط نشان داد که نشان‌دهنده حضور غلظت بالای اولیه کلسیم در محلول است.
- 3) تصاویر میکروسکوپ الکترونی ساختار کریستالی ذرات ترسیب یافته را نشان می‌دهند؛ به طوری که کریستال‌های کلسیم سولفات به صورت سوزنی، باریم سولفات به صورت پولک‌های متراکم و استرانسیم سولفات به صورت مخروط‌های چندوجهی و تیز شکل گرفته‌اند.
- 4) نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که افزایش دما منجر به افزایش ترسیب کلسیم و استرانسیم سولفات می‌شود، در حالی که این تأثیر در مورد باریم سولفات به شکل کاهش ترسیب نمایان شد. این تفاوت ناشی از رفتار متفاوت

حلالیت این رسوب‌های نسبت به دماست؛ به نحوی که حلالیت کلسیم و استرانسیم سولفات با افزایش دما کاهش یافته و حلالیت باریم سولفات افزایش می‌یابد، که این امر تأثیر مستقیمی بر میزان ترسیب آن‌ها دارد. (5) تطابق نسبتاً مطلوب از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های اسپن پلاس و فری کیوسی، نشان‌دهنده صحت کار پژوهش حاضر است. به علاوه، نرم‌افزارهای مذکور با فرضیات صحیح در ساده‌سازی سیستم مورد مطالعه می‌تواند در سطوح بالاتر بررسی پارامترهای موثر بر پدیده ترسیب و یا حتی ته‌نشست نیز مورد توجه قرار گیرند و به بهبود استراتژی‌های کنترل رسوب کمک کنند. بنابراین، پیشنهاد می‌گردد که نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌ها در طراحی فرآیندهای عملیاتی ترکیب گردد.

6- منابع

- [1] Al-Mhyawi, S.R., et al., "Enhanced nanofiltration process of thin film composite membrane using dodecyl phenol ethoxylate and oleic acid ethoxylate for oilfield calcite scale control", *Membranes*, 11(11): pp. 855, 2021.
- [2] Ghalib, H.B., et al., "Determining the effect of mineral scaling formation under different injection water sources on the performance of Mishrif carbonate reservoir in Halfaya oilfield, Southern Iraq", *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 13(5): pp. 1265-1282, 2023.
- [3] K. El-Sawaf, A., et al., "Synthesis and evaluation of novel copper hydroxide-loaded SBA-15 as inhibitors for an oilfield carbonate scale control: an experiment and a model study", *H2Open Journal*, 7(1): pp. 61-77, 2024.
- [4] Mahmoodi, L., M.R. Malayeri, and F.F. Tabrizi, "Performance of a novel green scale inhibitor. in E3S Web of Conferences", *EDP Sciences*, 2021.
- [5] Mahmoodi, L., et al., "Mitigation of Mineral Deposition in Carbonate and Sandstone Rocks Using Green Scale Inhibitors", *Langmuir*, 38(5): pp. 1797-1810, 2022.
- [6] Vazquez, O., E. Mackay, and K. Sorbie, "A two-phase near-wellbore simulator to model non-aqueous scale inhibitor squeeze treatments", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 82-83: pp. 90-99, 2012.
- [7] Salem, H.M., et al., "Synthesis of novel solid scale inhibitors based on silver tungstate loaded KIT-6 for scale removal from produced water: static and modeling evaluation", *Dalton Transactions*, 52(43): pp. 16043-16060, 2023.

- [8] Kamal, M.S., et al., "Oilfield scale formation and chemical removal :A review", *Journal of petroleum science and engineering*, 171: p. 127-139, 2018.
- [9] Olajire, A.A., "A review of oilfield scale management technology for oil and gas production", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 135: pp. 723-737, 2015.
- [10] Chilingar, G.V., R. Mourhatch, and G.D. Al-Qahtani, "The fundamentals of corrosion and scaling for petroleum & environmental engineers", *Elsevier*, 2013.
- [11] Nikoo, A.H., A. Kalantariasl, and M.R. Malayeri, "Propensity of gypsum precipitation using surface energy approach", *Journal of Molecular Liquids*, 300: pp. 112320, 2020.
- [12] Farrokhrouz, M., A. Taheri, and A. Keshavarz, "Numerical reactive flow transport simulation on core samples during acid fracturing in carbonaceous shale", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 84: pp. 103615, 2020.
- [13] Mahmoodi, A. and H. Nick, "The interplay between microbial reservoir souring and barite scale formation in hydrocarbon reservoirs", *Journal of Cleaner Production*, 377: pp. 134234, 2022.
- [14] Hussein, M.F., et al., "Examining the factors that impact the formation of barite scale in water injection operations: experimental study and quantification of scale formation", *Discover Applied Sciences*, 6(10): pp. 519, 2024.
- [15] Sorbie, K. and E. Mackay, "Mixing of injected, connate and aquifer brines in waterflooding and its relevance to oilfield scaling", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 27(1-2): pp. 85-106, 2000.
- [16] Ko, S., et al., "Prevention of mineral scale deposition using dispersants and inhibitors. in SPE International Oilfield Scale Conference and Exhibition?", *SPE*, 2020.
- [17] Adewole, J.K. and K.B. Muritala, "Some applications of natural polymeric materials in oilfield operations: a review", *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9(3): pp. 2297-2307, 2019.
- [18] Almulhim, N., et al., "Sulfate-Based Scales: Why Sulfate Ion Concentrations Matter", in *International Petroleum Technology Conference*, IPTC, 2024.
- [19] Gruszka, M. and S. Nagy, "Precipitation of Barium Sulphate during the Waterflooding Process in Polish Offshore Oilfields—Case Analysis", *Energies*, 16(8): pp. 3345, 2023.
- [20] Hall, D.M., S.N. Lvov, and I.K. Gamwo, "Prediction of Barium Sulfate Deposition in Petroleum and Hydrothermal Systems, in Solid–Liquid Separation Technologies", *CRC Press*, pp. 101-122, 2022.
- [21] Mohammed, I., et al., "Calcium sulfate scale: A review of state-of-the-art", *Geoenergy Science and Engineering*, 242: pp. 213228, 2024.
- [22] Valadbeygian, V., M. Hajipour, and M. Behnood, "Static and dynamic evaluation of formation damage due to barium sulfate scale during water injection in carbonate reservoirs", *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 13(8): pp. 1819-1831, 2023.
- [23] Khorrali, A., et al., "Increasing inhibition performance of simultaneous precipitation of calcium and strontium sulfate scales using a new inhibitor—Laboratory and field application", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 202: pp. 108589, 2021.
- [24] Kireeva, T., R. Minikaeva, and L. Anisimov, "Prediction of the Deposition of Sulfate Salts Taking the Content of Strontium during the Exploitation of Oil Fields into Account", *Moscow University Geology Bulletin*, 73: pp. 52-59, 2018.
- [25] Ghalib, H.B. and I.A.R. Almallah, "Scaling simulation resulting from mixing predicted model between Mishrif formation water and different waters injection in Basrah oil field, southern Iraq", *Modeling Earth Systems and Environment*, 3: pp. 1557-1569, 2017.

- [26] Fu YunJiao, F.Y., W.v. Berk, and H. Schulz, "Hydrogeochemical modelling of fluid-rock interactions triggered by seawater injection into oil reservoirs: case study Miller field (UK North Sea)", 2012.
- [27] Shaw, S.S.S., K.S.S. Sorbie, and L.S.S. Boak, "The Effects of Barium Sulfate Saturation Ratio, Calcium, and Magnesium on the Inhibition Efficiency—Part II: Polymeric Scale Inhibitors", *SPE Production & Operations*, 27(04): pp. 390-403, 2012.
- [28] Franco-Aguirre, M., et al., "Ca-DTPMP nanoparticles-based nanofluids for the inhibition and remediation of formation damage due to CaCO₃ scaling in tight gas-condensate reservoirs", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 169: pp. 636-645, 2018.
- [29] Mahmoodi, L., M.R. Malayeri, and F.F. Tabrizi, "Abatement of scale precipitation in oilfields using green scale inhibitors", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208: pp. 109237, 2022.
- [30] Nikoo, A.H., et al., "Gypsum-brine-dolomite interfacial interactions in the presence of scale inhibitor", *Chemical engineering science*, 222: pp. 115718, 2020.
- [31] Mohseni, A., L. Mahmoodi, and M.R. Malayeri, "Impact of temperature and pH on calcite inhibition using innovative green scale inhibitors", *Advanced Powder Technology*, 34(2): pp. 103954, 2023.
- [32] Kamal, M.S., et al., "Oilfield scale formation and chemical removal: A review", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171: pp. 127-139, 2018.
- [33] Kumar, S., T.K. Naiya, and T. Kumar, "Developments in oilfield scale handling towards green technology-A review", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 169: pp. 428-444, 2018.
- [34] Tale, F., et al., "Experimental and simulation study of low salinity brine interactions with carbonate rocks", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 184: pp. 106497, 2020.
- [35] Razavirad, F., S. Heidari, and A. Shahrabadi, "Evaluation of compatibility between formation and Injection water into the Reservoir Rock", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 690: pp. 133787, 2024.
- [36] محسنی اژیبه، ع.، محمودی، ل.، و ملایری، م.، تشکیل و کنترل رسوب‌های معدنی در محیط متخلخل میادین نفتی-مطالعه‌ی مروری، ماهنامه اکتشاف و تولید نفت و گاز، دوره: 1400، شماره: 193.
- [37] Djamali, E., W.G. Chapman, and K.R. Cox, "A systematic investigation of the thermodynamic properties of aqueous barium sulfate up to high temperatures and high pressures", *Journal of Chemical & Engineering Data*, 61(10): pp. 3585-3594, 2016.
- [38] Merdhah, A.B.B. and A.A.M. Yassin, "Low sulfate seawater injection into oil reservoir to avoid scaling problem", *Journal of Applied Sciences*, 8(7): pp. 1169-1178, 2008.
- [39] Merdhah, A.B.B. and A.A.M. Yassin, "Scale formation in oil reservoir during water injection at high-salinity formation water", *Journal of applied sciences*, 7(21): pp. 3198-3207, 2007.