

نفت شیل: فناوری‌های استخراج، پالایش و محدودیت‌ها

رضا بابانژاد^۱، لیلا وفاجو^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

۲- دانشیار مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۰۹

پیام‌نگار: vafajoo@azad.ac.ir

چکیده

محدودیت منابع سوخته‌های متداول فسیلی باعث شده که توجه پژوهشگران به استفاده از نفت و گاز شیل جلب شود. البته، استفاده از این منابع وقتی از نظر اقتصادی توجیه پذیر خواهد بود که قیمت نفت خام از بشکه‌ای ۶۰ دلار بیشتر باشد. در این تحقیق، مخازن نفت شیل در جهان، ظرفیت هر منطقه، کشورهای پیشرو در زمینه استفاده از نفت شیل و روشهای استخراج و پالایش آن بررسی شده است. محدودیت‌ها و مزیت‌های بهره‌گیری از هر روش با در نظر گرفتن آثار زیست محیطی ارزیابی شده و سرانجام جایگاه استفاده از این منبع نامتداول سوخت فسیلی در دنیای فناوری امروزی مشخص شده است.

کلیدواژه‌ها: نفت شیل، کروژن، منابع نفت شیل، استخراج، فناوری‌ها، محدودیت‌ها، امکانات.

۱. مقدمه

قطعاتی با لبه‌های تیز می‌شکنند. این سنگ، در گستره وسیعی از رنگ‌ها مانند: قرمز، قهوه‌ای، سبز، خاکستری و سیاه یافت می‌شود [۱ و ۲]. برخی از شیل‌ها خواص ویژه‌ای دارند که آن را به منابعی مهم تبدیل می‌کند. شیل‌های سیاه حاوی موادی آلی‌اند که گاهی به واسطه تجزیه شدن، تبدیل به نفت یا گاز طبیعی می‌شوند. سایر شیل‌ها را می‌توان خرد و با آب ترکیب کرد و به عنوان ماده اولیه در ساخت مصالح ساختمانی چون آجر، سرامیک، سیمان و ساخت به کار برد [۲].

نفت شیل لفظی کلی برای دسته‌ای از سنگ‌هاست که به قدر کافی مواد آلی غنی شده در آن‌ها وجود داشته باشد. نفت شیل نه سنگ است و نه نفت، بلکه خاک آهک داری شامل ترکیباتی از قبیل کروژن است. تفاوت شیل و زغال سنگ در نسبت هیدروژن به کربن

نیاز روزافزون به انرژی، جوامع را به سوی تولید انرژی از منابع مختلف هدایت کرده است. یکی از این منابع "نفت شیل" است. شیل سنگی رسوبی ریز دانه است که از فشردگی سیلت^۱ و ذرات کانیایی به اندازه رس تشکیل شده است. وجود چنین ترکیباتی شیل‌ها را در ردیف سنگ‌های رسوبی که "گلسنگ"^۲ نامیده می‌شود، جای داده است که به واسطه "لایه لایه"^۳ و "متورق بودن"^۴ از گلسنگ‌ها تمیز داده می‌شوند. شیل به صورت

* تهران، دانشکده مهندسی شیمی و پلیمر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

1. Silt
2. Mudstone

۳. سنگ از لایه‌های باریک بسیاری شکل گرفته است.

۴. سنگ به آسانی به شکل قطعاتی در امتداد ورقه‌ها جدا می‌گردد.

خوبی شناخته شده نیست ولی به نظر می‌رسد که مخلوطی از جلبک‌های تجزیه شده و یا باقیمانده‌هایی از جنس باکتری باشند [۴].

۲. محدودیت‌های اقتصادی استفاده از نفت شیل

هیدروکربن‌های نامتعارف، نمایندگان آینده تأمین سوخت‌های فسیلی هستند [۵]. بحث کاربرد یا عدم کاربرد نفت شیل با قیمت نفت خام متداول رابطه تنگاتنگی برقرار است. اگر قیمت هر بشکه نفت خام کمتر از ۴۰ دلار آمریکا باشد، قیمت نفت حاصل از نفت شیل قابل مقایسه با نفت خام متداول نیست. اگر قیمت هر بشکه نفت بیش از ۶۰ دلار باشد، آنگاه شرکت‌های نفتی شروع به بهره‌برداری از نفت شیل خواهند کرد، زیرا به طور کلی هزینه استخراج، انتقال و پالایش نفت شیل، دست کم ۴۰٪ درآمد حاصل از آن است [۲].

۳. منابع نفت شیل در جهان

مجموع ذخایر نفت شیل در دنیا ۴۱۱ گیگا تن، معادل ۲/۸ تا ۳/۳ تریلیون بشکه، برآورد شده است که البته همه آن قابل بازیافت نیست [۳]. این رقم از کل ذخایر اثبات شده نفت متعارف دنیا که در اواخر سال ۲۰۱۳ حدود ۱/۳۹ تریلیون بشکه اعلام شده است، فراتر است. توزیع نفت شیل در قاره‌های مختلف را در شکل (۱) مشاهده می‌کنید. گرچه در مناطقی از لرستان و کرمان وجود منابعی از نفت شیل گزارش شده است، اما متأسفانه آمار دقیقی از میزان و نوع نفت شیل در ایران وجود ندارد.

۴. کشورهای بهره‌بردار منابع نفت شیل

در ایالات متحده بیش از یک دهه پیش در ایالت "بارنت"^۸ آمریکا، گاز از منابع شیل تولید شد. این کشور در سال ۲۰۱۳ بیش از ۴۰ هزار بشکه گاز شیل تولید داشته است که در حال حاضر برداشت از منابع گازی شیل به ۲۰ ایالت گسترش یافته است [۱]، برزیل در حال حاضر مقدار کمی نفت شیل تولید می‌کند. تولید آن در سال ۱۹۹۹ حدود ۲۰۰ هزار تن بوده است. بیشترین منابع نفت شیل برآورد شده در کانادا، در شمال شرق ایالت بریتیش کلمبیاست، که

است. وقتی این ماده تا دماهای بالا حرارت داده می‌شود، ماده نفت ماندنی به دست می‌آید که می‌توان از آن بهره گرفت. نفت شیل بین دوره‌های کامبرین^۱ و ترشیاری^۲ در قسمت‌های مختلف زمین به صورت نامنظمی پراکنده شده است. تحقیق‌های صورت گرفته بر روی نفت شیل روش‌های استخراج سودمند، استفاده از گازهای قابل احتراق یا استفاده از نفت شیل به عنوان سوخت را شامل می‌شوند [۲].

شیل‌های سیاه، سنگ منبع بسیاری از مهم‌ترین نهشته‌های نفت و گاز جهان به‌شمار می‌آیند. رنگ سیاه این شیل‌ها، از ذرات بسیار ریز مواد آلی انباشته شده با گل و لای که شیل از آن تشکیل می‌شود، حاصل شده است. هنگامی که این گل و لای درون زمین دفن و گرم شد، برخی از این مواد آلی به نفت و گاز طبیعی تبدیل شده‌اند. نفت و گاز به دلیل چگالی پایین خود به خارج از شیل و به بالای توده رسوبی مهاجرت کرده‌اند و در فضاها متخلخل موجود در واحد سنگی فوقانی، مانند ماسه سنگ به دام افتاده‌اند؛ این دسته از نهشته‌های نفت و گاز را "مخازن متعارف"^۴ می‌شناسند [۲].

نفت شیل، نفت نامتعارفی است که از گرماکافت، هیدروژن‌دار کردن و انحلال گرمایی خرده‌های سنگ نفت‌زا به دست می‌آید. از نفت حاصل می‌توان بلافاصله به عنوان سوخت استفاده کرد و یا با افزودن هیدروژن و زدودن ناخالصی‌های گوگرددار و نیتروژن‌دار، کیفیت آن را ارتقا بخشید تا به عنوان ماده اولیه وارد پالایشگاه شود. محصولات پالایش شده می‌توانند همان مصارفی را داشته باشند که محصولات پالایش شده نفت خام به مصرف می‌رسند [۲]. از هر تن شیل نفتی مرغوب حدود ۱۳۰ لیتر نفت به دست می‌آید که بسته به نوع سنگ آن متغیر است [۳]. ماده آلی در نفت شیل، شامل باقی مانده جلبک‌ها، اسپورها^۵، گرده‌ها، پوست گیاهان و اجزای چوب پنبه‌ای گیاهی و گیاهان چوبی^۶ و دیگر باقیمانده‌های سلولی گیاهان دریایی، خشکی و دریاچه‌ای است. این مواد عموماً از کربن، هیدروژن، نیتروژن و گوگرد تشکیل شده‌اند. در برخی نفت‌های شیل، ماده آلی بی ساختار است و قیرسنگ^۷ گفته می‌شود. ریشه این مواد آمورف به

1. Comberian
2. Tertiary

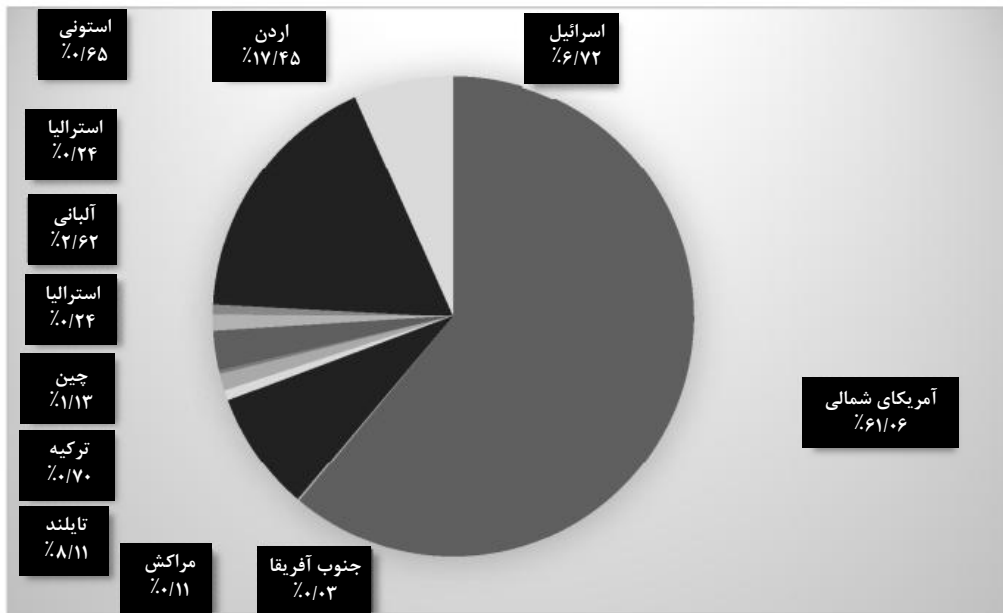
۳. هر نوع ماده موجود در زمین سست یا سخت که بر اثر فرایند یا عاملی طبیعی انباشته شده باشد.

4. Conventional Reservoirs
5. Spore

۶. گیاهانی که در هوای آزاد رشد می‌کنند، نظیر درختان و درختچه‌ها

7. Bituminite

8. Barnett



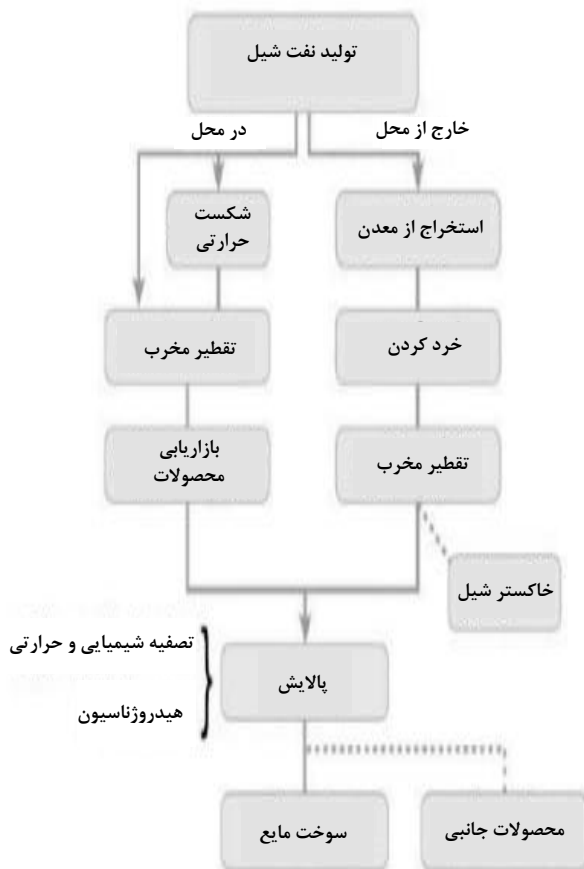
شکل ۱. توزیع منابع نفت شیل در جهان.

در سال ۲۰۱۱ در حدود ۸۵ میلیون متر مکعب در سال تولید داشته است [۶]. در قاره آسیا، چین در حال حاضر ۶۰ هزار تن در سال نفت شیل تولید می‌کند. استرالیا بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۳ معادل ۷۰۰ هزار بشکه نفت تولید کرده است. این کشور طرحی برای تولید ۴۵۰۰ بشکه نفت شیل را در سال در دست اجرا دارد [۱]. استونی حدود ۸۰٪ از نفت شیل تولید شده را برای تولید برق نیروگاه‌های حرارتی مصرف می‌کند. این کشور تا سال ۲۰۰۸ معادل ۸۷۶ میلیون تن نفت شیل استخراج کرده است [۱].

۵. فناوری‌های تولید نفت شیل

قدیمی‌ترین و رایج‌ترین روش تولید نفت شیل، پیرولیز حرارتی است که تقطیر مخرب^۱ نیز نام دارد. در این فرایند نفت شیل در غیاب اکسیژن حرارت داده می‌شود تا کروژن آن به بخارات نفت شیل قابل تراکم و گاز شیل غیر قابل تراکم و احتراق پذیر، تجزیه شود. سپس بخارات نفت و گاز شیل جمع‌آوری و پس از چگالش، نفت شیل تولید می‌شود [۷]. با این وجود فرایندهای استخراج نفت شیل را می‌توان به دو دسته فرایندهای در محل و خارج از محل تقسیم‌بندی کرد. در شکل (۲) این روش‌ها را به طور اجمالی مشاهده می‌کنید.

1. Retorting



شکل ۲. روش‌های تولید نفت شیل [۷].

۵-۱ فناوری‌های تولید خارج از محل

روش‌های به کار رفته برای اجرای این فرایند شامل احتراق داخلی، استفاده از جامدات بازیافتی داغ، هدایت حرارتی از دیواره اتاق تخریب (تقطیر مخرب)، استفاده از گاز داغ تولید شده در خارج از محل، استفاده از مایعات واکنشی و گازسازی پلاسمایی است که آنها را تشریح خواهیم کرد.

۵-۱-۱ احتراق داخلی

در فناوری احتراق داخلی، مواد (عمدتاً زغال و گازهای شیل) در یک اتاق تخریب عمودی سوزانده می‌شوند، تا گرمای لازم برای پیرولیز مهیا شود. معمولاً ذرات نفت شیل خام در اندازه حدود ۱۲ تا ۷۵ میلی‌متر از بالای برج احتراق وارد می‌شوند و با گازهای داغ که از میان نفت شیل نزولی عبور می‌کنند گرم می‌شوند؛ این عمل باعث تجزیه کروژن در دمایی حدود ۵۰۰ درجه سلسیوس می‌شود. بخار نفت شیل، گازهای حاصل از احتراق و گازهای سرد احتراقی از بالای برج ابتدا تفکیک و سپس کروژن تجزیه شده به یک دستگاه جدا سازی منتقل می‌شود. نفت شیل چگالیده جمع‌آوری می‌شود، در حالی که گاز غیر قابل میعان، بازیافت می‌شود و برای بالا بردن حرارت اتاق تخریب به مصرف می‌رسد. به بخش پایین‌تر اتاق تخریب، هوای داغ تزریق می‌شود که روغن شیل و گازهای عبوری را تا ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس گرم می‌کند. گاز سرد بازیافت شده نیز ممکن است از پائین اتاق تخریب وارد شود تا خاکستر شیل را خنک کند [۷].

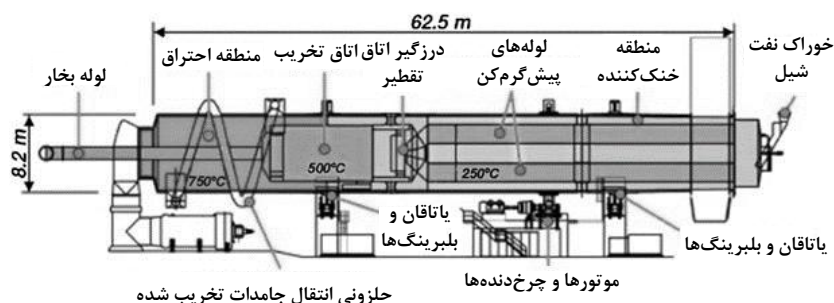
در فرایندهای Superior Direct و The Union A از این الگو پیروی می‌شود. در فرایند Union نفت شیل از پایین اتاق تخریب وارد می‌شود و با کمک تلمبه‌زنی به سمت بالا حرکت می‌کند. اما در فرایند Superior Direct نفت شیل در اتاق تخریب افقی حرکت

می‌کند و پردازش می‌شود. حرارت به دست آمده از خاکستر شیل و گازهای موجود می‌تواند تمام نیازهای حرارتی اتاق تخریب را فراهم آورد. بازده این فرایند ۸۰٪ تا ۹۰٪ فرایند فیشر^۱ است [۷].

۵-۱-۲ استفاده از جامدات بازیافتی داغ^۲

در این فناوری، ذرات جامد داغ (به‌ویژه خاکستر نفت شیل) گرما را به نفت شیل منتقل می‌کنند. معمولاً کوره چرخشی و یا اتاق‌های تخریب بستر سیال به کار گرفته می‌شوند که ذرات ریز نفت شیل، به طور کلی با قطر کمتر از ۱۰ میلی‌متر، آنها را تغذیه می‌کنند (شکل ۳). ذرات بازیافتی در یک محفظه و یا لوله‌های مجزا تا حدود ۸۰۰ درجه سلسیوس گرم و پس از آن با نفت شیل خام مخلوط می‌شوند که در این حالت شیل در دمای حدود ۵۰۰ سلسیوس تجزیه می‌شود. بخار نفت و گاز شیل از مواد جامد جدا و پس از چگالش، نفت آن جمع‌آوری می‌شود. حرارت به دست آمده از گازهای حاصل از احتراق شیل ممکن است برای پیش گرم کردن نفت شیل خام قبل از مخلوط شدن با مواد جامد بازیافتی به کار گرفته شود. در فرایند استخراج Tosco II در آمریکا از کره‌های سرامیکی به جای خاکستر شیل به عنوان مواد جامد داغ بهره می‌گیرند. در فرایند «آلبرتا تاسیک^۳» تمامی مراحل در یک لوله افقی چرخشی چند اتاقه رخ می‌دهد.

در این فرایند، از آنجا که مواد جامد بازگشتی در یک کوره جداگانه گرم می‌شود، گاز شیل حاصل از این فناوری با گاز خروجی از محفظه احتراق رقیق نمی‌شود. مزیت دیگر آن از این قرار است که هیچ محدودیتی در اندازه ذراتی که اتاق تخریب می‌تواند پردازش کند، وجود ندارد. در نتیجه، تمام خوراک خرد شده با هر اندازه ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. از معایب این روش می‌توان به مصرف زیاد آب به منظور بازیافت ذرات ریز خاکستر شیل اشاره کرد [۷].



شکل ۳. فرایند تقطیر مخرب آلبرتا [۷].

1. Fischer

2. Hot Recycled Solids

3. ATP: Alberta Taciuk Processor

۳-۱-۵ هدایت حرارتی از دیواره اتاق تخریب

در این فناوری، انتقال حرارت به نفت شیل از طریق هدایت آن از میان دیواره اتاق تخریب، انجام می‌شود. خوراک شیل معمولاً از ذرات ریز تشکیل شده است. مزیت این روش از این قرار است که بخارات اتاق تخریب با گازهای خروجی حاصل از احتراق ترکیب نمی‌شوند [۷]. فرایند منابع احتراق از یک کوره دوار با سوخت هیدروژن بهره می‌گیرد که در آن گاز داغ از یک حلقه بیرونی بازگشت داده می‌شود. فرایند Oil-Tech دارای گرمکن‌های الکتریکی در اتاق تخریب است، که از اتاق‌های مستقل گرمایش سودی‌جو در که از درون به هم متصل و بر روی هم قرار گرفته‌اند. مزیت اصلی این روش طراحی مدولار^۱ آن است که به افزایش قابلیت حمل و سازگاری آن نیز می‌شود. فرایند Red Leaf EcoShale Incapsule Resources ترکیبی از استخراج سطحی از معدن با گرمادهی در دمای پایین، مانند فرایند درجا است. گاز داغ از میان لوله‌های موازی نفت شیل عبور و آن را گرم می‌کند.

۴-۱-۵ استفاده از گاز داغ تولید شده در خارج از محل

به طور کلی، فناوری تولید گاز داغ در خارج از محل، مشابه فناوری‌های احتراق داخلی است که در آن نیز توده نفت شیل در کوره عمودی پردازش می‌شود. حرارت مورد نیاز در این فناوری توسط گازهای داغ خارج از لوله اتاق تخریب تأمین می‌شود؛ در نتیجه، بخار اتاق تخریب با گازهای حاصل از احتراق رقیق نمی‌شود. این فناوری علاوه بر این که ذرات ریز را به عنوان خوراک نمی‌پذیرد، از گرمای بالقوه احتراق در شیل عبوری استفاده نمی‌کند؛ در نتیجه، مصرف سوخت بیشتری دارد. با این حال به دلیل عدم احتراق شیل عبوری، دمای نفت شیل از ۵۰۰ درجه سلسیوس تجاوز نمی‌کند و CO₂ کمتری تولید می‌شود. از مزیت‌های این روش می‌توان به کنترل آسان تر و ثبات بیشتر محصولات نسبت به احتراق داخلی و یا فناوری بهره‌گیری از جامدات داغ باز یافتی اشاره کرد [۷].

۵-۱-۵ بهره‌گیری از سیالات واکنشی

اتصال کروژن به شیل بسیار محکم است و در بسیاری از حلال‌ها حل نمی‌شود. با وجود این محدودیت، استخراج کروژن با استفاده از بسیاری از مایعات واکنش‌دهنده به خصوص در ناحیه فوق بحرانی

امتحان شده است. این فناوری برای تولید نفت شیل با محتوای کم هیدروژن مناسب است. در این فناوری‌ها گاز هیدروژن (H₂) و یا مولدهای هیدروژن^۲ با پیش‌سازهای کک^۳ واکنش می‌دهند. فناوری سیالات واکنشی شامل فرایند IGT Hytort (H₂ پرفشار)، فرایندهای اهداکننده حلال و راکتور بستر سیال چاتانوگا^۴ هستند. در IGT Hytort نفت شیل در یک محیط با هیدروژن پرفشار تولید می‌شود. فرایند چاتانوگا از یک راکتور بستر سیال و یک گرم‌کن با سوخت هیدروژن برای کراکینگ حرارتی^۵ نفت شیل و هیدروژن‌دار کردن آن استفاده می‌کند. نتایج تجربی نشان می‌دهند که این فناوری در مقایسه با فرایندهای پیرولیز، مقدار نفت شیل بیشتری تولید می‌کند [۷].

۶-۱-۵ گازسازی پلاسمایی

چندین تحقیق تجربی برای گازسازی نفت شیل با استفاده از فناوری‌های پلازما اجرا شده است. در این فناوری‌ها، نفت شیل با رادیکال (یون‌ها) بمباران می‌شود. حاصل این بمباران رادیکالی، تبدیل مولکولهای کروژن به نفت و گاز سنتز است. هوا، هیدروژن و یا نیتروژن به عنوان گاز پلازما به کار می‌روند و فرایندها به کمک یک قوس الکتریکی، قوس پلاسمایی و یا الکترولیز پلاسمایی اجرا می‌شوند. مزیت اصلی این فناوری، عدم مصرف آب است [۷].

۲-۵ فناوری‌های در محل (درجا)

در فناوری‌های درجا، با تزریق مایعات داغ به داخل سازند و یا با بهره‌گیری از منابع گرمای مستقیم، نفت شیل در زیر زمین گرم و سپس از طریق چاه‌های عمودی حفر شده باز یافت می‌شود. این فناوری از توانایی استخراج نفت شیل بیشتری از یک منطقه نسبت به فناوری‌های خارج از محل برخوردار است؛ زیرا امکان بازیابی نفت شیل در عمق بیش‌تر را (که فناوری‌های استخراج سنتی قادر به دستیابی به آن‌ها نیستند) فراهم می‌آورد [۷]. روش‌های به کار رفته برای فناوری‌های درجا شامل انتقال گرما از طریق دیواره، تزریق گاز داغ تولید شده در خارج از محل، فناوری اکسون موبیل، گرمادهی منطقه‌ای، تزریق گاز، روش‌های شیمیایی، روش‌های میکروبی،

۲. موادی که در طول واکنش هیدروژن تولید می‌کنند: Hydrogen donors

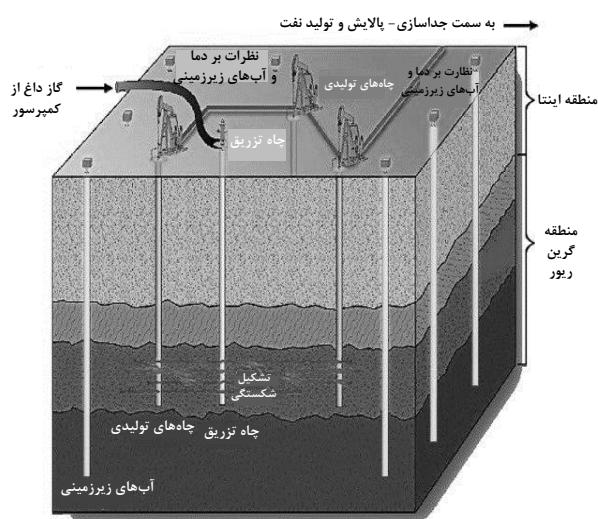
۳. ساختارهای شیمیایی موجود در نفت شیل که پتانسیل تولید کک دارند.

4 Chattanooga

5 Cracking Thermal

1. Modular

لس آلاموس^۴ تدوین کرده، CO₂ داغ از طریق چاه به محل تشکیل نفت شیل تزریق می‌شود و برای گرم کردن منطقه موردنظر از یک دسته شکاف افقی که در آن گاز در گردش است بهره می‌گیرند. شرکت بین‌المللی سین فیروز^۵ فرایند دیگری را ابداع کرده است که در آن هوای داغ به داخل منطقه تشکیل شیل نفت تزریق می‌شود. همچنین، شرکت مانیتین وست انرژی^۶ با استفاده از اصل مشابهی از تزریق گاز طبیعی داغ به منظور استخراج نفت شیل استفاده می‌کند [۷].



شکل ۵. فرایند کراش [۷].

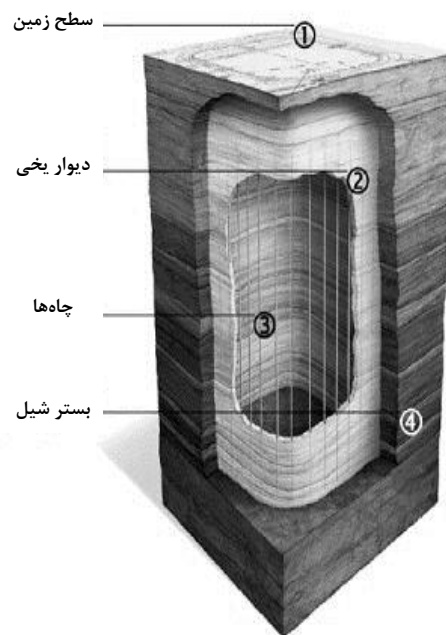
۳-۲-۵ فناوری اکسون موبیل^۷

در این فناوری (شکل ۶) با استفاده از المان‌های الکتریکی در دیواره و داخل مخزن، نفت شیل گرم می‌شود. چاه‌های حرارتی در یک ردیف موازی قرار می‌گیرند که یک چاه افقی آن‌ها را در انتهایشان قطع می‌کند. این کار به آن‌ها اجازه می‌دهد تا بارهای الکتریکی مخالف در انتهای دیگر اعمال شوند. در این فناوری از یک ماده رسانای الکتریکی چون کک نفتی تکلیس شده به منظور تزریق به سازند نفتی استفاده می‌شود [۷].

تزریق بسیار و استفاده از سیالات فوق بحرانی نظیر CO₂ و تولوئن است که شرح آنها خواهد آمد.

۱-۲-۵ انتقال گرما از طریق دیواره چاه

در این روش، از المان‌های حرارتی یا لوله‌های گرمایی در محل تشکیل نفت شیل بهره برده می‌شود. در فرایند درجای شرکت شل^۱ از المان‌های حرارتی الکتریکی به منظور حرارت دادن به لایه نفت ۳۷۰ استفاده ۳۴۰°C تا ۳۰۰°C شیل طی یک دوره چهار ساله در دمای شده است (شکل ۴). برای جلوگیری از هدر رفت گرما، دیواره چاه از لایه‌هایی پر شده از سیال فوق سرد^۲، از محیط اطراف عایق‌بندی شده است. از معایب عمده این روش، مصرف برق بسیار زیاد، مصرف بیش از حد آب و امکان آلوده شدن آب‌های زیرزمینی است [۷].



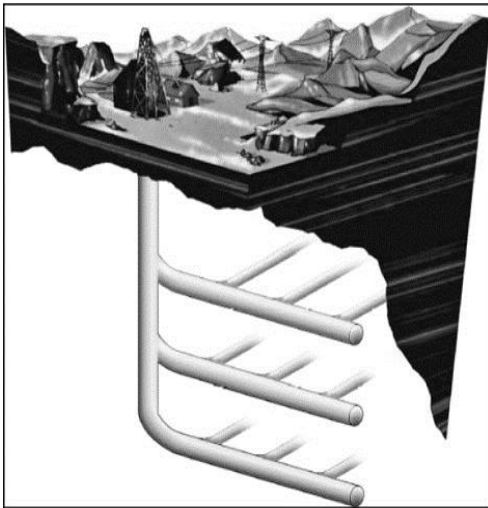
شکل ۴. فرایند تبدیل درجا شرکت shell [۷].

۲-۲-۵ تزریق گازهای داغ تولید شده در خارج از محل

در این فناوری از گازهای داغ تولیدی در سطح زمین و تزریق آن‌ها به منطقه تشکیل نفت شیل بهره می‌گیرند. در فرایند شورون کراش^۳ کراش^۳ (شکل ۵) که شرکت شورون با همکاری آزمایشگاه ملی

4. Los Alamos National Laboratory
5. General Synfuels International
6. Mountain West Energy's
7. ExxonMobil Electrofrac

1 Shell
2 Super-chilled
3. Chevron CRUSH



شکل ۷. گرمادهی منطقه ای به کمک امواج رادیویی [۷].

برداشت نفت در مخازن نفت متعارف بررسی شده است [۹]. اساس کار تزریق به روش دمش و مکش از این قرار است که گاز تولید شده از یک چاه در دوره مکش، در دوره موسوم به دمش به همان چاه تزریق و این روند تکرار می‌شود که آن را چرخه تزریق گاز می‌نامند [۹].

۵-۲-۶ روش‌های شیمیایی

در میان روش‌های شیمیایی، استفاده از مواد فعال سطحی (سورفکتانت^۵) بیش‌ترین امکان بالقوه را برای افزایش بازیافت نفت دارند. بدیهی است که مواد فعال سطحی می‌توانند ترشوندگی^۶ را تغییر و میزان جذب آب را افزایش دهند. تحقیقات انجام شده در زمینه سنگ‌های نفت شیل نشان می‌دهد که آنها تمایل به ترشوندگی توسط نفت دارند. شرایط ترشوندگی نفت، فاز آبی را به منظور نفوذ به داخل ماتریس و جارو کردن نفت به چاه‌های تولیدی با مشکل مواجه می‌کند. سازوکار عملکرد مواد فعال سطحی تغییرترشوندگی سنگ از نفت دوست به آبدوست است [۹].

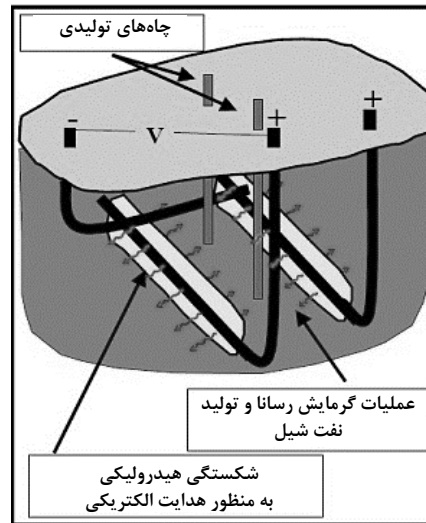
۵-۲-۷ روش‌های میکروبی

در روش افزایش بازیافت نفت به روش میکروبی^۷ دو مؤلفه اساسی

5. Surfactant

۶. توانایی یک مایع در برقراری تماس با سطح جامد است و نشأت گرفته از نیروهای بین مولکولی می‌باشد.

7. Microbial Enhanced Oil Recovery



شکل ۶. فناوری اکسون موبیل [۸].

۵-۲-۴ گرمادهی منطقه‌ای به کمک امواج رادیویی

مؤسسه فناوری ایلینویز^۱ روش دیگری را با استفاده از امواج رادیویی برای حرارت‌دهی به سازندهای نفت شیل در اواخر ۱۹۷۰ ارائه کرد (شکل ۷). این فناوری را آزمایشگاه ملی لارنس لیورمور^۲ ابداع و عملی کرد. نفت شیل را یک دسته الکتروود عمودی گرم می‌کنند. در این روش از یک بسامد رادیویی با طول موج چند ده متر استفاده می‌شود تا بر مقاومت نفوذ گرمایی موجود غلبه شود. از معایب این روش می‌توان به مصرف زیاد برق و احتمال جذب حرارت اضافی توسط کک تولیدی یا آب‌های زیرزمینی اشاره کرد. فناوری‌های گرمایشی ناشی از امواج میکروویو بر اساس همان اصول فرایندهای امواج رادیویی استوارند، اما اعتقاد بر این است که فناوری امواج رادیویی از گرمایش میکروویو بهتر است، زیرا انرژی آنها می‌تواند تا عمق مخزن نفت شیل نفوذ کند. شرکت الکتروپترولیوم^۳ روشی پیشنهاد کرده است که در آن با عبور جریان مستقیم الکتریکی بین کاتد تعبیه شده در چاه تولیدی و آند تعبیه شده در سطح یا در عمق چاه، تولید نفت افزایش یافته است [۷].

۵-۲-۵ تزریق گاز

تزریق گاز می‌تواند به صورت طغیان گاز و یا تزریق متناوب به روش دمش و مکش^۴ باشد. طغیان گاز به طور گسترده‌ای برای افزایش

1. The Illinois Institute of Technology

2. Lawrence Livermore National Laboratory

3. Electro-Petroleum

4. Huff and Puff

حالت آبدوست است که سبب کاهش میزان نفت باقیمانده و افزایش ضریب بازیافت می‌شود [۱۱].

۵-۳ استفاده از سیال‌های فوق بحرانی به منظور بازیافت نفت شیل

تحقیقاتی در ارتباط با کاربرد سیالات فوق بحرانی برای افزایش بازیابی نفت شیل انجام شده است که به اختصار به آنها اشاره خواهیم کرد.

۵-۳-۱ استفاده از تولوئن فوق بحرانی

بنابر تحقیقات انجام شده، بازده استخراج مواد آلی توسط سیالاتی فوق بحرانی، نسبت به روش‌های استخراج معمول بیشتر است، مثلاً مطالعات آزمایشگاهی در ارتباط با استفاده از تولوئن فوق بحرانی به منظور استخراج نفت شیل و دستیابی به نفت با کیفیت مرغوب صورت گرفته است [۱۲].

در مطالعه‌ای که در کشور مراکش انجام شده است، شیل تحت دما و فشار مشخص به وسیله تولوئن استخراج شده است. عمل استخراج در شرایطی انجام شده که در هر مرحله میزان مشخصی تولوئن به کار رفته و عملکرد نفت تولیدشده مورد بررسی قرار گرفته است. بنابر نتایج به دست آمده، استخراج نفت شیل به وسیله تولوئن در شرایط بحرانی کاهش و به نقطه حداقل می‌رسد، اما زمانی که از تولوئن فوق بحرانی استفاده می‌شود، تولید نفت شیل شروع به افزایش می‌کند و عملکرد نفت تولیدی نیز افزایش می‌یابد [۱۲].

۵-۳-۲ استفاده از CO₂ فوق بحرانی

CO₂ فوق بحرانی به دلیل نقش آن در استخراج مواد شیمیایی و نیز سمی بودن اندک و آثار زیست محیطی کم، به یک حلال مهم تجاری-صنعتی تبدیل شده است. دمای نسبتاً پایین فرایند و ثبات CO₂ نیز این امکان را فراهم می‌آورد که تا بسیاری از ترکیبات با آسیب کم استخراج شوند. علاوه بر این، حلالیت بسیاری از ترکیبات استخراج شده در CO₂ با تغییر فشار تغییر و امکان استخراج انتخابی را میسر می‌کند [۱۳ و ۷].

۵-۳-۳ استفاده از آب فوق بحرانی

این روش بر اساس خرد کردن شیل به ابعادی کوچکتر از

در کارند: میکروب (بومی یا خارجی) و مواد مغذی (در محل و یا خارج از محل). بنابر نتایج مطالعات انجام شده در شرایط مناسب، زیست‌بسپارها و مواد زیستی فعال در سطح در شیل تولید می‌شوند، اما هیچ گزارشی برای استفاده از این روش به منظور افزایش بازیافت نفت از مخازن شیل منتشر نشده است، زیرا ممکن است بسپارهایی تولید شوند که منافذ بسیار کوچک موجود در مخازن شیل را مسدود کنند [۹]. تحقیقاتی نیز در زمینه تولید متان از مخازن شیل به واسطه واکنش‌های زیستی بی‌هوازی انجام شده است که هدف این بخش را تأمین نمی‌کند [۱۰].

۵-۲-۸ تزریق بسپار

یکی دیگر از روش‌های مطالعه شده برای افزایش بازیابی از مخازن حاوی نفت شیل، تزریق بسپار است. در چنین شرایطی، تزریق بسپار از طریق کاهش نسبت تحرک^۱ باعث افزایش بازده می‌شود. وجود بسپار در آب تزریق مخزن سبب افزایش گرانیروی و کاهش نسبت تحرک می‌شود. این امر به کاهش پدیده انگشتی شدن^۲ و نفوذ سیال تزریق شده درون‌حی بین شیل‌ها منجر می‌شود. به این ترتیب باعث افزایش ضریب بازیافت نفت می‌شود. تزریق بسپار یکی از روشهای بسیار مناسب در مخازن ناهمگن است. با این حال، مطالعات جامعی قبل از عملی سازی تزریق بسپار در مخزن باید صورت گیرد. مطالعات محققان مختلف به توسعه یک دسته پارامترهای غربالگری برای یافتن مخازن نامزد و نیز تشخیص شرایط عملیاتی مناسب برای انجام موفقیت آمیز عملیات تزریق بسپار انجامیده است. تا قبل از دهه ۱۹۵۰، چنین تصور می‌شد که تمامی مخازن نفتی آبدوست‌اند. ولی پس از آن این حقیقت روشن شد که مخازن نفتی می‌توانند، آبدوست، نفت دوست، خنثی و یا دارای تر شوندهگی ترکیبی باشند [۱۱].

در تزریق آب و بسپار در الگوی شیلی، نسبت به الگوی فاقد شیل، بازیافت نفت کاهش می‌یابد که این امر به علت میان شکنی سریعتر سیال تزریق شده و به دام افتادن نفت در اطراف شیل است [۱۱]. در تزریق آب و بسپار در حالت آبدوست نسبت به حالت نفت دوست، بازیافت نفت بیشتر است؛ دلیل آن نیز کمتر بودن عدد موینگی و جارو شدن نفت از روی جداره‌های محیط متخلخل در

1. Mobility Ratio
2. Viscous Fingering

رقم معادل است با ۱۰۵ تا ۳۱۵ میلیون گالن آب در روز برای تولید ۲/۵ میلیون بشکه در روز. این اعداد شامل آب مورد نیاز برای تولید برق برای فرایندهای گرمایشی در محل، تقطیر، پالایش، احیا، کنترل گرد و غبار و در محل مورد نیاز استقرار کارگران است. آب مورد نیاز شهری با توجه به رشد جمعیت مرتبط با توسعه صنعت نیازمند ۵۸ میلیون گالن اضافی در هر روز خواهد بود. از این رو صنعت نفت شیل با ۲/۵ میلیون بشکه در روز نیازمند ۲۲۰ میلیون تا ۵۲۰ میلیون متر مکعب آب در هر سال، بسته به محل و فرایندهای مورد استفاده خواهد بود. نگرانی‌های استفاده از آب به خصوص در مناطق خشک بیشتر است [۷].

ابراز نگرانی از آثار زیست محیطی بالقوه فرایندهای تولید نفت شیل باعث توقف حمایت‌های دولتی از استخراج نفت از شیل در برخی از کشورها از قبیل استرالیا شده است. استخراج نفت شیل ممکن است آثار مختلف زیست محیطی داشته باشد، که در فرایند فناوری‌های مختلف فرق می‌کند که بسته به شرایط زمین‌شناختی و تکنیک‌های استخراج ممکن است شامل انتشار فلزات در آب‌های سطحی و زیرزمینی، افزایش فرسایش، انتشار گازهای گوگردی و آلودگی هوا باشد که به علت تولید ذرات در طی فرایند، حمل و نقل و فعالیت‌های پشتیبانی پدید می‌آیند. معادن سطحی برای پردازش در خارج از محل، مانند پردازش در محل، به بهره‌گیری گسترده از زمین نیاز دارد و پردازش در خارج از محل حرارتی، تولید زباله‌های می‌کند که باید دفع شود. استخراج از معادن، پردازش ذخایر نفت شیل و دفع ضایعات، نیاز به زمینهایی دارد که از حوزه کاربری معمول خارج شوند. بسته به نوع فناوری به کار رفته، مواد زائد ممکن است شامل آلاینده‌های سولفات، فلزات سنگین و هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای باشد که برخی از آن‌ها سمی و سرطان‌زایند. در فرایندهای تبدیل در محل، ممکن است برخی از این آثار کاهش یافته، در عوض ممکن است مشکلات دیگری مانند آلودگی آب‌های زیر زمینی پدید آورد [۷].

۷. نتیجه‌گیری کلی

استفاده از نفت خام برای تولید انرژی همیشگی نخواهد بود. همچنین، با بالا رفتن قیمت نفت در بازارهای جهانی نیاز به استفاده سایر منابع انرژی به شدت احساس می‌شود. استخراج و مصرف منابع نفت شیل می‌تواند در زمینه تأمین انرژی کمک شایانی باشد.

۲۰۰ میکرومتر و قرار دادن آن در کنار یک منبع گرما در یک مخلوط گل با یک حلال و تزریق آن به عمق شیل با فشار بالا (۲۲۵ بار) عمل می‌کند. به طور کلی، گرمای زیاد سرعت انجام واکنش را افزایش می‌دهد. در عمق بیشتر از ۲۲۵۰ متر، فشار وارد شده از طریق یک ستون آب بیشتر از فشار بحرانی آب می‌شود. این روش نیازی به دستگاه‌های پیشرفته و گران قیمت برای وارد آوردن و تزریق فشار به درون شیل ندارد. حرارت مورد نیاز برای بازیابی نفت شیل ۵۰۰ درجه سلسیوس است. نفت تولید شده به بالای چاه حرکت می‌کند و جمع‌آوری می‌شود. وقتی نفت به صورت کامل تخلیه می‌شود، دمای محفظه را می‌توان به ۶۵۰ درجه سلسیوس رساند، که در آن با کروژن واکنش می‌دهد و کروژن به گاز تبدیل می‌شود. این گاز را می‌توان به مخازن و یا بازار تقاضا منتقل کرد و به فروش رساند [۷].

مزیت بزرگ فرایند مبتنی بر آب (اقیانوس) این است که استفاده از فشار حاصل مقرون به صرفه‌تر از سایر فرایندهاست و فشار به صورت نامحدود و رایگان در دسترس است. در مقابل، فرایندهای پرفشار اغلب در زمین غیر اقتصادی اند، زیرا تجهیزات تخصصی برای تلمبه‌ها برای دستیابی و نگهداری چنین فشاری پرهزینه‌اند [۷].

۶. ملاحظات زیست محیطی

تولید و مصرف نفت شیل معمولاً با تولید پدیده‌های گلخانه‌ای همراه است. بسته به نوع فناوری و ترکیب نفت شیل، فرایندهای استخراج نفت شیل نیز ممکن است گوگرد دی اکسید، هیدروژن سولفید، کربونیل سولفید، و اکسیدهای نیتروژن گسیل کنند. طی بیانیه آثار زیست محیطی انتشار یافته در سال ۲۰۰۸ از دفتر مدیریت زمین ایالات متحده، عملیات استخراج و پالایش، ۲ تا ۱۰ گالن فاضلاب در کم‌تر از هر تن پردازش نفت شیل، تولید می‌شود [۷]. توسعه منابع نفت شیل به مقادیر عظیمی آب نیاز دارد. آب معمولاً به عنوان خنک کننده نفت شیل و دفع خاکستر نفت شیل مصرف می‌شود. در برخی مناطق، آب باید از معادن نفت شیل تلمبه شود، در نتیجه کاهش سطح آب ممکن است آثار منفی برای زمین‌های زراعی و جنگل‌ها داشته باشد. در پردازش در محل براساس یک برآورد، از حدود یک دهم بیشتر آب مصرف می‌شود. تقطیر در بالای سطح زمین معمولاً بین ۱ تا ۵ بشکه آب به ازای هر بشکه نفت تولیدی از شیل، بسته به نوع فناوری، مصرف می‌کند. این

است، پیچیدگی و پرهزینه‌تر بودن فرایند تولید نفت شیل نسبت به فرایندهای پالایش و پردازش نفت خام، فراوانی نفت خام در مقایسه با نفت شیل، و ارزش حرارتی کمتر نفت شیل در برابر نفت خام است.

باید گفت که استفاده از منابع نفت شیل تنها زمانی امکان‌پذیر است که اولاً قیمت نفت بالا و ثانیاً فناوری استخراج و پالایش آن نیز در دسترس باشد. در جدول‌های (۱)، (۲) و (۳) مزایا و محدودیت‌های هر کدام از روش‌های بازیافت نفت شیل درج شده است. مهم‌ترین محدودیت نفت شیل که باعث عدم استفاده گسترده از آن شده

جدول ۱. مقایسه روش‌های خارج از محل تولید نفت شیل.

نوع فناوری	نام روش	مزایا	محدودیت‌ها
فناوری‌های خارج از محل	احتراق داخلی	۱. استفاده از گرمای حاصل از احتراق برای گرم کردن اتاق تخریب ۲. بازدهی بالا	
	جامدات بازیافتی داغ	۱. عدم نیاز به فضای وسیع به منظور انجام عملیات. ۲. عدم محدودیت در کوچکی ذرات برای پردازش ۳. رقیق نشدن گاز خروجی از محفظه احتراق به علت عدم اختلاط محصولات و مواد جامد بازگشتی	مصرف زیاد آب برای بازیافت ذرات ریز خاکستر شیل
	هدایت حرارتی از دیواره اتاق تخریب	۱. عدم اختلاط گاز شیل تولیدی با گاز خروجی از محفظه احتراق ۲. طراحی مدولار	مصرف الکتریسیته زیاد
	استفاده از گاز داغ تولید شده در خارج از محل	۱. تأمین حرارت موردنیاز توسط گازهای گرم خارج از لوله اتاق تخریب ۲. تولید کربن دی‌اکسید کمتر ۳. کنترل آسان‌تر و ثبات بیشتر محصولات نسبت به سایر روش‌ها ۴. عدم اختلاط گاز شیل با گازهای حاصل از احتراق و در نتیجه رقیق نشدن گاز شیل تولیدی	مصرف سوخت زیاد
	استفاده از مایعات واکنشی	۱. امکان پردازش نفت شیل‌هایی با محتوای کم هیدروژن ۲. بازده بیشتر تولید نفت	نیاز فرایند به هیدروژن در فشار بالا
	گازسازی پلاسمایی	عدم نیاز فرایند به آب	مصرف زیاد الکتریسیته

جدول ۲. مقایسه روش‌های در محل تولید نفت شیل.

محدودیت‌ها	مزایا	نام روش	نوع فناوری
۱. مصرف زیاد برق ۲. استفاده گسترده از آب ۳. آلودگی آب‌های زیر زمینی		انتقال حرارت از طریق دیواره چاه	فناوری‌های در محل
۱. نیاز به گاز خارجی ۲. نیاز به منبع گرمایی به منظور گرم کردن گاز		تزریق گازهای داغ تولید شده در خارج از محل	
نیاز به منبع برق قوی		فناوری اکسون موبیل	
۱. نیاز به برق فشار قوی ۲. احتمال آلودگی آب‌های زیرزمینی ۳. هدر رفت حرارت زیاد	امکان استفاده از این روش در عمق‌های بیشتر	گرمادهی منطقه‌ای به کمک امواج رادیویی	تزریق گاز
۱. نیاز به تأمین CO ₂ ۲. هزینه بالای تجهیزات CO ₂	۱. احتمال شکستگی مخزن در تزریق به روش طغیان گاز ۲. امکان امتزاج در فشارهای بالا ۳. امکان استفاده در تخلخل فوق العاده کم ۴. کاهش گرانروی بیشتر در مقایسه با تزریق آب ۵. نفوذ پذیری بیشتر نسبت به آب ۶. کاهش شکستگی مخزن در مقایسه با روش تزریق دماش و مکش ۷. کاهش مصرف آب، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، کاهش آسیب به مخزن ۸. تسریع استخراج و افزایش جذب متان		
	افزایش ترشوندگی	روش‌های شیمیایی	
احتمال مسدود شدن منافذ شیل	تولید زیست‌بسپارها و مواد فعال سطحی	روش‌های میکروبی	تزریق بسپار
	۱. کاهش نسبت تحرک ۲. مناسب برای مخازن ناهمگن ۳. توانایی نفوذ بین لایه‌های شیلی و پایین بودن نسبت تحرک در مقایسه با تزریق آب یا گاز		

جدول ۳. مقایسه سیالات فوق بحرانی به‌کارگرفته‌شده در تولید نفت شیل.

محدودیت‌ها	مزایا	نوع فناوری
مشکلات تأمین و استفاده از تولون در شرایط فوق بحرانی	افزایش استخراج نفت شیل	تزریق تولون فوق بحرانی
احتمال آلودگی آب‌های زیرزمینی	استفاده از آب اقیانوس جهت تأمین آب مورد نیاز فرایند	تزریق آب فوق بحرانی
مشکلات تأمین و استفاده از کربن دی‌اکسید در شرایط فوق بحرانی	۱. اثرات مخرب زیست محیطی کم ۲. دردسترس بودن ۳. امکان استخراج انتخابی	تزریق CO ₂ فوق بحرانی

پیشنهاد می‌شود که به منظور تکمیل مطالعات انجام شده، اطلاعات قابل استفاده نفت شیل در کشور اخذ و روش‌های بازافت آن با توجه به مزایا و محدودیت‌های هر روش به صورت کامل بررسی شود تا بتوان در آینده از مخازن نفت شیل کشور نیز استفاده کرد.

- [1] هزاوه‌ای، ه.، مقدسی، ع.، "بررسی روش‌های جدید استخراج و تولید نفت از سنگهای نفتی"، اکتشاف و تولید، نشریه فنی و تخصصی شرکت ملی نفت ایران، مهر ۸۷. بازبینی شده در ۱۲ آذر (۱۳۹۳).
- [2] یزدانی، ر.، "مخازن نفت شیل و منبعی عظیم در تأمین انرژی آینده"، پایگاه علمی خبری اوپل اینداستری، (۱۳۹۵).
- [3] شیل نفتی، شبکه ملی رشد، www.daneshnameh.roshd.ir (۱۳۸۵).
- [4] مهران‌فر، الف.، غضنفری، م. ح.، مسیحی، م.، رشتچیان، د.، "مطالعه آزمایشگاهی تزریق پلیمر به منظور ازدیاد برداشت نفت سنگین از مخازن حاوی شیل با استفاده از دستگاه میکرو مدل"، چهاردهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، ۲۵-۲۶ مهر ماه (۱۳۹۱).
- [5] King, H., "shale" <http://geology.com/rocks/shale.shtml> Hooman hajikarimi, (2015).
- [6] Miriam, C., Richard, W., Christos, A., Kafantaris, L., Spathopoulos, F., Mark, A., "A new rapid method for shale oil and shale gas assessment", *Fuel* 153, 231-239, (2015).
- [7] Rivard, C., Lavoie, D., Lefebvre, R., Séjourné, S., Lamontagne, C., Duchesne, M., "An overview of Canadian shale gas production and environmental concerns", *International Journal of Coal Geology* 126, 64-76, (2014).
- [8] Bolonkin, A., Friedlander, J., Neumann, S., "Innovative unconventional oil extraction technologies", Strategic Solutions Technology Group, Fuel Processing Technology 124, 228-242, (2014).
- [9] William, A., David, L., Glenn, A., Tom, C., Michele, M., "ExxonMobil's Electrofrac Process for In Situ Oil Shale Conversion", Adapted from oral presentation at AAPG Annual Convention, San Antonio, (2008).
- [10] James, J. S., "Enhanced oil recovery in shale reservoirs by gas injection", *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 22, 252-259, (2015).
- [11] Meslé, M., Périot, C., Dromart, G., Oger, P., "Methanogenic microbial community of the Eastern Paris Basin: Potential for energy production from organic-rich shale", *International Journal of Coal Geology* 149, 67-76, (2015).
- [12] Abourrichea, A., Oumamb, M., Hannacheb, H., Adilb, A., Pailler, C., Naslain, R D., Pillot, J., "Effect of toluene proportion on the yield and composition of oils obtained by supercritical extraction of Moroccan oil shale", *Supercritical Fluids* 51, 24-28, (2009).
- [13] Pei, P., Ling, K., He, J., Liu, Z., "Shale gas reservoir treatment by a CO₂-based technology", *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 26, 1-12, (2015).