Tarbiat Modares University

Journal of
Applied Research of Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Review Paper

A review of the application of ionic liquids in enhanced oil recovery processes

Fatemeh-Zahra Salehi [1], Arezou Jafari [1,*], Reza Gharibshahi [1]

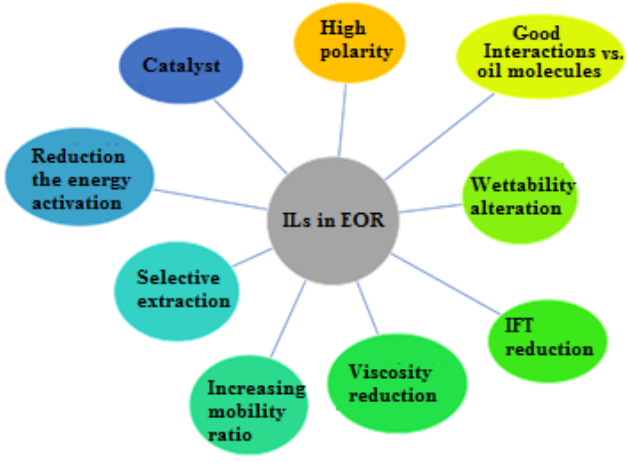
[1] *Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran*

ARTICLE INFO

Received 2025-04-22
Accepted 2025-07-01
Available online 2026-04-25
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:
Ionic liquids
Enhanced oil recovery
Interfacial tension
Wettability
Oil recovery factor

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research subject: Enhanced oil recovery (EOR) is one of the key methods to increase oil recovery from reservoirs, utilizing chemical, physical, or thermal techniques. Among chemical methods, ionic liquids (ILs) have attracted attention as potential alternatives to traditional materials such as surfactants and polymers due to their unique properties, including stability under harsh environmental conditions such as high temperature and salinity, and tunability for specific reservoir conditions.

Research approach: Ionic liquids can serve as surfactant substitutes in enhanced oil recovery processes, but they require proper synthesis and development. Higher environmental sustainability and reduced water consumption are advantages of these materials compared to traditional methods. However, research shows that their impact on EOR performance is relatively limited and requires further optimization, laboratory tests, and simulations. In this article, recent research on the application of ionic liquids in enhanced oil recovery operations is comprehensively reviewed, focusing on their characteristics, mechanisms, experimental results, challenges, and future prospects.

Main results: A review of recent studies shows that ionic liquids can significantly reduce the water/oil interfacial tension and alter the wettability of reservoir rock, both of which are key factors in improving oil transport. For example, the ionic liquid 1-decyl-3-methylimidazolium triflate has shown the ability to reduce interfacial tension significantly. Tests suggest that these materials can recover up to 30% more of the original oil in place.Many ionic liquids also show a strong affinity for asphaltenes and act as solvents and dispersants. This property helps prevent asphaltenes from settling and depositing in the wellbore and around its production zone, which can significantly improve oil flow and production. Ionic liquids can reduce the viscosity of crude oil, making it easier to flow through the reservoir and reducing pressure gradients. However, most studies have been conducted on sandstone reservoirs, and research in carbonate reservoirs is limited, highlighting the need for further investigations.

* Corresponding author: ajafari@modares.ac.ir

Copyright@ 2025, The Authors. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی–پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله مروری

مروری بر کاربرد مایعات یونی در فرایند ازدیاد برداشت نفت

فاطمه‌زهرا صالحی [۱]، آرزو جعفری [۱،*]، رضا غریب‌شاهی [۱]

[۱] دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: ازدیاد برداشت نفت (EOR) یکی از روش‌های کلیدی برای افزایش بازیابی نفت از مخازن است که از فنون شیمیایی، فیزیکی یا حرارتی بهره می‌برد. در میان روش‌های شیمیایی، مایعات یونی (ILs) به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردشان، از جمله پایداری در شرایط سخت محیطی مانند دما و شوری بالا و قابلیت تنظیم‌پذیری برای شرایط خاص مخزن، به‌عنوان جایگزین‌های بالقوه برای مواد سنتی مانند سطح‌فعال‌ها و پلیمرها مورد توجه قرار گرفته‌اند.

روش تحقیق: مایعات یونی می‌توانند به‌عنوان جایگزین‌های سطح‌فعال‌ها در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت عمل کنند، اما نیاز به سنتز و توسعه مناسب دارند. پایداری زیست‌محیطی بالاتر و کاهش مصرف آب از مزایای این مواد نسبت به روش‌های سنتی است. با وجود این، تحقیقات نشان می‌دهد که تأثیر آن‌ها بر عملکرد ازدیاد برداشت نفت نسبتاً محدود است و نیاز به بهینه‌سازی و آزمایش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی بیشتری دارد. در این مقاله، با مرور جامع مطالعات پیشین صورت‌گرفته، تحقیقات سال‌های اخیر در مورد کاربرد مایعات یونی در عملیات ازدیاد برداشت نفت، با تمرکز بر ویژگی‌ها، سازوکارها، نتایج تجربی، چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده بررسی شده است.

نتایج اصلی: بررسی نتایج مطالعات اخیر نشان می‌دهد که مایعات یونی می‌توانند کشش بین سطحی آب/نفت را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داده و ترشوندگی سنگ مخزن را تغییر دهند که هر دو عامل کلیدی در بهبود جابه‌جایی نفت هستند. به‌عنوان مثال، مایع یونی ۱-دسیل-۳-متیل‌ایمیدازولیوم تریفلات توانایی کاهش چشمگیر کشش بین‌سطحی را نشان داده است. آزمایش‌ها حاکی از آن است که این مواد می‌توانند تا حدود ۳۰ درصد از نفت اولیه موجود را بیشتر بازیابی کنند. همچنین بسیاری از مایعات یونی میل ترکیبی قوی با آسفالتین دارند و می‌توانند به‌عنوان حلال و عامل پخش‌کننده عمل کنند. این ویژگی به جلوگیری از رسوب آسفالتین و رسوب در چاه و اطراف ناحیه تولیدی آن کمک می‌کند که می‌تواند جریان و تولید نفت را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشد. مایعات یونی می‌توانند گرانروی نفت خام را کاهش دهند و جریان آن را در مخزن آسان‌تر کرده و گرادیان فشار را کاهش دهند. با این حال، بیشتر مطالعات روی مخازن سنگ‌های شنی انجام شده و تحقیقات در مخازن کربناته محدود است، که نیاز به بررسی‌های بیشتر را برجسته می‌کند.

کلیدواژه‌ها

مایع یونی

ازدیاد برداشت نفت

کشش بین‌سطحی

ترشوندگی

ضریب برداشت نفت

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰

دسترس آنلاین: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵

ISSN: 2588-5316

Online ISSN: 2588-5324

* نویسنده مسئول: ajafari@modares.ac.ir

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، نویسندگان. این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

۱ مقدمه

تأمین انرژی و رفع تقاضای جهانی برای نفت خام مستلزم توسعه فناوری‌های پایدار و کارآمد برای بهره‌برداری از ذخایر چالش‌برانگیز و غیرمتعارف نفت خام، به‌ویژه نفت خام سنگین و فوق سنگین است. تقاضای جهانی انرژی به‌دلیل رشد جمعیت و توسعه اقتصادی، به‌ویژه در بازارهای نوظهور، همچنان در حال افزایش است. درعین‌حال، کاهش اثرات محیط‌زیستی تولید انرژی و تغییر به سمت روش‌های پایدارتر ضروری است [۱]. چشم‌انداز انرژی جهانی به‌طور جدایی‌ناپذیری، حتی با پیشرفت فناوری‌های تجدیدپذیر، با هیدروکربن‌ها گره خورده است. روش‌های مرسوم بازیافت نفت (استخراج اولیه و ثانویه) ۶۰ تا ۸۰ درصد از نفت اصلی را در جای خود باقی می‌گذارند، که نیاز به فنون ازدیاد برداشت نفت (Enhanced Oil Recovery) برای استخراج این منابع باقی‌مانده است [۲]. با این حال، روش‌های سنتی ازدیاد برداشت نفت، مانند سیلاب‌زنی مواد شیمیایی (موادفعال سطحی، پلیمرها، مواد قلیایی) و روش‌های حرارتی، با چالش‌های فزاینده‌ای مواجه هستند. این‌ها شامل ناکارآمدی در مخازن با دما و شوری بالا، سمیت زیست‌محیطی مواد شیمیایی و غیرممکن بودن ملاحظات اقتصادی در مخازن نفت خام سنگین، فوق‌سنگین و غیرمتعارف است. تولید نفت خام سنگین به‌طور عمده توسط روش‌های حرارتی انجام می‌شود. هدف اصلی از روش بازیافت حرارتی، کاهش گرانروی نفت سنگین و قیر به‌منظور بهبود حرکت آن به سمت چاه تولیدی است [۱]. در این راستا، فرایندهای بازیافت حرارتی متداول مانند تزریق بخار، روش احتراق درجا، تزریق آب گرم و ریزش ثقلی بخار (SAGD) ممکن است معیارهای اقتصادی را برآورده نکند و محدودیت‌های محیط‌زیستی داشته باشند [۳]. همچنین ممکن است این روش‌ها با بسیاری از مخازن سازگار نباشند (به‌عنوان‌مثال مقادیر بالای خاک رس، شیل، مخازن عمیق، سازندهای ناهمگون). از طرف دیگر، ازدیاد برداشت نفت به روش شیمیایی به‌شدت به مواد فعال سطحی برای کاهش کشش بین‌سطحی (Interfacial Tension) و پلیمرها برای بهبود بازده جاروب متکی است [۴]. با این حال، این عوامل اغلب تحت شرایط مخزن شکست می‌خورند. به‌عنوان مثال، مواد فعال سطحی در آب‌نمک‌های با شوری بالا رسوب می‌کنند، درحالی‌که پلیمرهای مصنوعی مانند پلی‌آکریل‌آمید آب‌کافت‌شده (HPAM) از نظر حرارتی، بالای ۸۰ درجه سانتی‌گراد دچار تجزیه شده، گرانروی و سیالیت آن‌ها کاهش پیدا کرده و قادر به جابه‌جایی نفت باقی‌مانده در منافذ نیستند [۵]. همچنین، سیلاب‌زنی قلیایی، اگرچه مقرون‌به‌صرفه است، ممکن است باعث آسیب به سازند به‌دلیل تجمع رسوب ذرات شود [۶].

فرایندهای تزریق حلال به‌دلیل قابلیت کاهش سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های عملیاتی می‌توانند گزینه امیدوارکننده‌ای برای استفاده در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت برای تولید پایدار نفت خام باشند. اما، یکی از مشکلات اصلی حلال‌های سنتی یا آلی این است که این حلال‌ها قابل‌احتراق، انفجار و سمی هستند که می‌تواند در عملیات میدانی به‌شدت خطرناک باشد. علاوه بر این، این حلال‌ها دارای فراریت بالایی هستند که منجر به افزایش هزینه‌ها می‌شوند. به همین منظور، امروزه محققان برای حل مسائل مختلف در صنعت نفت به استفاده از حلال‌های سبز، مانند مایعات یونی (Ionic Liquids, ILs) که سازگاری بیشتری با محیط‌زیست دارند، روی آورده‌اند. مایعات یونی نمک‌های مذاب با نقطه ذوب زیر ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، به‌عنوان راه‌حل طراحی برای ازدیاد برداشت نفت ظاهر شده‌اند که خواص فیزیکی و شیمیایی قابل‌تنظیم، چند کارکردی و مزایای بالقوه محیطی را ارائه می‌دهند [۷]. مایعات یونی که به‌عنوان «حلال‌های سبز» نیز شناخته می‌شوند، سیالاتی هستند که می‌توان از آن‌ها برای رسیدگی به چالش‌های مخزن استفاده کرد. مایعات یونی سبز دسته‌ای از حلال‌ها هستند که به‌دلیل خواص منحصربه‌فرد خود از جمله فراریت کم، پایداری حرارتی بالا و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی قابل‌تنظیم شناخته شده‌اند. مایعات یونی سبز به‌دلیل قطبیت بالا می‌توانند با آسفالتین‌ها، موم‌ها و دیگر مولکول‌های پیچیده در نفت خام برهم‌کنش داشته باشند و تجمع آن‌ها را مختل کرده و جریان نفت خام را بهبود بخشند [۸].

مایعات یونی از طریق سازوکارهای متعددی می‌توانند از تجمع آسفالتین‌ها جلوگیری کرده و نقش مؤثری در بهبود فرایندهای تولید و پالایش نفت ایفا کنند. یکی از مهم‌ترین این سازوکارها، توزیع بار سطحی است. به‌دلیل ساختار یونی، این مایعات می‌توانند با بارهای سطحی آسفالتین‌ها وارد تعامل شوند و باعث افزایش نیروهای دافعه بین ذرات شوند. این افزایش دافعه موجب کاهش احتمال تجمع و کلوخه‌شدن آسفالتین‌ها می‌شود [۹]. به‌ویژه برخی از مایعات یونی خاص، مانند مایعات یونی آمفیفیلیک، قادرند جایگزین لایه‌های آسفالتینی اطراف قطرات نفت یا آب در امولسیون‌های نفت خام سنگین شوند و از این طریق نیز مانع تجمع آسفالتین‌ها شوند [۱۰]. سازوکار دیگر مربوط به اثر حلالیت است. مایعات یونی می‌توانند به‌عنوان حلال‌های جایگزین برای آسفالتین‌ها عمل کرده و با افزایش حلالیت آن‌ها در محیط، از تمایل ذرات آسفالتینی به تجمع بکاهند. این ویژگی به‌شدت به ساختار شیمیایی مایع یونی وابسته است، به‌گونه‌ای که مایعات یونی دارای زنجیره‌های آلکیل بلندتر، توانایی بیشتری در کاهش گرانروی نفت خام و پراکندگی آسفالتین‌ها دارند [۱۱]. از سوی دیگر، مایعات یونی قادرند ترشوندگی سطحی را تغییر داده و سطح را به‌سمت آب‌دوستی بیشتر سوق دهند. این تغییر ترشوندگی سبب کاهش چسبندگی آسفالتین‌ها به سطوح جامد می‌شود و از تشکیل رسوبات آسفالتینی جلوگیری می‌کند [۱۲]. همچنین، مایعات یونی آمفیفیلیک که دارای بخش‌های آب‌دوست و چربی‌دوست هستند، می‌توانند با کاهش کشش سطحی بین فاز آبی و نفتی، خاصیت بازدارندگی ایجاد کرده و از ایجاد امولسیون‌های پایدار نفت خام جلوگیری کنند [۱۳].

ساختار کاتیون-آنیون آن‌ها امکان تنظیم دقیق خواصی مانند آب‌گریزی، پایداری حرارتی و حلالیت قابل‌توجه را فراهم می‌کند و آن‌ها را قادر می‌سازد تا عملکرد فوق‌العاده‌ای داشته باشند [۸]. به‌عنوان مثال، مایعات یونی مبتنی بر ایمیدازولیوم که کشش بین‌سطحی را به کمتر از ۱ mN/m در آب‌نمک‌های با شوری بالا کاهش می‌دهند [۱۴]، یا برای مثال، مایعات یونی فسفونیومی که ترشوندگی سنگ‌های کربناته را از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست تغییر می‌دهند [۱۵] و همچنین می‌توان به مایعات یونی بر پایه پیریدینیوم که به‌عنوان مهارکننده‌های آسفالتین در نفت خام سنگین شناخته شده‌اند، اشاره کرد [۱۶]. از طرف دیگر، بر خلاف مواد شیمیایی معمولی، مایعات یونی عملکرد خود را در دما و شوری بالا حفظ می‌کنند و آن‌ها را به‌طور منحصربه‌فردی برای مخازن غیرمتعارف (مانند شیل) مناسب

می‌کنند [۱۷]. علاوه بر این، برخی از مایعات یونی مشتق شده از مواد زیستی، مانند مخلوط کولین-اسیدهای چرب، قابلیت تجزیه‌پذیری را ارائه می‌دهند که با اصول اقتصاد دایره‌ای همسو می‌شود [۱۸].

باوجود افزایش مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی در چند سال اخیر، شکاف‌های قابل‌توجهی در استفاده از مایعات یونی برای کاربردهای ازدیاد برداشت نفت، به‌ویژه در مقیاس میدانی، وجود دارد. برای مثال، بسیاری از مایعات یونی برچسب «سبز» ندارند و این بدان معنی است که این نوع از مایعات یونی دارای روش سنتز انرژی‌بر یا آنیون‌های سمی وابسته بوده که مزایای زیست‌محیطی آن‌ها را نفی می‌کند.

بنابراین، هدف از این مقاله، مرور و بررسی عوامل و جنبه‌های مختلفی مثل، عملکرد مایعات یونی از نظر ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی در مقایسه با مواد شیمیایی سنتی و همچنین تدوین چارچوب‌های سیاستی برای تشویق پذیرش مایعات یونی برای استفاده در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت با تجزیه‌وتحلیل موفقیت‌ها، تضادها و همچنین مفروضات بررسی‌نشده در مطالعات پیشین است.

۲ ازدیاد برداشت نفت خام با استفاده از مایعات یونی

۲-۱ مایعات یونی به‌عنوان حلال‌های سبز

حلال‌ها نقش مهمی در صنایع مختلف دارند و به‌طور وسیع در کاربردهای مختلفی استفاده می‌شوند. بیشتر حلال‌های سنتی فرار، آتش‌گیر و سمی هستند که می‌تواند منجر به صدمات مختلفی به کارکنان و همچنین آلودگی‌های مختلف زیست‌محیطی شوند. از این رو، در سال‌های اخیر، توسعه و کاربرد نسل جدیدی از حلال‌ها که حلال‌های سبز نام‌گذاری شده‌اند، مورد توجه محققان و صنعتگران قرار گرفته است. این حلال‌ها در عین حالی که خواص مناسب حلال‌های سنتی را دارند، سازگاری مناسبی با محیط‌زیست و سلامتی انسان دارند که کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف را توجیه‌پذیر کرده است. یکی از اصلی‌ترین زیرمجموعه‌های حلال‌های سبز، مایعات یونی هستند. مایعات یونی، نمک‌هایی هستند که در دمای اتاق یا نزدیک به آن مایع هستند و به علت فشاربخار ناچیز، غیر فرار هستند. پل والدن در سال ۱۹۱۴ اولین مایع یونی (نیترات اتیل‌آمونیوم) را گزارش کرد. مایعات یونی معمولاً از کاتیون‌های آلی حجیم و غیرمتقارن (مانند ایمیدازولیوم، پیریدینیوم) و آنیون‌های مختلف (مانند تترافلوئوروبورات، هگزافلوئوروفسفات) تشکیل می‌شوند [۱۹]. در ساختار مایع یونی، این دو جز به صورت نامنظم و غیرفشرده در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. این مایعات، خواص منحصربه‌فردی مانند رسانایی یونی بالا، پایداری حرارتی خوب، فشار بخار ناچیز و خواص حل‌پذیری قابل‌تنظیم را ارائه می‌دهند [۷]. همچنین این حلال‌ها اشتعال‌ناپذیر، غیرسمی و سازگار با طبیعت هستند. به همین دلیل امروزه این حلال‌ها کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند.

۲-۲ مقایسه استفاده از مایعات یونی با روش‌های شیمیایی سنتی ازدیاد برداشت نفت

مایعات یونی به‌عنوان نسل نوینی از مواد فعال سطحی و حلال‌های طراحی‌شده، در سال‌های اخیر توجه بسیاری از محققان در حوزه ازدیاد برداشت نفت را به خود جلب کرده‌اند. این ترکیبات، که اغلب از کاتیون‌های آلی و آنیون‌های معدنی یا آلی تشکیل شده‌اند، دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی هستند که آن‌ها را از مواد شیمیایی سنتی مورد استفاده در ازدیاد برداشت نفت (مانند مواد فعال سطحی، پلیمرها و قلیاها) متمایز می‌سازد. استفاده از مایعات یونی دارای مزایای متعددی نسبت به روش های سنتی شیمیایی ازدیاد برداشت نفت است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره شده است:

- پایداری حرارتی و شیمیایی بالا: برخلاف بسیاری از مواد فعال سطحی و پلیمرهای رایج که در شرایط دمایی و شوری بالا عملکرد خود را از دست می‌دهند، مایعات یونی در محیط‌های شدید مخزنی (دما و فشار بالا، شورابه‌های سنگین) عملکرد پایداری دارند.
- طراحی‌پذیری ساختار مولکولی: امکان تنظیم ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مایعات یونی از طریق انتخاب مناسب کاتیون و آنیون، به محققان اجازه می‌دهد تا سامانه‌هایی خاص برای شرایط هر مخزن طراحی کنند.
- چندکاره بودن: مایعات یونی می‌توانند به‌طور هم‌زمان در چند سازوکار ازدیاد برداشت از جمله کاهش کشش سطحی بین فازها، تغییر ترشوندگی، جلوگیری از رسوب آسفالتین و حتی تسهیل در نفوذپذیری مؤثر باشند.
- زیست‌سازگاری در برخی ساختارها: با استفاده از ترکیبات طبیعی یا زیست‌تخریب‌پذیر در ساختار مایعات، می‌توان نسخه‌هایی سازگار با محیط‌زیست تولید کرد که آسیب کمتری به منابع آبی و خاکی وارد می‌کنند.

علی‌رغم مزیت‌های ذکر شده، همچنان استفاده از این حلال‌ها در مقیاس صنعتی با چالش‌های مختلف روبه‌رو است که باید در مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرد. در ادامه به برخی از این معایب و یا چالش‌ها اشاره شده است:

- هزینه تولید بالا: یکی از مهم‌ترین موانع در توسعه صنعتی مایعات یونی، هزینه بالای سنتز آن‌ها در مقیاس صنعتی است، گرچه در سال‌های اخیر استفاده از منابع طبیعی و طراحی حلال‌های یوتکتیک عمیق (DES) این هزینه را کاهش داده است.
- پراکندگی محدود داده‌های میدانی: اغلب مطالعات انجام‌شده در مورد مایعات یونی در مرحله آزمایشگاهی یا نیمه‌صنعتی بوده‌اند و شواهد کافی از عملکرد بلندمدت آن‌ها در شرایط واقعی میدانی در دست نیست.
- برخی نگرانی‌های زیست‌محیطی: در مورد برخی مایعات یونی سنتی که بر پایه هالیدها یا ترکیبات آروماتیک طراحی شده‌اند، خطر تجمع زیستی و سمیت وجود دارد که نیازمند اصلاح ساختار و مطالعات دقیق‌تر است.
- رفتار پیچیده در محیط متخلخل: اگرچه مایعات یونی در محیط همگن رفتار قابل پیش‌بینی‌تری دارند، اما در محیط متخلخل و

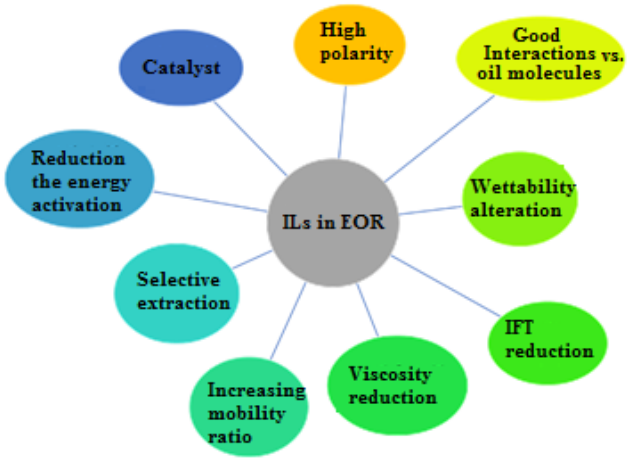
ناهمگن مخزن، دینامیک آن‌ها می‌تواند پیچیده باشد و نیاز به مدل‌سازی پیشرفته دارد.

با توجه به آنچه گفته شد، می‌توان نتیجه گرفت که مایعات یونی، به‌ویژه در قالب سامانه‌های عمیقاً طراحی‌شده و زیست‌سازگار، ظرفیت بالایی برای جایگزینی یا تکمیل روش‌های شیمیایی سنتی در فرایندهای ازدیاد برداشت دارند. با این حال، توسعه صنعتی آن‌ها مستلزم مطالعات جامع اقتصادی، زیست‌محیطی و میدانی است.

۲-۳ قابلیت مایعات یونی در بهبود برداشت نفت خام

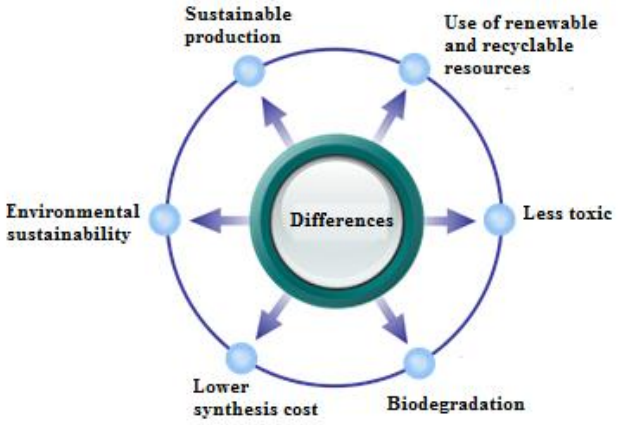
مایعات یونی به‌عنوان عوامل امیدوارکننده برای فرایندهای ازدیاد برداشت نفت مورد توجه قرار گرفته‌اند و مزایای متعددی را نسبت به روش‌های سنتی ارائه می‌دهند. ویژگی‌های اساسی مایعات یونی به‌منظور استفاده در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت در شکل ۱ نشان داده شده است. بسیاری از مایعات یونی میل ترکیبی قوی برای آسفالتین نشان می‌دهند و به‌عنوان حلال و عامل پخش‌کننده عمل می‌کنند [۱۶]. این ویژگی به جلوگیری از رسوب آسفالتین در چاه و اطراف ناحیه تولیدی آن کمک می‌کند که می‌تواند جریان و تولید نفت را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشد. مایعات یونی می‌توانند گرانروی نفت خام را کاهش دهند و جریان آن را در مخزن آسان‌تر کرده و گرادیان فشار را کاهش دهند [۲۰]. کاهش گرانروی نفت خام توسط مایعات یونی به واسطه تعاملات خاص بین مولکول‌های نفت و ساختار مایعات یونی انجام می‌شود که شامل پیوندهای هیدروژنی و نیروهای واندروالس است. این مایعات با کاهش چسبندگی مولکول‌های نفت، به بهبود جریان‌پذیری آن کمک می‌کنند و همچنین می‌توانند باعث تغییر در ساختار میکروسکوپی نفت، مانند تجزیه ترکیبات سنگین و کاهش اندازه ذرات معلق، شوند. علاوه بر این، مایعات یونی ممکن است به‌عنوان کاتالیزور در فرایندهای حرارتی عمل کرده و دما را افزایش دهند که به‌نوبه‌خود می‌تواند گرانروی را کاهش دهد. به‌طورکلی، این سازوکارها باعث می‌شوند که مایعات یونی به‌عنوان راهکار مؤثر در بهبود خواص رئولوژیکی نفت خام عمل کنند. همچنین مایعات یونی می‌تواند باعث تشکیل میکروامولسیون شوند. پس از تشکیل میکروامولسیون، کشش بین‌سطحی سامانه‌ها کاهش می‌یابد و نفت به‌راحتی جابه‌جا می‌شود. از این رو، ترکیبی از مهار رسوب آسفالتین، کاهش کشش‌سطحی و کاهش گرانروی نفت خام توسط مایعات یونی منجر به بهبود تحرک نفت خام و افزایش ضریب برداشت نفت خام می‌شود.

تحقیقات اخیر، بر قابلیت مایعات یونی در افزایش کارآیی بازیافت نفت به‌عنوان رویکرد نوین ازدیاد برداشت نفت تأکید داشته‌اند [۲۱]. نکته حائز اهمیت این است که نسل جدیدی از مایعات یونی سنتزی را می‌توان به‌گونه‌ای تولید کرد که دارای مشخصات زیست‌سازگار در مقایسه با مایعات یونی معمولی باشد. برای سنتز این‌گونه مواد، یا از روش‌های سنتز زیست‌سازگار، مانند امواج ماکروویو استفاده می‌شود یا از موادی که به‌راحتی در محیط زیست تجزیه می‌شوند. هزینه سنتز و اجرای مایعات یونی برای پذیرش گسترده در صنعت نفت باید از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه باشد. ازاین‌رو، کاهش هزینه‌های سنتز و تولید صنعتی این مواد باید مورد توجه باشد. در نهایت، اثرات محیط‌زیستی مایعات یونی باید با توجه به سمیت بالقوه و زیست‌تخریب‌پذیری آن‌ها به‌طورکامل ارزیابی و کاهش یابد. بنابراین، به‌تازگی نسل جدیدی از مایعات یونی موسوم به مایعات یونی سبز مورد توجه محققان قرار گرفته است که می‌تواند بسیاری از چالش‌های استفاده از مایعات یونی معمولی در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت را برطرف کند. تفاوت‌های کلیدی مایعات یونی سبز با مایعات یونی معمولی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱ ویژگی‌های اساسی مایعات یونی در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت

Figure 1 Basic properties of ionic liquids in enhanced oil recovery processes



شکل ۲ تفاوت‌های کلیدی مایعات یونی سبز با مایعات یونی معمولی

Figure 2 Key differences between green ionic liquids and regular ionic liquids

مایعات یونی سبز برای به حداقل رساندن اثرات محیط‌زیستی مایعات یونی معمولی طراحی شده‌اند [۲۲]. آن‌ها با استفاده از منابع تجدیدپذیر سنتز می‌شوند، سمیت کمی دارند، زیست‌تخریب‌پذیر هستند و می‌توانند بازیافت یا استفاده مجدد شوند [۲۳]. مایعات یونی سبز از منابع تجدیدپذیر مانند زیست‌توده، الکل‌های زیستی یا محصولات طبیعی مشتق می‌شوند، که اتکا به سوخت‌های فسیلی را به حداقل می‌رساند و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد. استفاده از منابع تجدیدپذیر به‌طور بالقوه می‌تواند مایعات یونی سبز را در درازمدت مقرون‌به‌صرفه‌تر کند و وابستگی به مواد معمولی گران‌قیمت را کاهش دهد. سنتز مایعات یونی سبز اغلب شامل فرایندهای سازگارتر با محیط‌زیست، کاهش مصرف انرژی و به حداقل رساندن تولید

مواد زائد است [۲۳]. آن‌ها طوری طراحی و سنتز می‌شوند که سمیت کمتری برای انسان و محیط داشته باشند. مایعات یونی سبز به‌راحتی در محیط تجزیه می‌شوند و تأثیر طولانی‌مدت آن‌ها را به حداقل می‌رساند. این مایعات را می‌توان بازیافت یا استفاده مجدد کرد، که نیاز به سنتز جدید را کاهش می‌دهد و تولید زباله و مواد زائد را به حداقل می‌رساند [۲۴]. از نمونه‌های مختلف از مایعات یونی سبز می‌توان به مایعات یونی مبتنی بر کولین، نظیر کولین‌کلرید که ترکیب طبیعی است و می‌تواند به‌عنوان کاتیون برای سنتز مایعات یونی زیست‌تخریب‌پذیر و زیست‌سازگار استفاده شود، اشاره کرد [۲۵]. همچنین، مایعات یونی مبتنی بر فسفونیوم را می‌توان با ضدیون‌های زیستی طراحی کرد، که آن‌ها را دوست‌دار محیط‌زیست می‌کند. به‌طورکلی، استفاده از فناوری‌های سبز، مانند سنتز و به‌کارگیری مایعات یونی سبز، با تقاضای فزاینده برای کاربرد شیوه‌های تولید پایدار و سازگار با محیط‌زیست در صنعت نفت مطابقت دارد. از این رو استفاده از مایعات یونی سبز مطابقت بالایی با استانداردهای جهانی محیط‌زیستی دارد و چالش‌های عمومی تولید نفت خام را، به‌ویژه در مناطق حساس به محیط‌زیست، به مقدار زیادی کاهش می‌دهد. از این رو، به کارگیری روش سنتز سبز و پایدار این حلال‌ها، به نظر راه‌حل مناسبی می‌آید که به‌خوبی با اصول شیمی سبز مطابقت دارد.

۲-۴ نقش شرایط عملیاتی و زمین‌شناسی در انتخاب نوع مایعات یونی برای فرایندهای ازدیاد برداشت نفت

یکی از عوامل کلیدی در موفقیت کاربرد مایعات یونی (ILs) در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت، تناسب دقیق ویژگی‌های مایعات یونی با شرایط عملیاتی و زمین‌شناسی مخزن هدف است. از آنجا که ساختار مولکولی مایعات یونی قابل تنظیم است، درک دقیق شرایط مخزن به انتخاب صحیح نوع کاتیون و آنیون و در نتیجه بهینه‌سازی عملکرد، کمک شایانی می‌کند. در ادامه، تأثیر مهم‌ترین عوامل عملیاتی و زمین‌شناسی در انتخاب نوع IL مناسب بررسی می‌شود:

- ✓ **دمای مخزن:** مخازن نفتی، به‌ویژه در اعماق زیاد، دمایی در حدود ۸۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد یا بالاتر دارند. برخی مایعات یونی در دماهای بالا ناپایدار می‌شوند؛ زیرا در این دما احتمال تجزیه یا تبخیر آنیون‌های فلورینه مثل PF_6^- یا BF_4^- افزایش می‌یابد. مایعات یونی بر پایه ایمیدازولیوم یا پیرولیدینیوم با آنیون‌هایی مانند NTf_2^- یا HSO_4^- معمولاً مقاومت حرارتی خوبی نشان می‌دهند. در دماهای بالا، کاهش گرانروی مایعات یونی مزیت دارد؛ اما باید از نظر قابلیت تزریق و توزیع نیز بررسی شود.
- ✓ **فشار مخزن:** در مخازن عمیق، فشار می‌تواند تا چند صد بار برسد. فشار بالا بر رفتار ترمودینامیکی مایعات یونی (مانند انحلال‌پذیری، کشش بین‌سطحی و پایداری ساختار) تأثیر می‌گذارد. انتخاب ILهایی با حجم مولکولی پایین‌تر و ساختار متقارن‌تر در فشار بالا، پایداری بیشتری فراهم می‌کند. فشار همچنین بر نفوذ ILها در محیط متخلخل تأثیرگذار است و باید در طراحی آزمون‌های تزریق مغزه و مدل‌های شبیه‌سازی لحاظ شود.
- ✓ **نوع سنگ مخزن (کربناته یا سیلیکاته):** در مخازن کربناته (مثل آهک و دولومیت)، ترشوندگی معمولاً به سمت آب‌گریز گرایش دارد، لذا ILهایی که قابلیت تغییر ترشوندگی به حالت آب‌دوست دارند، اولویت دارند. برای این مخازن، ILهای دارای گروه‌های عاملی قطبی یا یونی (مثل سولفونات یا هیدروکسیل) عملکرد بهتری نشان داده‌اند. در مخازن ماسه‌سنگی (سیلیکاتی)، معمولاً ترشوندگی طبیعی آب‌دوست‌تر است، اما تجمع آسفالتین یا رسوب مواد آلی روی سطح می‌تواند آن را تغییر دهد. در این حالت، ILهایی که بتوانند پیوندهای π-π با ترکیبات آروماتیک نفتی برقرار کرده و رسوب را مهار کنند، مناسب‌ترند.
- ✓ **شوری آب سازند و ترکیب یونی آن:** شوری بالا و حضور یون‌هایی مثل Ca^{2+}، Mg^{2+} و SO_4^{2-} می‌تواند باعث ناپایداری یا کاهش عملکرد برخی مایعات یونی شود. برای محیط‌های با شوری بالا، ILهایی با آنیون‌های بزرگ و آب‌گریز مانند NTf_2^- یا دوقطبی‌های قوی که برهم‌کنش یون-یون را کاهش دهند، مناسب‌تر هستند. حلال‌های یوتکتیک عمیق (مانند مخلوط کولین‌کلرید با اوره یا اسیدهای آلی) نیز در محیط‌های شور پایداری خوبی نشان داده‌اند و از نظر زیست‌محیطی نیز مزیت دارند.
- ✓ **ویژگی‌های نفت خام (ویسکوزیته، ترکیب، حضور آسفالتین):** در نفت‌های سنگین یا غنی از آسفالتین، ILهایی که توانایی برهم‌کنش با مولکول‌های بزرگ و قطبی دارند (مانند گروه‌های فسفونات یا سولفونات) مؤثرترند. در نفت‌های سبک‌تر، تمرکز بیشتر بر تغییر ترشوندگی و کاهش کشش سطحی است.

به‌طور کلی، شرایط عملیاتی و زمین‌شناسی نقش حیاتی در تعیین ساختار و نوع مایعات یونی ایفا می‌کنند. انتخاب صحیح IL باید با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی‌شده تحت دما، فشار و شوری مشابه مخزن واقعی همراه باشد. به‌کارگیری روش‌هایی چون طراحی آزمایش، مدل‌سازی مولکولی و آزمون‌های تزریق مغزه در این مسیر بسیار کمک‌کننده است.

۳ سنتز مایعات یونی

۳-۱ روش‌های سنتی

سنتز مایعات یونی به‌دلیل اهمیت بالای ساختار مولکولی در تعیین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و عملکردی آن‌ها، از مراحل کلیدی در توسعه این ترکیبات برای کاربردهای خاص مانند ازدیاد برداشت نفت محسوب می‌شود. مایعات یونی معمولاً از دو جزء اصلی یعنی کاتیون آلی و آنیون آلی یا معدنی تشکیل می‌شوند که با روش‌های مختلف قابل ترکیب هستند. فرایند سنتز IL ها معمولاً در دو مرحله اصلی سنتز یا تهیه کاتیون و تعویض آنیون (Anion Exchange) انجام می‌شود.

ساده‌ترین و رایج‌ترین روش تهیه کاتیون‌های آلی، آلکیلاسیون آمین‌ها، ایمیدازول‌ها، پیرولیدین‌ها یا فسفین‌ها با عوامل آلکیله‌کننده مانند آلکیل‌هالیدها است. سنتز ایمیدازولیوم‌ها یا سنتز پیرولیدینیوم‌ها و آمونیوم‌ها جزء این دسته محسوب می‌شوند. این مرحله اغلب تحت دمای

کنترل‌شده و در محیط بدون آب انجام می‌شود. این مرحله معمولاً به زمان واکنش طولانی و دماهای بالا نیاز دارد. برای مثال، سنتز ۱-بوتیل-۳- متیل ایمیدازولیوم کلرید از طریق واکنش ۱-متیل ایمیدازول با ۱-کلروبوتان معمولاً چندین ساعت در دماهای بالا (۸۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) طول می‌کشد. این واکنش همچنین می‌تواند محصولات جانبی نامطلوب تولید کند، و به مراحل تصفیه نیاز دارد.

برای به‌دست‌آوردن مایعات یونی با آنیون‌های خاص (مثل BF_4^-، PF_6^-، NTf_2^-، یا آنیون‌های زیستی)، آنیون اولیه (معمولاً هالید، مانند Cl^- یا Br^-) با آنیون جدید از طریق یکی از روش‌های زیر تعویض می‌شود:

- تبادل یونی ساده (Metathesis Reaction): در این روش، IL حاوی هالید با نمک دیگری که آنیون دلخواه دارد، واکنش می‌دهد و معمولاً در حلال دوفازی (مثل آب و اتانول یا دی‌کلرومتان) انجام می‌شود. در روش تبادل آنیون اغلب از نمک‌های نقره استفاده می‌شود که می‌تواند گران، و برای محیط‌زیست خطرناک باشد. علاوه بر این، این مرحله می‌تواند زمان‌بر باشد، و ممکن است نیاز به استفاده از حلال‌هایی داشته باشد که از نظر محیطی بی‌خطر نیستند [۲۶].
- واکنش با اسیدهای قوی: برای تولید ILهای اسیدی یا حاوی آنیون‌هایی مثل HSO_4^- یا NTf_2^- از واکنش مستقیم با اسید استفاده می‌شود. این روش به‌دلیل حذف آسان محصول جانبی گازی (مثل HCl) بسیار مورد استفاده است.

به‌طورکلی، روش‌های سنتی برای سنتز مایعات یونی اغلب شامل واکنش‌های چندمرحله‌ای، دماهای بالا و زمان‌های واکنش طولانی می‌شوند. این روش‌ها اغلب بر حلال‌های آلی خطرناک متکی هستند، که منجر به نگرانی‌های زیست‌محیطی و نیاز به فرایندهای تصفیه گسترده می‌شود [۲۳].

۳-۲ استفاده از امواج ماکروویو به‌عنوان رویکردی زیست‌سازگار

سنتز به‌کمک ماکروویو به‌دلیل کارایی، سرعت و قابلیت آن برای کاربردهای شیمی سبز به‌عنوان رویکردی امیدوارکننده ظاهر شده است. سنتز به کمک ماکروویو به‌دلیل مزایای آن از نظر زمان واکنش، کارایی انرژی و بازده محصول، به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های معمولی محبوبیت پیدا کرده است. تابش ماکروویو گرمایش یکنواخت و سریع را فراهم می‌کند که می‌تواند زمان واکنش را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد و کارایی فرایند سنتز را بهبود بخشد [۲۷]. سازوکار این روش سنتز، انتقال مستقیم انرژی ماکروویو به واکنش‌دهنده‌ها از طریق گرمایش دی‌الکتریک است [۲۸]. مولکول‌ها و یون‌های قطبی در مخلوط واکنش با میدان ماکروویو برهم‌کنش می‌کنند که منجر به گرم‌شدن سریع می‌شود. این سازوکار گرمایش مستقیم، کارآمدتر از گرمایش معمولی است که بر هدایت حرارتی متکی است [۲۹]. مزایای سنتز مایعات یونی سبز به کمک ماکروویو به قرار زیر است:

- کاهش زمان واکنش: سنتز به کمک ماکروویو می‌تواند زمان واکنش را از ساعت به دقیقه کاهش دهد. به‌عنوان‌مثال، سنتز ۱-بوتیل-۳- متیل ایمیدازولیوم کلرید را می‌توان در چند دقیقه تحت تابش ماکروویو در مقایسه با ساعت‌ها با استفاده از گرمایش معمولی کامل کرد.
- بهره‌وری انرژی: ماکروویوها گرمایش سریع و یکنواختی را فراهم می‌کنند که منجر به مصرف انرژی کمتر و واکنش‌های کارآمدتر می‌شود.
- بهبود بازدهی واکنش: واکنش‌های انجام‌شده به‌کمک ماکروویو به‌دلیل گرمایش یکنواخت و کاهش تشکیل محصولات جانبی، اغلب منجر به بازده و خلوص بالاتر می‌شوند.
- گزینش‌پذیری: تابش ماکروویو گاهی اوقات می‌تواند گزینش‌پذیری واکنش‌ها را افزایش دهد و محصولات جانبی کمتری تولید کند و منجر به مایعات یونی خالص‌تر شود.
- مزایای زیست‌محیطی: استفاده از تابش ماکروویو می‌تواند نیاز به حلال‌ها و معرف‌های خطرناک را کاهش دهد و با اصول شیمی سبز همسو شود.
- هم‌سویی با شیمی سبز: سنتز به کمک ماکروویو اغلب محصولات جانبی کمتری تولید می‌کند و به مراحل تصفیه کمتری نیاز دارد. مصرف انرژی را به‌شدت کاهش می‌دهد. می‌توان از مواد اولیه تجدیدپذیر در سنتز این نوع مایعات یونی استفاده کرد و نیاز به حلال‌های سمی و خطرناک را به‌شدت کاهش می‌دهد.

مایعات یونی به‌دلیل قطبیت بالای خود توانایی بسیار خوبی در جذب امواج مایکروویو نشان می‌دهند که می‌توانند از بارش آسفالتین جلوگیری کنند. این امر نشان دهنده توانایی بالقوه سنتز مایعات یونی با امواج مایکروویو به‌عنوان روش سبز و کاربردی در زمینه ازدیاد برداشت نفت است.

۴ مروری بر مطالعات پیشین

۴-۱ سازوکارهای موثر مایعات یونی در ازدیاد برداشت نفت

مواد فعال سطحی سنتی، مانند سدیم‌دودسیل‌سولفات (SDS) یا ستیل‌تری‌متیل‌آمونیوم‌بروماید (CTAB)، در کاهش کشش بین‌سطحی و تغییر ترشوندگی موثر هستند، اما در شرایط سخت مخزن، مانند شوری بالا و درجه حرارت بالا، تخریب می‌شوند [۳۰]. این شرایط در مخازن عمیق دریایی، سازندهای کربناته و مخازن نامتعارف رایج است. علاوه بر این، هزینه بالای مواد فعال سطحی، همراه با سمیت زیست‌محیطی و چالش‌های دفع آن‌ها، جستجو برای جایگزین‌های قوی‌تر و پایدارتر را تحریک کرده است. مایعات یونی به‌دلیل توانایی آن‌ها در مقاومت در شرایط سخت، درحالی‌که ویژگی‌های قابل‌تنظیمی را ارائه می‌دهند که می‌توانند برای ویژگی‌های مخزن خاص تنظیم شوند، به‌عنوان گزینه‌ای امیدوارکننده ظاهر شده‌اند. برخلاف مواد فعال سطحی معمولی، مایعات یونی فراریت کم، پایداری حرارتی بالا و توانایی تشکیل میسل (Miscell) در غلظت‌های پایین را از خود نشان می‌دهند که آن‌ها را برای کاربردهای ازدیاد برداشت نفت، کارآمد می‌سازد [۳۱]. با این حال، چالش‌های متعددی از جمله امکان‌سنجی اقتصادی، هزینه‌های بالای تولید و جداسازی مایعات یونی، پایداری حرارتی و شیمیایی این مایعات در شرایط سخت زیرزمینی، عدم شناخت کامل از تعاملات میان مایعات یونی و ترکیبات نفتی می‌تواند به پیش‌بینی عملکرد آن‌ها در میدان‌های نفتی مختلف آسیب بزند. در نهایت، نگرانی‌های زیست‌محیطی مربوط به سمیت و تجزیه‌پذیری مایعات یونی نیز می‌تواند

مانع از پذیرش گسترده آن‌ها در صنعت نفت شود. مایعات یونی از کاتیون‌های آلی نامتقارن تشکیل شده‌اند، که با آنیون‌های آلی یا معدنی جفت شده‌اند و در نتیجه نمک‌هایی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد یا کمتر از آن به‌صورت مایع باقی می‌مانند. خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها بسیار قابل تنظیم است و به محققان این امکان را می‌دهد که مایعات یونی را برای کاربردهای خاص ازدیاد برداشت نفت طراحی کنند. ویژگی‌های کلیدی مربوط به عملیات ازدیاد برداشت نفت در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲ خواص کلیدی موثر مایعات یونی در عملیات ازدیاد برداشت نفت

Table 2 Key effective properties of ILs in EOR operation

Property	Description	Relevance to EOR
Tunability	Molecular structure can be tailored by varying cation-anion pairs, alkyl chain length, or functional groups.	Enables design of ILs optimized for specific reservoir conditions, such as high salinity or carbonate rocks.
Thermal stability	Stable at temperatures up to 80-150 °C, with some ILs stable above 200 °C.	Suitable for high-temperature reservoirs where conventional surfactants degrade.
Low Volatility	Negligible vapor pressure reduces environmental release and evaporation losses.	Enhances safety and minimizes environmental impact compared to volatile solvents.
Surface Activity	Exhibits surfactant-like behavior, forming micelles and reducing IFT at low concentrations.	Facilitates oil mobilization through IFT reduction and wettability alteration.
Solubility	Soluble in aqueous and organic phases, depending on anion-cation composition.	Ensures compatibility with diverse reservoir fluids, including brines and crude oils.
Electrochemical Stability	Resistant to electrochemical degradation in complex reservoir environments.	Maintains performance in reservoirs with varying redox conditions.
Low Melting Point	Liquid at or below room temperature, facilitating easy handling and injection.	Simplifies field operations and reduces energy requirements for injection.
High Boiling Point	Boiling points often exceed 300 °C, ensuring stability under reservoir conditions.	Prevents phase changes during injection, maintaining IL efficacy.

۲-۴ سازوکارهای موثر مایعات یونی در ازدیاد برداشت نفت

توانایی اصلاح مایعات یونی با انتخاب کاتیون‌های مختلف (مانند ایمیدازولیوم، آمونیوم، پیریدینیوم) و آنیون‌ها (به‌عنوان مثال، کلرید و تترافلوروبورات) امکان کنترل دقیق آب‌گریزی، حلالیت و فعالیت سطحی آن‌ها را فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال، افزایش طول زنجیره آلکیل مایعات یونی مبتنی بر ایمیدازولیوم، خواص مواد فعال سطحی آن‌ها را افزایش می‌دهد و کشش بین‌سطحی را به‌طور موثرتری کاهش می‌دهد [۳۶]. مایعات یونی یکپارچگی ساختاری را در دماهای بالا حفظ می‌کنند و برخی از فرمول‌بندی‌ها تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد یا بالاتر پایدار هستند. این برای مخازنی مانند مخازن ایران که دما اغلب از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد فراتر می‌رود بسیار مهم است. برخلاف حلال‌های آلی فرار، مایعات یونی دارای فشاربخار ناچیزی هستند که تلفات را در حین تزریق کاهش می‌دهد و آن‌ها را برای عملیات میدانی ایمن‌تر می‌کند. مایعات یونی رفتاری شبیه مواد فعال سطحی از خود نشان می‌دهند و میسل‌هایی را در غلظت‌های بحرانی میسل (CMC) تشکیل می‌دهند [۳۷]. این رفتار کشش بین‌سطحی بسیار پایین را امکان‌پذیر می‌کند که برای به‌حرکت‌درآوردن نفت باقی‌مانده ضروری است. مایعات یونی را می‌توان به‌گونه‌ای طراحی کرد که آب‌دوست یا آب‌گریز باشند و از سازگاری با نمک‌های آبی یا نفت‌های خام آلی اطمینان حاصل کنند [۳۸]. این تطبیق‌پذیری کاربرد آن‌ها را در انواع مخازن مختلف، از جمله سازندهای ماسه‌سنگی و کربناتی افزایش می‌دهد. این ویژگی‌ها در مجموع مایعات یونی را به‌عنوان جایگزینی قوی برای مواد فعال سطحی معمولی قرار می‌دهند که قادر به رفع محدودیت‌های ازدیاد برداشت نفت شیمیایی در محیط‌های چالش‌برانگیز هستند.

مایعات یونی بازیافت نفت را از طریق سازوکارهای متعدد افزایش می‌دهند که کاهش کشش بین‌سطحی و تغییرات ترشوندگی از اصلی‌ترین سازوکارها است [۳۹]. سازوکارهای دیگر، مانند امولسیون، و اصلاح گرانروی، بیشتر به کارایی آن‌ها کمک می‌کند. کاهش کشش بین‌سطحی، سنگ بنای ازدیاد برداشت نفت شیمیایی است [۴۰]، زیرا نیروهای مویینگی (Capillary forces) را که نفت را در منافذ مخزن به دام می‌اندازد، کاهش می‌دهد [۴۱]. مایعات یونی در سطح مشترک نفت و آب جذب می‌شوند و میسل‌هایی را تشکیل می‌دهند که کشش بین‌سطحی را به مقادیر بسیار کم کاهش می‌دهند [۴۲]. برخلاف مواد فعال سطحی سنتی، مایعات یونی این قابلیت را در شرایط شوری و دمای بالا حفظ می‌کنند. به‌عنوان مثال، تریفلات ۱-دسیل-۳-متیل ایمیدازولیوم به‌طور قابل‌توجهی کشش بین‌سطحی را کاهش می‌دهد و به ۳۲ درصد بازیافت نفت اضافی در مغزه‌های ماسه‌سنگی کمک می‌کند [۴۳]. غلظت بحرانی میسل مایعات یونی، به‌طور قابل‌توجهی کم است که نشان‌دهنده کارایی بالا در غلظت‌های حداقل است. سازوکار کاهش کشش بین‌سطحی شامل ایجاد تعادل بین مولکول‌های مایع یونی در سطح مشترک نفت-آب، با زنجیره‌های آلکیل آب‌گریز در تعامل با نفت و گروه‌های سر آب‌دوست در تعامل با آب است [۴۴]. این امر، انرژی مورد نیاز برای تغییر شکل قطرات نفت را کاهش می‌دهد و حرکت آن‌ها را از طریق محیط متخلخل تسهیل می‌کند [۴۵]. همچنین نشان داده شده است که کشش بین سطحی با افزایش غلظت مایع یونی و شوری کاهش می‌یابد، زیرا قدرت یونی بالاتر تشکیل میسل را افزایش می‌دهد [۴۶].

تغییر ترشوندگی شامل تغییر سطوح سنگ مخزن از نفت-دوست (oil-wet) (جایی که نفت به‌شدت به سنگ می‌چسبد) به آب-دوست (water-wet) (جایی که آب به‌راحتی نفت را جابه‌جا می‌کند) است [۴۷]. مایعات یونی با جذب روی سطوح سنگ، تغییر انرژی سطح و زاویه تماس آن‌ها به این امر دست می‌یابند. تغییر ترشوندگی به‌ویژه در مخازن کربناته که به‌دلیل ترکیب معدنی خود (به‌عنوان مثال کلسیت) به‌طور طبیعی نفت‌دوست هستند، حیاتی است. مایعات یونی خاصی مانند [C_{12}mim][Cl] می‌توانند ترشوندگی کربنات را تغییر دهند و آن‌ها را بیشتر به سمت آب‌دوستی ببرند. اگرچه تحقیقات در این زمینه در مقایسه با مطالعات ماسه‌سنگ محدود است. مایعات یونی می‌توانند عملکرد مواد فعال سطحی سنتی را با کاهش CMC و تثبیت میکروامولسیون‌ها افزایش دهند. به‌عنوان مثال، مایعات یونی مبتنی بر ایمیدازولیوم همراه با CTAB، کشش بین‌سطحی را بیشتر از هر یک از مواد شیمیایی به‌تنهایی کاهش می‌دهند [۴۸]. این اثر هم‌افزایی باعث کاهش غلظت مواد فعال سطحی، کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی می‌شود. مایعات یونی، امولسیون‌های نفت در آب را تثبیت می‌کنند که با کاهش گرانروی نفت و بهبود بازده جابه‌جایی، حرکت نفت را تسهیل می‌کند. این سازوکار کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است، اما در مخازن پیچیده با نفوذپذیری ناهمگن نویدبخش است. به‌عنوان مثال، [C_2mim][OTs] امولسیون‌های پایداری را در نمونه‌های ماسه‌سنگی تشکیل می‌دهد که به بازیابی حدود ۶۵ درصد نفت کمک می‌کند [۵۰].

برخی از مایعات یونی، گرانروی سیالات تزریقی مثل پلیمر را افزایش می‌دهند [۵۱] و این امر با کاهش پدیده انگشتی‌شدن (Fingering) و کانال‌کشی، کارایی جاروب را بهبود می‌بخشد [۵۲]. این به‌ویژه در مخازن با نفوذپذیری بالا، که جابه‌جایی یکنواخت چالش برانگیز است، موثر است. ترکیبات پلیمر و مایع یونی باعث افزایش گرانروی شده و منجر به جبهه جابه‌جایی پایدارتر می‌شود. در برخی موارد، مایعات یونی به‌صورت الکترواستاتیکی با سطوح سنگ باردار یا اجزای نفت برهم‌کنش می‌کنند و تغییرات ترشوندگی و جابه‌جایی نفت را بیشتر می‌کنند [۵۳]. این سازوکار کمتر رایج است اما در مخازن با محتوای خاک رس بالا مرتبط است. این سازوکارها مجموعاً مایعات یونی را قادر می‌سازد تا به جنبه‌های متعدد گیرافتادن نفت رسیدگی کرده و آن‌ها را برای استفاده در انواع شرایط مخزن متنوع می‌سازد. در تحقیقی که منشاد و همکاران با استفاده از چهار مایع یونی [C8Py][Cl] ،[C18Py][Cl]، [C_{12}mim][cl] و [C_{18}mim][Cl] انجام دادند، میزان کشش بین‌سطحی این مایعات یونی و آب یون‌زدوده و نفت خام برای مایعات یونی میزان ۲۷/۵۵ mN/m بوده است و مایع یونی، [C18py][cl] در مقایسه با سه مایع یونی دیگر بیشترین کاهش کشش بین‌سطحی را در غلظت ۷۰۰۰ ppm مایع یونی با مقدار ۱/۸۱ mN/m داشته است. در همین غلظت سه مایع یونی [C_8py][Cl] , [C_{12}mim][Cl] و [C_{18}mim][Cl] به‌ترتیب، ۱۹/۰۵، ۶/۳۳ و ۱/۲۰ mN/m کاهش کشش بین‌سطحی داشته‌اند[۵۴]. سمنانی و همکاران، عملکرد سه مایع یونی مبتنی بر ایمیدازولیوم همراه با آنیون‌نیترات را در ازدیاد برداشت نفت بررسی کردند. در این مطالعه سه مایع یونی [HMIM][NO_3] [BMIM][NO_3] و [OMIM][NO_3]) در دماهای ۳۰ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد در محیط آبی و نمکی (NaCl ۱۰٪) برای آزمون کشش بین‌سطحی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش طول زنجیره آلکیل کاتیون موجب بهبود عملکرد کشش بین‌سطحی می‌شود؛ به‌طوری که [OMIM][NO_3] بیشترین کاهش کشش بین‌سطحی را تا mN/m ۱۰ در محیط شور داشت[۵۵]. پیلای و همکاران سه مایع یونی بر پایه ایمیدازولیوم با زنجیره‌های آلکیلی متفاوت را [C8mim][BF_4]،[C12mim][BF_4] و [C10mim][BF_4] مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه نیز افزایش زنجیره آلکیلی موجب کاهش بیشتر کشش بین‌سطحی و کاهش زاویه تماس از نفت‌دوستی به آب‌دوستی شد. مایع یونی‌ای که زنجیره بلندتری دارد در غلظت بحرانی مسیل تغییر ترشوندگی را از ۱۱۵ درجه زاویه تماس به ۴ تا ۱۳ کاهش داد. همچنین در آزمون کشش بین‌سطحی، مایع یونی [C_{12}mim][BF_4]، بیشترین کاهش کشش بین‌سطحی را تا mN/m ۰/۰۴۱ داشت[۵۶]. احسانی و همکاران به بررسی تغییرات زاویه تماس چند مواد فعال سطحی و مایع یونی بر پایه ایمیدازولیوم پرداختند. این تحقیق در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از آب دریا، آب سازند، سه مواد فعال سطحی NX-2760،NX-1510، TR-880 و مایع یونی [C_{12}mim][Cl] انجام شد. نتایج نشان داد مواد فعال سطحی TR-880 بیشترین کاهش کشش بین‌سطحی و تغییر زاویه تماس سنگ به ۳۷ درجه یعنی تغییر خاصیت ترشوندگی سنگ از نفت‌دوست به آب‌دوست را نشان می‌دهد[۵۷].

۴-۳ سازوکارهای موثر مایعات یونی در ازدیاد برداشت نفت

در مطالعه‌ای که بر روی بررسی اثر ۹ نوع مایع یونی بر پایه آمونیوم و فسفونیوم برای افزایش تولید نفت انجام دادند، نتایج حاکی از آن بود که کشش بین‌سطحی در غلظت‌های بالای شوری با شدت بیشتری کاهش پیدا می‌کند [۵۸]. همچنین، در مطالعه‌ای به‌صورت شبیه‌سازی، اثر سیلاب‌زنی مایعات یونی با استفاده از نرم‌افزار CMG بررسی شده است. برای این منظور، مایع یونی (تتراآلکیل‌آمونیوم‌سولفات) با غلظت ppm ۲۵۰ با آب‌نمک مخلوط شده و به‌مدت یک ساعت هم‌زده شد. نتایج نشان داد که در حالت تزریق مداوم، بازیافت نفت تا ۷۰ درصد از نفت درجای مخزن (Original Oil in Place) افزایش یافت. در حالت تزریق ثالثیه، پس از سیلاب‌زنی با آب‌نمک، بازیافت اضافی ۵ تا ۶ درصدی گزارش شد. این مطالعه نشان‌دهنده قابلیت بالای مایعات یونی در شرایط شبیه‌سازی‌شده مخزن است [۵۹]. مطالعه‌ای که با مایع یونی ۱-اتیل-۳-متیل ایمیدازولیوم توزیلات ([C_2mim][OTs]) با خلوص ۹۹ درصد در آزمایش‌های ماسه‌سنگی انجام شد، نشان داد که با تزریق ۴ حجم منفذی (Pore Volume) از محلول ۲ درصد وزنی، بازیافت نفت به حدود ۳۶ درصد می‌رسد، که نشان‌دهنده افزایش قابل‌توجهی نسبت به سیلاب‌زنی با آب‌نمک بود. بنابراین، این مطالعه بر کارایی مایعات یونی حتی در مخازن ماسه‌سنگی نیز تأکید دارد. علاوه بر این، اثر مایعات یونی پایه ایمیدازولیوم شامل C_8mimBF_4، $C_{10}mimBF_4$ و $C_{12}mimBF_4$ نیز بررسی شده است. این مایعات یونی با کاهش کشش بین‌سطحی و تغییر ترشوندگی سنگ مخزن، قابلیت بازیافت نفت را تا ۳۲ درصد افزایش دادند. همچنین، نتایج حاکی از آن بود که با افزایش غلظت مایع یونی، کشش بین سطحی کاهش می‌یابد، که این سازوکار به بهبود جابه‌جایی نفت کمک قابل‌توجهی می‌کند [۷]. همچنین، مطالعه‌ای با تمرکز بر روی خواص جذب و تغییرات ترشوندگی مایعات یونی در سنگ‌های

کربناته انجام شده است. دلیل انجام این مطالعه بر روی سنگ‌های کربناته، حجم عظیم ذخایر نفت و گاز در مخازن کربناته و درجه ترشوندگی این مخازن نسبت به نفت است که باعث کاهش بازیافت نفت از این مخازن می‌شود. در این مطالعه، از دستگاه XRD برای کانی‌شناسی سنگ مخزن و آزمون SARA برای تعیین اجزای سنگین نفت (مانند آسفالتین و واکس) استفاده شد. سه نوع مایع یونی پایه ایمیدازولیوم سنتز شد که ترشوندگی را از نفت‌دوست به آب‌دوست تغییر دادند. در این مطالعه، بررسی جذب مایعات یونی بر روی سنگ‌های کربناته با استفاده از معادله لانگمویر تجزیه‌وتحلیل شده است [۶۰].

در مطالعه جالبی، اثر مواد فعال سطحی معمولی و مایعات یونی بر نفوذپذیری نسبی در سنگ‌های کربناته با هم مقایسه شده است. پنج نوع مایع یونی پایه ایمیدازولیوم و پیریدینیوم (شامل C_8mimCl، C_{12}mimCl، C_{18}mimCl، C_{12}pyCl و C_8pyCl) و مواد فعال سطحی SDBS بررسی شدند. نتایج نشان داد که مایعات یونی پایه ایمیدازولیوم در غلظت بالاتر کارایی بیشتری در کاهش کشش بین‌سطحی و افزایش نفوذپذیری نسبی نفت نسبت به خانواده پیریدینیوم دارند [۶۱]. علاوه بر این، گذردهی الکتریکی چندین مایع یونی (ایمیدازولیوم، فسفونیوم، آمونیوم و پیرولیدینیوم) در فرکانس‌هایی تا ۱۸ گیگاهرتز مطالعه شده است. نتایج این کار نشان داد که با افزایش وزن مولکولی، گذردهی الکتریکی کاهش می‌یابد. این اطلاعات می‌تواند در طراحی مایعات یونی برای کاربردهای خاص در ازدیاد برداشت نفت مفید باشد [۶۲]. در جدیدترین پژوهش، مایعات یونی را با حلال‌های یوتکتیک عمیق (Deep Eutectic Solvent) با هدف ازدیاد برداشت نفت مقایسه کرده‌اند. مایع یونی ۱-دودسیل-۳-متیل ایمیدازولیوم کلرید و حلال یوتکتیک عمیق بر روی نمونه‌های کربناته آزمایش شدند. هر دو ماده، به‌ویژه مایع یونی، بازیافت نفت را تا ۳۲ درصد افزایش دادند، اما مایع یونی در آب دریا به‌دلیل شوری بالاتر، کاهش بیشتری در کشش بین‌سطحی نشان داد. اندازه‌گیری زاویه تماس نیز نشان داد که مایعات یونی در تغییر ترشوندگی موثرتر هستند و بازیافت کلی تا ۶۳ درصد گزارش شد [۶۳]. درنهایت، در یکی از جدیدترین مطالعات، از سه نوع مایع یونی پایه ایمیدازولیوم (بوتیل-متیل ایمیدازولیوم نیترات، هگزیل-متیل ایمیدازولیوم نیترات و اکتیل-متیل ایمیدازولیوم نیترات) استفاده شده است، که نتایج نشان می‌دهد بهترین عملکرد مربوط به اکتیل-متیل ایمیدازولیوم نیترات (C_8mimNO_3) است که در میکرومدل، بازیافت نفت را تا ۸۰ درصد افزایش داد. این نتایج در دماهای ۳۰ و ۷۵ درجه سانتی‌گراد و شوری‌های مختلف تأیید شد که نشان‌دهنده قابلیت استفاده از مایعات یونی در شرایط سخت مخزن است [۶۴].

نجارباشی و همکاران در تحقیقی هیدروژل نانوکامپوزیتی مبتنی بر [C_8mim][NO_3] را در محیط متخلخل برای افزایش برداشت نفت بررسی کردند. در این آزمایش، هیدروژل نانوکامپوزیتی مبتنی بر مایع یونی میزان ضریب برداشت نفت تا ۸۵ درصد و هیدروژل نانوکامپوزیتی میزان ضریب برداشت نفت را تا ۷۱ درصد بهبود داد. در نتیجه هیدروژل نانوکامپوزیتی مبتنی بر [C_8mim][NO_3] میزان ۱۴ درصد بیشتر بازیابی نفت را نشان داد [۶۵]. سمنانی و همکاران اثربخشی سه مایع یونی [Omim][NO_3]، [Bmim][NO_3] و [Hmim][NO_3] را با محلول ۱۰ درصد وزنی نمک NaCl مورد بررسی قرار دادند که مایع یونی [Omim][NO_3] بهترین عملکرد را با بازیابی نفت تا ۸۰ درصد نشان داد[۶۶]. طبق تحقیقی که سکتیویل و همکاران انجام دادند، در زنجیره آلکیلی بلندتر، نیروی واندروالس و گروه آلکیل نفت خام از زنجیره‌های آلکیل کوتاه‌تر بهتر عمل می‌کند و کشش بین‌سطحی نفت خام و آب را بیشتر کاهش می‌دهد[۶۷]. منشاد و همکاران در پژوهشی دو مایع یونی [C_{18}mim][Cl] و [C_{18}Py][Cl] را برای سیلاب‌زنی مغزه کربناته بررسی کردند. طبق این پژوهش [C_{18}mim][Cl]، مایع یونی مبتنی بر ایمیدازولیوم، تأثیر بیشتری بر عملکرد بازیابی نفت داشت[۶۸]. ناندوانی و همکاران سه مایع یونی(مبتنی بر ایمیدازولیوم، پیریدینیوم و پیرولیدینیوم)، [C16mim][Br]، [C_{16}Py][Br] و [C_{16}MPr][Br] را با استفاده از آزمایش سیلاب‌زنی مغزه مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش میزان ضریب برداشت نفت برای مایعات یونی، [C_{16}mim][Br]، [C_{16}Py][Br] و [$C_{16}$$MP_r$][Br] ۳۹، ۴۷ و ۵۴ درصد بودند. از این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که مایع یونی بر پایه ایمیدازولیوم نتیجه بهتری نسبت به دیگر مایعات یونی دارد[۶۹].

۴-۴ تأثیر مایعات یونی بر جلوگیری از رسوب آسفالتین

کارایی مایعات یونی در ازدیاد برداشت نفت، به‌طور گسترده در تنظیمات آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است که با آزمایش‌های سیلاب‌زنی، اندازه‌گیری‌های کشش بین‌سطحی و آزمایش‌های ترشوندگی شواهد قوی از قابلیت آن‌ها ارائه می‌دهد. آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه، شرایط مخزن را با تزریق مایعات از طریق مغزه‌های سنگ برای اندازه‌گیری بازیافت نفت شبیه‌سازی می‌کنند. در تحقیقی، از مایعات یونی آب‌گریز بر پایه ایمیدازول و پایه پیریدینیوم مانند [Bmim]NTF_2، [Bmim]Br، [Bmim]BF_4 و [BPy]Cl] برای ممانعت از رسوب و تجمع آسفالتین در نفت خام استفاده شده است. نتایج نشان داد مایعات یونی با آنیون‌های آب‌گریز با نسبت ۲ به ۱ می‌تواند برای جلوگیری از رسوب آسفالتین مناسب باشد که البته با توجه به قیمت مایعات یونی به نظر می‌رسد این نسبت از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نباشد [۷۰]. در پژوهش دیگری از دو نوع مایع یونی متفاوت با طول زنجیره یونی مختلف و بلند برای جلوگیری از رسوب آسفالتین بر پایه ایمیدازولیوم استفاده شده است که نشان داد با توجه به پتانسیل زتا، باعث اثرگذاری بر روی پایداری آسفالیتن شده و افزایش غلظت مایعات یونی باعث کاهش میزان تجمع مولکول‌های آسفالتین می‌شود [۷۱].

مایعات یونی با زنجیره‌های بلند، عملکرد بهتری در جلوگیری از لخته‌شدن آسفالتین نسبت به مایعات یونی با زنجیره‌های کوتاه دارند، که این برتری ناشی از مجموعه‌ای از عوامل فیزیکی و شیمیایی مؤثر در برهم‌کنش با آسفالتین است. ساختار زنجیره بلند باعث افزایش بخش آلی در ترکیب مایعات یونی می‌شود که به‌نوبه‌خود موجب بهبود حلالیت آن‌ها در محیط‌های نفتی و تسهیل نفوذ به نواحی تجمع آسفالتین می‌شود [۷۲]. این زنجیره‌ها با فراهم‌کردن سطح تماس بیشتر، امکان ایجاد برهم‌کنش‌های واندروالسی قوی‌تری با مولکول‌های آسفالتین را فراهم می‌کنند که نتیجه آن پراکندگی مؤثرتر و جلوگیری از تجمع ذرات آسفالتینی است [۷۳]. افزون بر این، زنجیره‌های بلند به‌عنوان لنگرهای مولکولی عمل کرده و مولکول‌های آسفالتین را به شکل معلق در فاز مایع نگه می‌دارند و مانع از

ته‌نشینی و تشکیل رسوب می‌شوند [۱۱]. در مقابل، مایعات یونی با زنجیره‌های کوتاه به‌دلیل برهم‌کنش ضعیف‌تر و حلالیت کمتر در فازهای آلی، توانایی کافی برای پایداری‌بخشی به آسفالتین را ندارند [۵۳]. نتایج تجربی نیز این یافته‌ها را تأیید می‌کنند؛ به‌عنوان نمونه، استفاده از ترکیب [C_{12}-mim] Cl، که دارای زنجیره آلکیل ۱۲ کربنی است، باعث کاهش گرانروی نفت خام تا حدود ۵۰ درصد شده است که بیانگر پراکندگی مؤثر آسفالتین و پایداری بالاتر سامانه نفتی است [۷۵]. در کنار این، نشان داده شد که طول زنجیره آلکیل پارامتر مهم و تأثیرگذاری است که کمترین میزان کربن در زنجیره آن تعداد ۸ کربن است که می‌تواند باعث پایداری آسفالتین شود. علاوه بر این، مشخص شد که وجود اسید برای ثبات آسفالتین در ساختار مایع یونی ضروری است [۷۳].

وجود اسید در مایعات یونی می‌تواند نقش مؤثری در تثبیت آسفالتین ایفا کند، چرا که این ترکیبات با ساختارهای ویژه خود قادرند با اجزای مختلف آسفالتین تعامل داشته و از تجمع و رسوب آن‌ها جلوگیری کنند [۷۶و۷۷]. گروه‌های عاملی اسیدی موجود در ساختار مایعات یونی، به‌ویژه گروه‌هایی مانند کربوکسیلیک یا سولفونیک، می‌توانند با گروه‌های بازی موجود در مولکول‌های آسفالتین نظیر ترکیبات هتروسیکلیک نیتروژن‌دار، پیوندهای هیدروژنی مؤثر برقرار کرده و از طریق برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و دافعه، از نزدیکی و تجمع آن‌ها جلوگیری کنند [۷۸]. در کنار این، زنجیره‌های آلکیلی آب‌گریز در ساختار مایعات یونی نیز می‌توانند از طریق نیروهای واندروالسی با بخش‌های آروماتیکی آسفالتین برهم‌کنش داشته باشند، که این اثر دوگانه قطبی– غیرقطبی، به افزایش حلالیت و پایداری آسفالتین در محیط نفتی منجر می‌شود [۷۹]. بنابراین، حضور اسید در مایعات یونی با ایجاد تعادل بین برهم‌کنش‌های قطبی (پیوند هیدروژنی) و غیرقطبی (واندروالسی)، موجب پراکندگی بهتر آسفالتین و ممانعت از رسوب آن می‌شود [۸۰].

در مطالعه‌ای، دو نوع مایع یونی ۱بوتیل-۳متیل ایمیدازولیوم نیترات و ۱بوتیل-۳متیل ایمیدازولیوم‌کلرید به‌منظور بررسی اثر کاهش محتوای آسفالتین در نفت‌های سنگین به روش‌های معمول سنتز شدند، که نشان داد بالاترین میزان درصد پراکندگی آسفالتین مربوط به ۱بوتیل-۳متیل ایمیدازولیوم‌کلرید با ۷۸ درصد بود [۸۱]. همچنین، در مطالعه‌ای که با هدف بررسی تجزیه آسفالتین با استفاده از مایعات یونی شامل چندین کاتیون آلی مثل فسفونیوم، و ایمیدازولیوم همراه با انواع مختلف آنیون‌ها انجام شد، نشان داد که بیشترین مقدار بازیابی آسفالتین حدود ۸۰ درصد است، که مقدار قابل‌توجهی است. این امر، اهمیت توجه به مایعات یونی را بیشتر می‌کند [۸۲]. در تحقیقی از سه مایع یونی بر پایه ایمیدازولیوم استفاده شد. برای سنتز این مایعات یونی از آنیون $FeCl_4$استفاده شد. نتایج نشان داد که وقتی طول زنجیره ۴ کربن است، بالاترین عملکرد را دارند، که بیشترین مقدار جذب در سطح آسفالتین را دارد. آسفالتین‌ها دارای بار ذاتی مثبت یا منفی هستند که بستگی به ترکیب نفت خام دارد. رزین‌ها تمایل زیادی به پیوستن به آسفالتین‌ها به‌علت جذب بارهای مخالف دارند و لایه محافظی برای آسفالتین‌ها به وجود می‌آورند. هنگامی که این لایه‌ی محافظ رزین از بین برود، رسوب آسفالتین تشکیل می‌شود. ناپایداری نفت خام به‌شدت بستگی به موازنه‌ی نیروها بین رزین‌ها و آسفالتین‌ها دارد. پارامترهایی که در رسوب مواد آلی سنگین از نفت خام تأثیر دارند، عبارتند از: مشخصات ترکیبی نفت خام و سیال تزریق‌شده، فشار، دما، مشخصات جریانی و مشخصات کانال‌ها (لوله‌های انتقال، چاه‌ها و غیره) که سیال مخزن در آن جریان می‌یابد، و با تغییر این عوامل ماهیت رسوب‌های تشکیل‌شده تغییر خواهد کرد [۸۳].

۵ چالش‌ها و افق پیش‌رو

مایعات یونی به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود، مانند فشاربخار پایین، پایداری حرارتی و شیمیایی و قابلیت تنظیم خواص فیزیکی و شیمیایی، به‌عنوان گزینه‌هایی نویدبخش در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت مطرح شده‌اند. فرصت‌های بی‌شماری که مایعات یونی ارائه می‌دهند، از جمله کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهبود کارایی فرایندهای ازدیاد برداشت نفت، انگیزه‌ای قوی برای ادامه تحقیقات و توسعه فناوری‌های مرتبط فراهم می‌کند. در ادامه به بخشی از فرصت‌های بالقوه پیش روی استفاده از مایعات یونی در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت خام اشاره شده است:

۱. امکان طراحی ساختار اختصاصی برای هر مخزن: یکی از مزایای منحصربه‌فرد مایعات یونی، قابلیت «مهندسی مولکولی» آن‌هاست؛ یعنی انتخاب هدفمند کاتیون و آنیون به‌گونه‌ای که خواص فیزیکی و شیمیایی دقیقاً با شرایط مخزنی خاص (مثلاً نوع سنگ، شوری آب سازند، و ترکیب نفت خام) همخوانی داشته باشد.

۲. قابلیت عملکرد هم‌زمان در چند سازوکار ازدیاد برداشت نفت خام: برخلاف بسیاری از مواد شیمیایی سنتی که تنها در یک سازوکار فعال هستند، مایعات یونی می‌توانند هم‌زمان موجب کاهش کشش‌سطحی، تغییر ترشوندگی، مهار رسوب آسفالتین و بهبود تحرک‌پذیری نفت شوند.

۳. پایداری بالا در شرایط سخت مخزنی: بسیاری از مایعات یونی در برابر دمای بالا، فشار زیاد، شوری شدید و حضور ترکیبات فعال مانند سولفیدها و اسیدهای آلی مقاوم هستند؛ این موضوع کاربرد آن‌ها را در میادین نفتی قدیمی یا چالش‌برانگیز ممکن می‌سازد.

۴. سازگاری با فناوری‌های جدید: مایعات یونی به‌راحتی با فناوری‌هایی چون فناوری نانو، امواج مایکروویو و فراصوت و روش‌های هوشمند تزریق مرحله‌ای قابل‌ترکیب هستند و می‌توانند کارایی این فناوری‌ها را افزایش دهند.

بااین‌حال و باوجود مزایای متعدد کاربرد مایعات یونی در فرایندهای تولید نفت خام، استفاده از این مواد در مقیاس صنعتی با چالش‌های متعددی همراه است که نیازمند بررسی دقیق و یافتن راه‌حل‌های مناسب است. در ادامه به بخشی از این چالش‌ها که باید در مطالعات آتی موردتوجه محققان قرار گیرد اشاره شده است:

۱. هزینه بالای سنتز و آماده‌سازی: در مقایسه با مواد شیمیایی سنتی، بسیاری از مایعات یونی (خصوصاً انواع سنتزی با ساختارهای خاص) هزینه تولید بالایی دارند، که مانعی برای استفاده گسترده در مقیاس‌های صنعتی به‌شمار می‌رود.

۲. فقدان داده‌های میدانی و مطالعات بلندمدت: بیشتر مطالعات

مربوط به IL ها در سطح آزمایشگاهی یا نیمه‌صنعتی انجام شده است و اطلاعات دقیقی از رفتار آن‌ها در شرایط واقعی مخزن در دست نیست؛ این مسأله باعث تردید در بین صنایع برای سرمایه‌گذاری می‌شود.

۳. رفتار پیچیده در محیط متخلخل و چندفازی: دینامیک رفتار مایعات یونی در محیط متخلخل سنگ مخزن به علت برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی و بین‌مولکولی پیچیده است و نیاز به مدل‌سازی پیشرفته و داده‌های تجربی گسترده دارد.

۴. چالش‌های زیست‌محیطی در برخی ساختارها: برخی مایعات یونی (خصوصاً انواع سنتزی با آنیون‌های فلورینه مانند PF_6^- یا BF_4^-) دارای پتانسیل تجمع زیستی و سمیت بالا هستند که ممکن است نگرانی‌های زیست‌محیطی را در صورت نشت به منابع آبی یا خاکی ایجاد کنند.

نیاز به اصلاح دستورالعمل‌ها و استانداردها: نبود استانداردهای صنعتی و دستورالعمل‌های مشخص برای کاربرد ILها در حوزه ازدیاد برداشت نفت خام باعث کندی پذیرش صنعتی آن‌ها می‌شود و ایجاد چارچوب‌های قانونی و فنی ضروری است.

۵-۱ راهکارهای پیشنهادی برای غلبه بر چالش‌ها

یکی از مهم‌ترین موانع استفاده از مایعات یونی در زمینه ازدیاد برداشت نفت، هزینه بالای سنتز و تولید آن‌ها است. این مشکل می‌تواند با توسعه مسیرهای سنتز اقتصادی‌تر، استفاده از مواد اولیه ارزان‌تر و همچنین با بازیافت و استفاده مجدد از مایعات یونی پس از پایان فرایند ازدیاد برداشت، تا حد زیادی کاهش یابد [۸۴]. از سوی دیگر، برخی از مایعات یونی دارای گرانروی بالا هستند که این موضوع موجب کاهش تحرک در مخزن و در نهایت کاهش کارایی فرایند ازدیاد برداشت نفت می‌شود. برای حل این مشکل می‌توان از مخلوط مایعات یونی با گرانروی پایین، یا از حلال‌های کمکی استفاده کرد. همچنین به‌کارگیری مایعات یونی سطح‌فعال (SAILs) که توانایی بهبود خواص بین‌سطحی را دارند، راهکار مؤثری در این زمینه محسوب می‌شود [۸۵]. چالش دیگری که استفاده از مایعات یونی را محدود می‌کند، حلالیت پایین برخی از این ترکیبات در آب است. این ویژگی، استفاده از آن‌ها در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت مبتنی بر تزریق آب را دشوار می‌سازد. طراحی مایعات یونی با گروه‌های عاملی آب‌دوست یا استفاده از ترکیبات قابل اختلاط با آب می‌تواند این محدودیت را رفع کند. همچنین به‌کارگیری سامانه‌های دوفازی آبی امکان به‌کارگیری مایعات یونی در محیط‌های آبی را فراهم می‌سازد [۸۶]. نگرانی در مورد سمیت و تجزیه‌ناپذیری برخی از مایعات یونی نیز وجود دارد. این نگرانی را می‌توان با توسعه ساختارهای زیست‌تخریب‌پذیر و کم‌سمیت با بهره‌گیری از مواد اولیه طبیعی و تجدیدپذیر، در قالب طراحی مولکولی سبز، تا حد زیادی برطرف کرد.

از طرفی، برهم‌کنش مایعات یونی با سطح سنگ مخزن یکی دیگر از چالش‌هاست. این برهم‌کنش می‌تواند منجر به جذب ترکیبات بر سطح سنگ شده و کارایی آن‌ها در محیط مخزن را کاهش دهد. انتخاب ساختارهایی با تمایل کمتر به جذب سطحی یا استفاده از مواد افزودنی برای جلوگیری از این جذب، راهکاری کاربردی در این زمینه است. همچنین، شرایط سخت مخزن از جمله دما و فشار بالا ممکن است بر پایداری و عملکرد مایعات یونی اثر منفی بگذارد. طراحی ساختارهایی مقاوم به این شرایط یا استفاده از مایعات یونی در ترکیب با سایر روش‌های ازدیاد برداشت نفت مانند تزریق دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی یا بخار درجا، می‌تواند دوام و کارایی آن‌ها را در شرایط عملیاتی واقعی افزایش دهد [۸۷و۸۸]. در نهایت، برای دستیابی به عملکرد مطلوب در مقیاس مخزن، لازم است فرمول‌بندی مایعات یونی با توجه به ویژگی‌های خاص مخزن و نفت بهینه شود. همچنین بهره‌گیری از مدل‌سازی و شبیه‌سازی رفتار مایعات یونی در محیط متخلخل، می‌تواند در پیش‌بینی اثرگذاری آن‌ها و افزایش بهره‌وری فرایند ازدیاد برداشت بسیار مؤثر باشد.

با وجود چالش‌ها، روند پژوهش‌ها و توسعه فناوری‌ها نشان می‌دهد که مایعات یونی، به‌ویژه در قالب مایعات یونی طبیعی، زیست‌سازگار یا حلال-های یوتکتیک عمیق، نقش قابل‌توجهی در آینده فرایندهای ازدیاد برداشت ایفا خواهند کرد. مایعات یونی سبز را می‌توان برای مطابقت با شرایط مخزن خاص و ویژگی‌های نفت خام تنظیم کرد. این کار باعث می‌شود که بتوان از این مایعات در طیف وسیعی از مخازن استفاده کرد. همچنین سمیت کم و زیست‌تخریب‌پذیری این مایعات باعث شده که به‌عنوان سیالات دوستدار محیط‌زیست شناخته شوند. ترکیب این سامانه‌ها با فناوری‌هایی مانند نانوسیالات، تابش امواج و روش‌های تزریق هوشمند، افق‌های جدیدی در بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع نفتی باز می‌کند.

۶ نتیجه‌گیری

این مطالعه سعی دارد به‌طور نظام‌مند مروری بر آخرین مطالعات انجام‌شده در زمینه کاربرد مایعات یونی در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت انجام دهد. از این رو، مبانی و سازوکار اثر مایعات یونی، تأثیر آن‌ها بر سازوکارهای مختلف تولید نفت خام از مخازن مانند کاهش کشش سطحی، تغییر ترشوندگی، جلوگیری از رسوب آسفالتین و ... بررسی شد. در نهایت چالش‌ها و افق پیش روی این حلال‌ها برای کاربرد گسترده در صنعت نفت و فرایندهای برداشت نفت خام از مخازن ذکر شد. مطالعات مختلف انجام‌شده در این حوزه نشان داده است که:

- مایعات یونی دارای ویژگی‌هایی مختلفی همچون پایداری حرارتی و شیمیایی بالا و قابلیت انحلال ترکیبات آلی و غیرآلی هستند که می‌تواند در فرایندهای ازدیاد برداشت نفت موثر باشند.
- این ترکیبات می‌توانند جایگزین مناسبی برای مواد فعال سطحی سنتی در فرایندهای افزایش برداشت نفت باشند. این حلال‌های یونی قابلیت عمل به‌عنوان ماده کمکی فعال سطحی را دارند و عملکرد مواد فعال سطحی معمولی را بهبود می‌دهند.
- مایعات یونی توانایی کاهش کشش بین‌سطحی آب و نفت حتی در شرایط با دمای بالا و شوری زیاد را دارند. نمونه‌هایی مانند ۱-دسیل-۳-متیل‌ایمیدازولیوم تریفلات عملکرد قابل‌توجهی در کاهش کشش بین‌سطحی داشته‌اند.
- مایعات یونی با جذب روی سطوح سنگ مخزن و تغییر انرژی سطح آن می‌توانند زاویه تماس قطرات نفت خام را کاهش دهند

و باعث تغییر ترشوندگی سنگ مخزن از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست شوند.

- برخی از این مایعات تا ۳۰ درصد از نفت اولیه درجا را پس از فرایندهای ثانویه بازیابی کرده‌اند؛ در برخی موارد، این رقم به ۶۲ درصد نیز رسیده است.
- وجود اسید در مایعات یونی می‌تواند نقش مؤثری در تثبیت آسفالتین ایفا کند، چرا که این ترکیبات با ساختارهای ویژه خود قادرند با اجزای مختلف آسفالتین تعامل داشته و از تجمع و رسوب آن‌ها جلوگیری کنند.
- تمرکز بیشتر مطالعات روی مخازن ماسه‌سنگی بوده و تحقیقات کمتری روی مخازن کربناته انجام شده است.
- ترکیب مایعات یونی با پلیمرهایی مانند پلی‌آکریل‌آمید می‌تواند از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر باشد.
- مطالعات شبیه‌سازی، به‌ویژه مدل‌سازی جریان درون مغزه نفتی، نقش مهمی در ارزیابی کارایی این ترکیبات در شرایط واقعی ایفا کرده‌اند.

مایعات یونی دارای ویژگی‌های مناسبی هستند که می‌تواند باعث بهبود سازوکارهای برداشت نفت در مخازن نفتی شود. باوجود نتایج مثبت در فاز آزمایشگاهی، استفاده گسترده از این مواد در فاز عملیاتی و در مقیاس مخزن همچنان با چالش‌های مختلفی از قبیل قیمت بالا، عملکرد نامناسب در شرایط سخت مخازن مانند دما، فشار و شوری بالا، تولید برخی ترکیبات مضر مانند HF و HCl توسط برخی آنیون‌ها و ... روبه‌رو است که باید در مطالعات آینده مورد بررسی دقیق قرار گیرد.

قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره «۴۰۳۷۰۰۱» انجام شده است.

مراجع

[1] Gharibshahi, R., Asadzadeh, N. and Jafari, A., Toward understanding the effect of electromagnetic radiation on in situ heavy oil upgrading and recovery: background and advancements, *In Innovations in Enhanced and Improved Oil Recovery-New Advances, IntechOpen,* 2023.

[2] Zarei Ghobadlou, M., Ahmadlouydarab, M. and Asadzadeh, N., Effect of Temperature on Enhanced Oil Recovery from a Two-Dimensional Porous Medium when Injecting Polyacrylamide Polymer Solution, *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(130), 118-128, 2023.

[3] Gharibshahi, R., Jafari, A. and Asadzadeh, N., Influence of different nanoparticles on the gas injection performance in EOR operation: Parametric and CFD simulation study, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 102(2), 965-978, 2024.

[4] Ghalamizade Elyaderani, S. M. and Jafari, A., Investigation of interactions between silica nanoparticle, alkaline, and polymer in micromodel flooding for enhanced oil recovery, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 15519-15536, 2024.

[5] Oliveira, P. F., Costa, J. A., Oliveira, L. F. S., Mota, L. S., de Oliveira, L. A. and Mansur, C. R., Hydrolysis and thermal stability of partially hydrolyzed polyacrylamide in high-salinity environments, *Journal of applied polymer science*, 136(29), 47793, 2019.

[6] Shabani, M. H., Jafari, A., Manteghian, M. and Mousavi, S. M., Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Enterobacter cloacae microorganism and their application in enhanced oil recovery, *Scientific Reports*, 14(1), 29409, 2024.

[7] Pillai, P., Kumar, A. and Mandal, A., Mechanistic studies of enhanced oil recovery by imidazolium-based ionic liquids as novel surfactants, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 63, 262-274, 2018.

[8] Yu, G., Dai, C., Liu, N., Xu, R., Wang, N. and Chen, B., Hydrocarbon extraction with ionic liquids, *Chemical Reviews*, 124(6), 3331-3391, 2024.

[9] Atta, A. M., Ezzat, A. O., Abdullah, M. M., & Hashem, A. I. (2017). Effect of different families of hydrophobic anions of imadazolium ionic liquids on asphaltene dispersants in heavy crude oil. Energy & Fuels, 31(8), 8045-8053.

[10] EL-Hefnawy, M. E., Atta, A. M., El-Newehy, M., & Ismail, A. I. (2020). Synthesis and characterization of imidazolium asphaltenes poly (ionic liquid) and application in asphaltene aggregation inhibition of heavy crude oil. *Journal of Materials Research and Technology*, *9*(6), 14682-14694.

[11] Xiang, C., Zhu, Y., Liu, G., Liu, T., Xu, X., & Yang, J. (2024). Experimental and Simulation Studies of Imidazolium Chloride Ionic Liquids with Different Alkyl Chain Lengths for Viscosity Reductions in Heavy Crude Oil: The Effect on Asphaltene Dispersion. Molecules, 29(5), 1184.

[12] Ramírez-Pérez, J. F., Hernández-Altamirano, R., Martínez-Magadán, J. M., Cartas-Rosado, R., Soto-Castruita, E., Cisneros-Dévora, R., ... & Zamudio-Rivera, L. S. (2017). Synthesis of branched geminal zwitterionic liquids as wettability modifiers in enhanced oil recovery processes. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 45, 44-55.

[13] Ezzat, A. O., Atta, A. M., Al-Lohedan, H. A., & Aldalbahi, A. (2020). New amphiphilic pyridinium ionic liquids for demulsification of water Arabic heavy crude oil emulsions. Journal of Molecular Liquids, 312, 113407.

[14] Sakthivel, S., Imidazolium based ionic liquids for enhanced oil recovery on the carbonate reservoir, *Journal of Molecular Liquids*, 366, 120284, 2022.

[15] Rostamzadeh, A., Mousavi Parsa, S. A. and Faramarzi, M., Efficiency of ionic liquid/polymer flooding combined with smart water injection on oil recovery through secondary and tertiary patterns using Iranian carbonate rock, *Petroleum Science and Technology*, 41(10), 1081-1098, 2023.

[16] Ghanem, A., Nessim, M. I., Khalil, N. A. and El-Nagar, R. A., Imidazolium-based ionic liquids as dispersants to improve the stability of asphaltene in Egyptian heavy crude oil, *Scientific Reports*, 13(1), 17158, 2023.

[17] Flieger, J. and Flieger, M., Ionic liquids toxicity—benefits and threats, *International Journal of Molecular Sciences*, 21(17), 6267, 2020.

[18] Brzęczek-Szafran, A., Gaida, B., Blacha-Grzechnik, A., Matuszek, K. and Chrobok, A., Bioderived ionic liquids and salts with various cyano anions as precursors for doped carbon materials, *International Journal of Molecular Sciences*, 22(19), 10426, 2021.

[19] Vekariya, R. L., A review of ionic liquids: Applications towards catalytic organic transformations, *Journal of Molecular Liquids*, 227, 44-60, 2017.

[20] Subramanian, D., Wu, K. and Firoozabadi, A., Ionic liquids as viscosity modifiers for heavy and extra-heavy crude oils, *Fuel*, 143, 519-526, 2015.

[21] Bera, A. and Belhaj, H., Ionic liquids as alternatives of surfactants in enhanced oil recovery—A state-of-the-art review, Journal of Molecular Liquids, 224, 177-188, 2016.

[22] de Jesus, S. S. and Maciel Filho, R., Are ionic liquids eco-friendly?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112039, 2022.

formulate environmentally friendly organized systems, Polymers, 13(9), 1378, 2021.

[39] Nandwani, S. K., Malek, N. I., Lad, V. N., Chakraborty, M. and Gupta, S., Study on interfacial properties of Imidazolium ionic liquids as surfactant and their application in enhanced oil recovery, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 516, 383-393, 2017.

[40] Omidvar, M., Shabani, M., Asadzadeh, N., Jafari, A., Fakhroueian, Z. and Biniaz-Delijani, E., Efficiency of salinity-responsive ZnO/PEG nanocomposite on the immiscible fluid-fluid displacement and interface behavior in different formations, *Journal of Molecular Liquids*, 428, 127462, 2025.

[41] Mehrooz, N., Gharibshahi, R., Jafari, A., Shadan, B., Delavari, H. and Sadeghnejad, S., Assessment of heavy oil recovery mechanisms using in-situ synthesized CeO_2 nanoparticles, *Scientific Reports*, 14(1), 11652, 2024.

[42] Hezave, A. Z., Dorostkar, S., Ayatollahi, S., Nabipour, M. and Hemmateenejad, B., Investigating the effect of ionic liquid (1-dodecyl-3-methylimidazolium chloride ([C_{12}mim][Cl])) on the water/oil interfacial tension as a novel surfactant, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 421, 63-71, 2013.

[43] Somoza, A., Arce, A. and Soto, A., Oil recovery tests with ionic liquids: A review and evaluation of 1-decyl-3-methylimidazolium triflate, Petroleum Science, 19(4), 1877-1887, 2022.

[44] Ma, Q., Zhu, W., Song, Z., Zhang, J., Li, B., Bu, W. and Pan, B., Influences and mechanisms of imidazolium-based ionic liquids on oil–water interfacial tension and quartz wettability: Experiment and molecular dynamics simulations, *Fuel*, 352, 129053, 2023.

[45] Ahmadlouydarab, M., Asadzadeh, N. and Mohammadzadeh Abachi, K., Effects of the Wettability Gradient of the Flow Structure Inside a Sessile Droplet Carrying a Hydrophobic Microparticle on Solid Substrate, *Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran*, 41(4), 269-285, 2023.

[46] Khosravani, M., Akhlaghi, N. and Hosseini, S., Investigation of ionic liquid adsorption and interfacial tension reduction using different crude oils; effects of salts, ionic liquid, and pH, *Scientific Reports*, 14(1), 10720, 2024.

[47] Tohidi, Z., Teimouri, A., Jafari, A., Gharibshahi, R. and Omidkhah, M. R., Application of Janus nanoparticles in enhanced oil recovery processes: Current status and future opportunities, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109602, 2022.

[48] Javadian, S., Ruhi, V., Asadzadeh Shahir, A., Heydari, A. and Akbari, J., Imidazolium-based ionic liquids as modulators of physicochemical properties and nanostructures of CTAB in aqueous solution: the effect of alkyl chain length, hydrogen bonding capacity, and anion type, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(45), 15838-15846, 2013.

[50] Mansour, E. M., Hosny, R., Mohamed, A. S. and Abdelhafiz, F. M., Synthesis and evaluation of amino acid ionic liquid for enhanced oil recovery: experimental and modeling simulation studies, *Scientific Reports*, 15(1), 2201, 2025.

[51] Lu, J., Yan, F. and Texter, J., Advanced applications of ionic liquids in polymer science, *Progress in Polymer Science*, 34(5), 431-448, 2009.

[52] Dastjani-Farahani, R., Jafari, A., Vafaie-Sefti, M., Asadzadeh, N. and Baghban-Salehi, M., Rheological properties evaluation of hydrogels based on xanthan polymer in the presence of nanoparticles, *Journal of Applied Research of Chemical-Polymer Engineering*, 7(3), 67-76, 2023.

[53] Sakthivel, S., Wettability alteration of carbonate reservoirs using imidazolium-based ionic liquids, *ACS omega*, 6(45), 30315-30326, 2021.

[54] Manshad AK, Rezaei M, Moradi S, Nowrouzi I, Mohammadi

[23] Singh, S. K. and Savoy, A. W., Ionic liquids synthesis and applications: An overview, *Journal of Molecular Liquids*, 297, 112038, 2020.

[24] Alqahtani, A. S., Indisputable roles of different ionic liquids, deep eutectic solvents and nanomaterials in green chemistry for sustainable organic synthesis, *Journal of Molecular Liquids*, 124469, 2024.

[25] Gadilohar, B. L. and Shankarling, G. S., Choline based ionic liquids and their applications in organic transformation, *Journal of Molecular Liquids*, 227, 234-261, 2017.

[26] Tao, G. H., He, L., Liu, W. S., Xu, L., Xiong, W., Wang, T. and Kou, Y., Preparation, characterization and application of amino acid-based green ionic liquids, Green Chemistry, 8(7), 639-646, 2006.

[27] Madgula, K., Dandu, S., Kasula, S. and Halady, P., Microwave synthesized ionic liquids as green catalysts for the synthesis of benzimidazoles: Spectral and computational studies for potential anticancer activity, *Inorganic Chemistry Communications*, 138, 109218, 2022.

[28] Gharibshahi, R., Omidkhah, M., Jafari, A. and Fakhroueian, Z., Hybridization of superparamagnetic Fe_3O_4 nanoparticles with MWCNTs and effect of surface modification on electromagnetic heating process efficiency: A microfluidics enhanced oil recovery study, *Fuel*, 282, 118603, 2020.

[29] Guimaraes, M., Mateus, N., de Freitas, V., Branco, L. C. and Cruz, L., Microwave-assisted synthesis and ionic liquids: Green and sustainable alternatives toward enzymatic lipophilization of anthocyanin monoglucosides, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(28), 7387-7392, 2020.

[30] Shabani, M. H., Jafari, A., Mousavi, S. M. and Abdi-Khanghah, M., Comparison of produced biosurfactants performance in in-situ and ex-situ MEOR: micromodel study, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 15286-15296, 2024.

[31] Jungnickel, C., Łuczak, J., Ranke, J., Fernández, J. F., Müller, A. and Thöming, J., Micelle formation of imidazolium ionic liquids in aqueous solution, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 316(1-3), 278-284, 2008.

[32] Seader, J.D.; Henley, E.J. Separation Process Principles, John Wiley & Sons:
New York (USA), 1998.

[33] Turosung, S. N., & Ghosh, B. (2017). Application of ionic liquids in the upstream oil industry-a review. Int. J. Petrochem. Res, 1(1), 50-60.

[34] Hezave AZ, Dorostkar S, Ayatollahi S, Nabipour M, Hemmateenejad B. Investigating the effect of ionic liquid (1-dodecyl-3-methylimidazolium chloride ([C12MIM][Cl])) on the water/oil interfacial tension as a novel surfactant. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2013; 421: 63-71.

[35] Lago S, Rodríguez H, Khoshkbarchi MK, Soto A, Arce A. Enhanced oil recovery using the ionic liquid trihexyl (tetradecyl) phosphonium chloride: phase behaviour and properties. RSC Advances. 2012; 2(25): 9392-397.

[36] Barari, M., Ramezani, M., Lashkarbolooki, M. and Abedini, R., Influence of alkyl chain length of imidazolium-based ionic liquid on the crude oil-aqueous solution IFT under different ionic strengths, *Fluid Phase Equilibria*, 556, 113404, 2022.

[37] Chabba, S., Kumar, S., Aswal, V. K., Kang, T. S. and Mahajan, R. K., Interfacial and aggregation behavior of aqueous mixtures of imidazolium based surface active ionic liquids and anionic surfactant sodium dodecylbenzenesulfonate, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 472, 9-20, 2015.

[38] Dib, N., Lépori, C. M., Correa, N. M., Silber, J. J., Falcone, R. D. and García-Río, L., Biocompatible solvents and ionic liquid-based surfactants as sustainable components to

AH. Wettability alteration and interfacial tension (IFT) reduction in enhanced oil recovery (EOR) process by ionic liquid flooding. Journal of Molecular Liquids. 2017;248:153–62.

[55] Guimaraes, M., Mateus, N., de Freitas, V., Branco, L. C. and Cruz, L., Microwave-assisted synthesis and ionic liquids: Green and sustainable alternatives toward enzymatic lipophilization of anthocyanin monoglucosides, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(28), 7387-7392, 2020.

[56] Pillai P, Kumar A, Mandal A. Mechanistic studies of enhanced oil recovery by imidazolium-based ionic liquids as novel surfactants. Journal of industrial and engineering chemistry. 2018;63:262–74.

[57] Ahsaei Z, Nabipour M, Azdarpour A, Santos RM, Mohammadian E, Babakhani P, et al. Application of commercial zwitterionic surfactants and ionic liquids to reduce interfacial tension and alter wettability in a carbonate reservoir. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2022;44(2):2811–22

[58] Bin-Dahbag, M. S., Al Quraishi, A. A., Benzagouta, M. S., Kinawy, M. M., Al Nashef, I. M. and Al Mushaegeh, E., Experimental study of use of ionic liquids in enhanced oil recovery, *J Pet Environ Biotechnol*, 4(165), 1-7, 2014.

[59] Sanati, A., Malayeri, M. R., Busse, O., & Weigand, J. J. (2022). Utilization of ionic liquids and deep eutectic solvents in oil operations: Progress and challenges. Journal of Molecular Liquids, 361, 119641.

[60] Bera, A., Agarwal, J., Shah, M., Shah, S. and Vij, R. K., Recent advances in ionic liquids as alternative to surfactants/chemicals for application in upstream oil industry, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 82, 17-30, 2020.

[61] Zabihi, S., Faraji, D., Rahnama, Y., Zeinolabedini Hezave, A. and Ayatollahi, S., Relative permeability measurement in carbonate rocks, the effects of conventional surfactants vs. Ionic liquid-based surfactants, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 41(12), 1797-1811, 2020.

[62] Bennett, E. L., Song, C., Huang, Y. and Xiao, J., Measured relative complex permittivities for multiple series of ionic liquids, *Journal of Molecular Liquids*, 294, 111571, 2019.

[63] Sanati, A., Rahmani, S., Nikoo, A. H., Malayeri, M. R., Busse, O. and Weigand, J. J., Comparative study of an acidic deep eutectic solvent and an ionic liquid as chemical agents for enhanced oil recovery, *Journal of Molecular Liquids*, 329, 115527, 2021.

[64] Semnani, R. H., Salehi, M. B., Mokhtarani, B., Sharifi, A., Mirzaei, M. and Taghikhani, V., Evaluation of the interfacial activity of imidazolium-based ionic liquids and their application in enhanced oil recovery process, *Journal of Molecular Liquids*, 362, 119735, 2022.

[65] Najarbashi, N., Salehi, M. B., Saghandali, F., Mokhtarani, B., Mirzaei, M., & Sharifi, A. (2024). Evaluation of the synergistic effect of nanocomposite hydrogel based on imidazolium nitrate ionic liquids for enhanced oil recovery. Fuel, 377, 132811.

[66] Song, F., Zhou, J., Jia, Z., He, L., Sui, H., & Li, X. (2023). Interfacial behaviors of ionic liquids in petroleum Production: A review. Journal of Molecular Liquids, 382, 121864.

[67] S. Sakthivel, S. Velusamy, V. Nair, T. Sharma, J. Sangwai, Interfacial tension of crude oil-water system with imidazolium and lactam-based ionic liquids and their evaluation for enhanced oil recovery under high saline environment, Fuel 191, 250-239(2017)

[68] M. Abdullah, A. AlQuraishi, A. Atta, Synthesis of novel water soluble poly (ionic liquids) based on quaternary ammonium acrylamidomethyl propane sulfonate for enhanced oil recovery, J. Mol. Liq. 233 (2017) 508–516

[69] S. Nandwani, N. Malek, M. Chakraborty, S. Gupta, A comprehensive study based on the application of different genre of surface-active ionic liquid and alkalicombination systems in surfactant flooding, Energy Fuels 34(8,9425-9411(2020) [105]

[70] Rashid, Z., Wilfredand, C. D. and Murugesan, T., Effect of hydrophobic ionic liquids on petroleum asphaltene dispersion and determination using UV-visible spectroscopy, *In AIP Conference Proceedings (Vol. 1891, No. 1). AIP Publishing*, 2017.

[71] Banda-Cruz, E. E., Lara-Hernández, A. R., Gallardo-Rivas, N. V., Páramo-García, U. and Martínez-Orozco, R. D., Effect of imidazolium-based ionic liquids on the asphaltenes average size in crude oil and water-in-oil emulsions, *Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, 78(594), 219-226, 2021.

[72] Jia, Z., Niu, Z., Yang, Z., Li, X., Wang, J., He, X., Sui, H. and He, L. Interfacial Behaviors of Ionic Liquid Cations and Asphaltenes at Oil–Water Interface: Dynamic Diffusion and Interfacially Competitive Adsorption, *Energy & Fuels*, 34(2), 1259-1267, 2020.

[73] Boukherissa, M., Mutelet, F., Modarressi, A., Dicko, A., Dafri, D. and Rogalski, M. Ionic liquids as dispersants of petroleum asphaltenes, *Energy & Fuels*, 23(5), 2557-2564, 2009.

[74] Pitkänen, O., Vucetic, N., Cabaud, H., Bozo, E., Järvinen, T., Mikkola, J. P., & Kordas, K. (2024). Evaluation of short alkyl chain modified [DBU][TFSI] based ionic liquids as supercapacitor electrolytes. Electrochimica Acta, 475, 143659.

[75] Singh, U. K., Kumari, M., Khan, S. H., Bohidar, H. B., & Patel, R. (2018). Mechanism and dynamics of long-term stability of cytochrome c conferred by long-chain imidazolium ionic liquids at low concentration. ACS sustainable chemistry & engineering, 6(1), 803-815.

[76] Zhao, H., Fan, T., Zhou, J., Liu, X., Li, Y., Zhao, G., ... & Zeng, M. (2021). Investigation on chemical structure and hydrocarbon generation potential of lignite in the different pretreatment process. Fuel, 291, 120205.

[77] Lv, Y., Wu, S., Li, N., Liu, Q., Yang, C., Zou, Y., & Amirkhanian, S. (2024). Flue gas suppression and environmental evaluation of deodorizer-modified rubber asphalt based on radar method. Construction and Building Materials, 411, 134526.

[78] Sanati, A., Malayeri, M. R., Busse, O., & Weigand, J. J. (2021). Inhibition of asphaltene precipitation using hydrophobic deep eutectic solvents and ionic liquid. Journal of Molecular Liquids, 334, 116100.

[79] Ismail, A. I., Atta, A. M., El-Newehy, M., & El-Hefnawy, M. E. (2020). Synthesis and application of new amphiphilic asphaltene ionic liquid polymers to demulsify Arabic heavy petroleum crude oil emulsions. Polymers, 12(6), 1273.

[80] Zhang, Z., Kang, N., Zhou, J., Li, X., He, L., & Sui, H. (2019). Novel synthesis of choline-based amino acid ionic liquids and their applications for separating asphalt from carbonate rocks. Nanomaterials, 9(4), 504.

[81] Md. Saaid, I., Mahat, S. Q. A., Lal, B., Mutalib, M. I. A. and M. Sabil, K., Experimental investigation on the effectiveness of 1-butyl-3-methylimidazolium perchlorate ionic liquid as a reducing agent for heavy oil upgrading, Industrial & Engineering Chemistry Research, 53(19), 8279-8284, 2014.

[82] Zheng, C., Brunner, M., Li, H., Zhang, D. and Atkin, R., Dissolution and suspension of asphaltenes with ionic liquids, *Fuel*, 238, 129-138, 2019.

[83] El-Hoshoudy, A. N., Ghanem, A. and Desouky, S. M., Imidazolium-based ionic liquids for asphaltene dispersion; experimental and computational studies, *Journal of Molecular Liquids*, 324, 114698, 2021.

[84] Inman, G., Nlebedim, I. C., & Prodius, D. (2022). Application of ionic liquids for the recycling and recovery of

technologically critical and valuable metals. Energies, 15(2), 628.

[85] Ansari, N. H. (2024). Recent advances in surface active ionic liquids (SAILs): A Review. Jabirian Journal of Biointerface Research in Pharmaceutics and Applied Chemistry, 1(3), 21-25.

[86] Zhang, X. H., Li, S. Y., Li, M. X., Liu, R. J., Nie, J. F., & Tang, K. (2025). Aqueous Two-Phase Systems as a Robust Platform for Green Extraction of Bioactives in Plant-Based Products. Separation & Purification Reviews, 1-21.

[87] Al-Nakhli, A., Al-Jeshi, H., Alade, O., Mahmoud, M., & Buhaezah, W. (2021, December). Improve Oil Production From Tar-Impacted Reservoirs Using In-Situ Steam Generation and Ionic Liquids. In SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference (p. D041S050R002). SPE.

[88] Zhou, D., Yu, W., Sun, J., Qi, J., & Yin, J. (2025). Advances and applications of supercritical carbon dioxide microemulsions with or without ionic liquids. The Journal of Supercritical Fluids, 106603.