

نفت و مکانیزم‌های بازیافت

تهیه و تنظیم: سعید ساویز طرح توسعه‌ی لایه‌های نفتی

بین سنگ و سیال و سنگین شدن کف‌های تراوایی نسبی به نفع آب یا گاز ممکن است حتی پس از اجرای روش ثانویه ۴۰-۶۰ درصد نفت در داخل مخزن باقی بماند. در این مرحله از روش‌های ثالثیه مثل تزریق و سیلاب‌زنی مواد شیمیایی سیلاب‌زنی آب هوشمند، تزریق امتزاجی گاز و روش‌های حرارتی و میکروبی استفاده می‌شود از روش‌های فرآیند گرمایی می‌توان به استفاده از بخار، آب داغ یا حتی بوجود آوردن انرژی حرارتی درجا اشاره کرد.

در واقع تفاوت بازیافت ثانویه و ثالثیه در تأثیر آنها بر سیستم سنگ و سیال نهفته است. در بازیافت ثالثیه یکی از مکانیزم‌های زیر رخ می‌دهد.

- تورم مولکول‌های نفت
- تغییر در کشش بین سطوح سیالات
- کاهش گرانیوی نفت
- تغییرات ترشوندگی سنگ
- تغییرات در رفتار فازی سیالات
- تغییر در کشش بین سنگ و سیال
- انحلال یا تغییر در سنگ

زیادگی از مخزن را تخلیه می‌کند اما در کربنات‌ها کمتر از ۴۰ درصد از مخزن را تخلیه می‌کند. وقتی توان طبیعی مخزن برای برداشت افت کرد روش دوم و در واقع مکانیزم ثانویه‌ی تخلیه به اجرا در می‌آید. در این روش با تزریق آب یا گاز سعی می‌شود مکانیزم‌های تخلیه‌ی طبیعی تقویت گردد و انرژی طبیعی مخزن در همان سطح حفظ شود. مثلاً می‌توان گاز یا آب را مستقیماً به کلاهک گازی یا آبدۀ یا همزمان به هر دو تزریق کرد و شرایط تثبیت فشار را فراهم کرد. همچنین با استفاده از نفوذپذیری نسبی می‌توان موجبات جابه‌جایی غیرامتزاجی نفت را فراهم کرد. در رانش با آب و رانش غیرامتزاجی گاز فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که به دلیل پدیده‌ی انگشتی شدن یا مخروطی شدن آب و نفت، تولید غیراقتصادی باشد که در این شرایط تولید متوقف خواهد شد. مکانیزم ثانویه می‌تواند درصد بازیافت را تا ۶۰ درصد افزایش دهد. اما به دلایل مختلف مانند به‌تله افتادن نفت و چسبندگی سطحی در اثر کشش

از حفر اولین چاه موفق نفت در ۲۸ آگوست ۱۸۵۹ تا به امروز، بشر همواره در اندیشه‌ی بهره‌برداری بهینه و تولید هرچه بیشتر از مخازن زیرزمینی بوده است. نیاز روزافزون زندگی بشری به منبع انرژی قابل‌انتقالی از جنس هیدروکربن و اهمیت نقش عاملی به‌نام اقتصاد باعث شد خیلی زود علم مهندسی بهره‌برداری و مخازن به کمک مهندسی حفاری بشتابد تا عمر بهره‌برداری از مخازن هرچه بیشتر افزایش یابد.

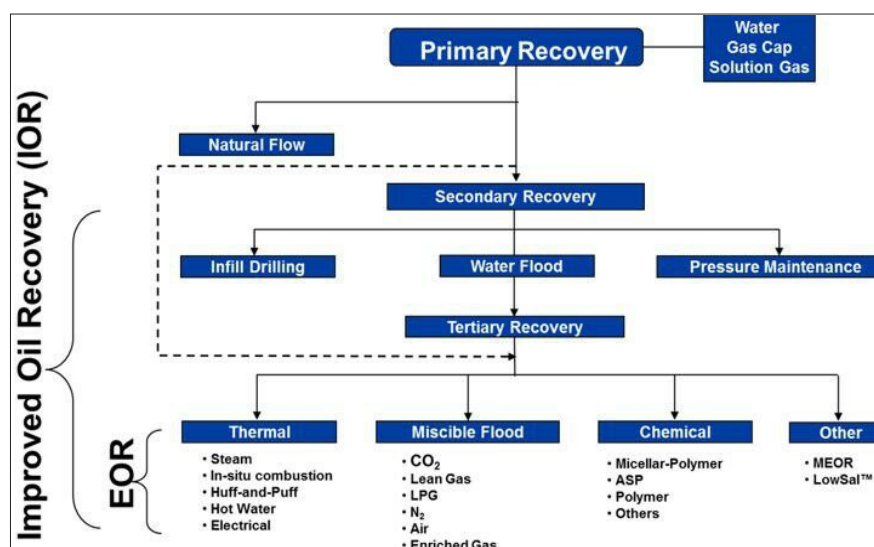
سیر تاریخی عمر تولید از مخازن را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد.

■ **بازیافت اولیه:** زمانی که مخازن با استفاده از انرژی طبیعی نهفته تولید می‌کنند.

■ **بازیافت ثانویه:** زمانی که به مخزن آب یا گاز تزریق شود اما تغییری در خواص فیزیکی و شیمیایی سنگ و سیال به وجود نیاید.

■ **بازیافت ثالثیه:** روش‌ها و مکانیزم‌هایی که انرژی را از بیرون به مخزن تزریق کرده، باعث افزایش انرژی مخزن و حرکت سیال در درون محیط متخلخل می‌شود. این روش‌ها که در برخی موارد با تزریق مواد شیمیایی نیز همراه است باعث تغییر شیمیایی سنگ و سیال می‌شود.

دانشمندان علم مخازن عمر تولید از هر میدان نفت یا گاز را به سه‌ی دوره زمانی تقسیم می‌کنند. تخلیه‌ی طبیعی با استفاده از انرژی طبیعی مخزن به عنوان عامل اصلی جابه‌جایی سیال. این انرژی می‌تواند رانش کلاهک گازی، رانش آبدۀ، انرژی گاز محلول، انبساط سنگ و سیال، ریزش ثقلی یا پدیده‌ی آرتزین باشد. تخلیه‌ی طبیعی مخزن اگرچه گاهی در ماسه‌سنگ‌ها درصد



تفاوت در تزریق آب و گاز در روش‌های ثانویه و ثالثیه مربوط به وجود یا عدم وجود پدیده‌های برشمرده شده پس از تزریق است. این نمودار به شکلی ساده تقسیم‌بندی روش‌های مختلف تولید از میدان و حیطه‌ی EOR, IOR را نشان می‌دهد.

تزریق آب، تزریق گاز و تاریخچه‌ی آنها

قبل از ورود به چگونگی استفاده از این روش‌ها در ازدیاد برداشت نگاهی به سیر تاریخی تزریق آب و گاز به یک مخزن نفتی می‌اندازیم.

عده‌ای معتقدند تزریق آب در یک مخزن نفتی از یک حادثه به وجود آمد؛ جایی که آب یک آبدۀ کم‌عمق به داخل مخزن نفوذ کرد و باعث افزایش تولید چاه‌های اطراف شد.

تزریق آب برای اولین بار در ۱۸۸۰ توسط John F. Carll پیشنهاد شد و در ۱۹۰۷ به‌عنوان مطالعه‌ی در میدان Bradford در ایالت پنسیلوانیا بررسی گردید. همچنین در ۱۹۱۳ در Ontario کانادا و در ۱۹۱۷ در میدان Key River استفاده شد.

با گسترش استفاده از این روش در تولید ثانویه از مخزن، تزریق آب در سال ۱۹۵۵ بیش از ۱۱ درصد از ۶/۶ میلیون بشکه نفت تولیدی آمریکا را به‌خود اختصاص داد. ۷۴ درصد از نفت تولیدی برزیل در دریا از این روش به‌دست می‌آید. روش به‌کارگیری آب ارتقاء یافته نیز تقریباً مشابه تزریق آب گسترش پیدا کرد.

آب شیرین برای تزریق در همه‌جا در دسترس نبود و علاوه بر آن در بسیاری میادین مانند میادین دریایی یا میادین بیابان‌های کشورهای خاورمیانه ارزش آب بیشتر از نفت بود. بدین ترتیب تزریق آب دریا برای اولین بار در دستور کار قرار گرفت. علی‌النعیمی مدیر عامل سابق آرامکو و وزیر

نفت اسبق عربستان در کتاب خاطرات خود نوشته: در حالی‌که همچنان مراحل آزمایشی تزریق گاز به منابع نفتی خود برای حفظ فشار بودیم، زمین‌شناسان نیز امکان تزریق آب دریا را بررسی می‌کردند. تا آن زمان رویه‌ی معمول صنعتی در جهان استفاده از آب چاه برای حفظ فشار مخزن بود. به‌دلیل کمبود آب چاه در بیابان‌های عربستان باید راه‌حل‌های دیگری می‌یافتیم. دانشمندان به‌زودی دریافتند که آب دریا پس از تصفیه‌ی آب برای زدودن ناخالصی‌ها و اکسیژن فرساینده، می‌تواند در کناره‌های مخزن تزریق شود؛ فرآیندی که کارآمدتر از تزریق گاز است.

تزریق گاز اما داستان دیگری دارد؛ در واقع مهندسان اندکی پس از تزریق آب متوجه سناریوی تزریق گاز برای استفاده در بازیافت ثانویه شدند. مهم‌ترین دلایل ارزیابی تزریق گاز به شرح زیر است.

■ وجود گازهای همراه که به دلیل حجم و نرخ تولید، ارزش بهره‌برداری جداگانه از نفت را نداشت و سوزانده می‌شد و سوختن این گازها عاملی در راستای آلودگی محیط زیست به حساب می‌آید.

■ عدم دسترسی به آب جهت تزریق به مخزن و در عوض امکان دسترسی به گاز فراوان

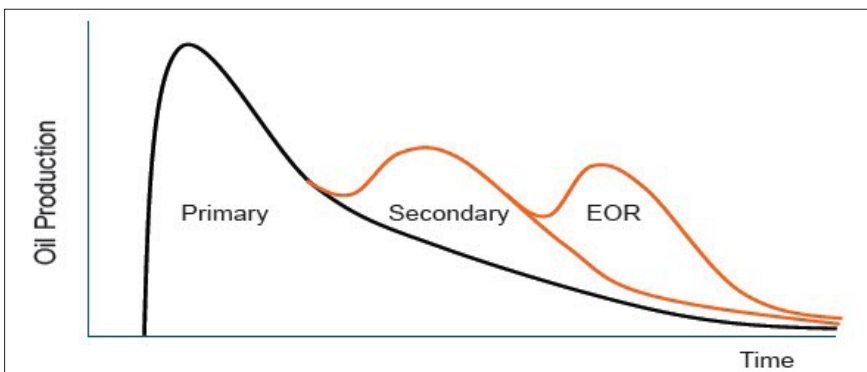
■ وجود آبدۀ فعال و کلاهِک گازی محدود و بالا آمدن سطح آب به‌دلیل تولید نفت؛ در این حالت به کلاهِک گازی گاز تزریق می‌شود تا تعادل بین دو مکانیزم آبدۀ و

کلاهِک گازی برقرار شود. ■ سنگ آب‌دوست که برای استفاده از مکانیزم رانش و آشام باید شرایطی بوجود بیاید که نفت سیال تر باشد. ■ تولید نفت با ریزش ثقلی در مخازنی با ضخامت زیاد که در صورت تزریق از بالا به کلاهِک گازی ضریب بازیافت مناسبی دارد. ■ استفاده از امتزاج نفت و گاز

اولین بار در ۱۹۲۰ در مقاله‌ی علمی از تزریق گاز سخن به میان آمد. اما اجرای اولین طرح در مقیاس صنعتی سال‌ها بعد انجام شد.

Muskat در ۱۹۴۹ در کتاب Physical principles of oil production از چهار پروژه‌ی تزریق گاز غیرامتزاجی در کانزاس، آرکانزاس، تکزاس غربی و کالیفرنیا در سال‌های ۱۹۴۰-۱۹۳۰ رونمایی کرده که دو تای آنها موفقیت‌آمیز و دو تای دیگر ناموفق بود. اولین تزریق گاز غیرامتزاجی در خاورمیانه را نیز باید متعلق به بحرین دانست.

در ایران به‌دلیل وجود گاز فراوان و معضل ساماندهی گازهای مشعل، همواره جهت‌گیری مهندسان مخزن به سمت تزریق گاز به کلاهِک گازی یا استفاده از مکانیزم ریزش ثقلی برای تولید بیشتر از مخازن بوده که البته بخشی از این نوع سیاست‌گذاری به‌دلیل بی‌برنامگی و عدم وجود زیرساخت‌های لازم برای استفاده از گاز است؛ چراکه اگر در ایران قیمت‌گذاری



می‌شود و این جابجایی PH سیستم را افزایش می‌دهد. علت اصلی این پدیده تمایل یون‌های H^+ به سمت سطوح clay اتفاق می‌افتد.

لارجر و همکاران با تجزیه و تحلیل ژئوشیمیایی مغزه‌های مورد آزمایش در سیلاب‌زنی با آب هوشمند در سنگ‌های کربناته به نتایج جدیدی دست یافتند که گاهی نقیض نتایج قبلی به‌دست آمده بود. آنها متوجه شدند که ترکیبات قطبی نفت با یون منیزیم و کلسیم روی سطح سنگ جایگزین شده و این فرآیند سرانجام می‌تواند منجر به آزاد شدن نفت چسبیده به دیواره شود. این پدیده را تبادل چند یونی یا MIE می‌نامند. که عامل اصلی در راستای اصلاح ترشوندگی است.

همچنین نتیجه‌ی دیگری که لارجر و همکارانش در این تحقیق بدان دست یافتند عدم ارتباط افزایش ضریب بازیافت از نفت با PH بود. زیرا در مواردی با وجود PH پایین محیط، ضریب بازیافت افزایش یافته است. عامل اصلی در اصلاح و تغییر ترشوندگی را باید تبادل یون‌ها دانست. در سنگ‌های کربناته یون‌های Ca^{2+} ، Mg^{2+} و SO_4^{2-} توانایی جابه‌جایی و تغییر ترشوندگی دارند.

یکی از اولین مطالعات با هدف بررسی تغییرات ترشوندگی با تزریق آب هوشمند روی سنگ‌های کربناته توسط یوسف و همکاران انجام شد.

مطالعات آزمایشگاهی او نشان داد که تغییر ترشوندگی حاصل واکنش بین شوری

چگونه با بهینه‌سازی روش‌های بازیافت از مخازن روزبه‌روز پیشرفت بیشتری کرد و سود سرشاری را نصیب صاحبان شرکت‌های بزرگ نفتی نمود.

از آب شیرین تا آب کم‌شور و هوشمند

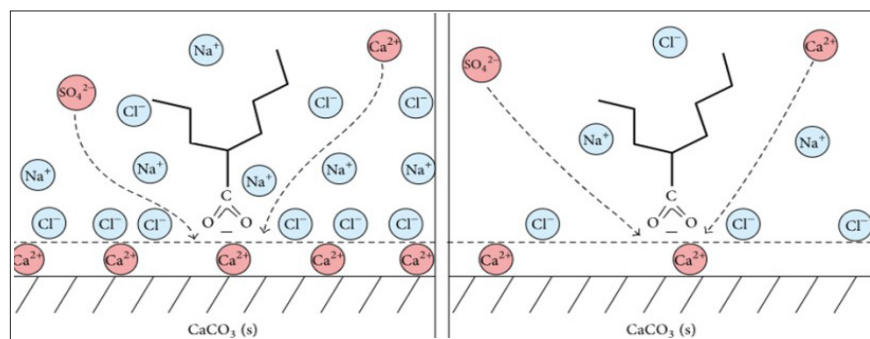
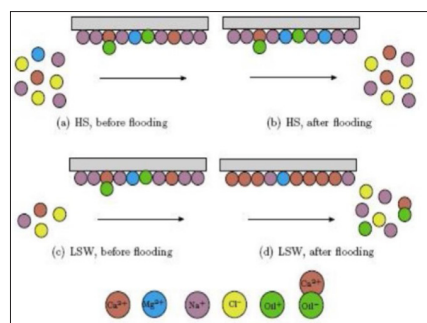
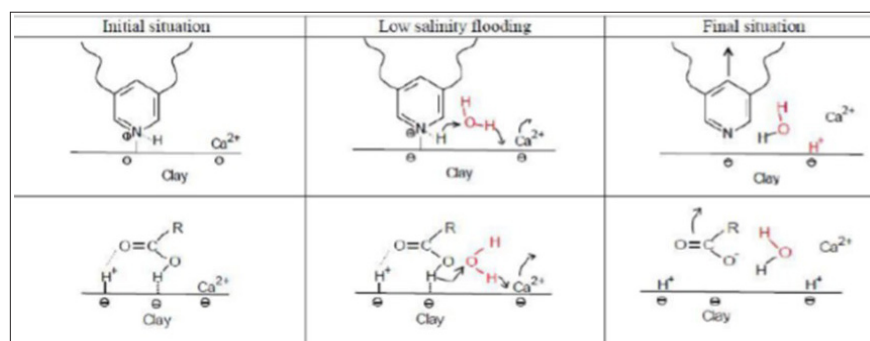
پیشتر اشاره شد که به‌دلیل کمبود آب شیرین در بیابان‌ها و میادین فراساحل و وجود آب دریای فراوان اولین روش‌های تزریق آب دریا به‌دلیل جلوگیری از رسوب‌گذاری مضاعف، با کنترل انجام شد. مورو از اولین محققانی بود که روی آب دریای کنترل‌شده از لحاظ شیمیایی برای تزریق کار کرد.

مورو و همکاران نشان دادند که تغییر یون‌های آب کم‌شور تزریقی می‌تواند از نفت باقیمانده در مغزه‌های ماسه‌سنگی بکاهد. پس از مورو محققان دیگری به تحقیق روی تزریق آب کم‌شور روی آوردند. مثلاً اوستاد و همکاران نشان دادند که وقتی آب کم‌شور به مخزن تزریق می‌شود تعادل اولیه‌ی شیمیایی مخزن به‌هم می‌ریزد، Ca^{2+} با H^+ جایگزین

صحیح بر اساس ارزش واقعی گاز در بازار جهانی انجام می‌شد ممکن بود در ارزیابی اقتصادی طرح‌های تزریق گاز، قیمت گاز مصرفی بیش از قیمت اضافه‌ی نفت تولیدی باشد و تزریق گاز به بسیاری از مخازن غیراقتصادی ارزیابی شود.

از سوی دیگر مکانیزم مفید و انعطاف‌پذیر تزریق آب با تغییرات شیمیایی که اتفاقاً پیشرفت‌های علمی زیادی را تا به امروز در دنیا داشته هنوز در ایران تنها در حد پایان‌نامه‌های دانشجویی مطرح می‌شود. بد نیست بدانیم سیر تحول علمی روش‌های ازدیاد برداشت با احساس نیاز از سوی صنعت و اقتصاد توسط محققان اجرا شده و پشت هر طرح موفق چند مقاله و تحقیق علمی وجود دارد. اما در ایران غالباً روش‌ها وارداتی هستند و انفصال بزرگی بین کارهای علمی و دانشگاهی و صنعت وجود دارد.

شاید مروزی بر سیر تاریخی تحول و ارتقاء روش تزریق آب، از آب شیرین تا آب کم‌شور و هوشمند نقشه‌ی راه مناسبی برای اتحاد بخش دانشگاهی و علمی با صنعت باشد که



سوی بخش‌های مخزنی در مورد حجم گاز مورد نیاز برای تزریق سیاست‌گذاری کلان برای طرح‌های ارزآور با استفاده از گاز، مانند ال.ان.جی کمتر در دستور کار قرار می‌گیرد. این در حالی است که اگر افزایش ضریب بازیافت با استفاده از روش‌های مختلف به‌درستی ارزیابی شده و اقتصاد پروژه به‌خوبی تجزیه و تحلیل گردد ممکن است لزوم ایجاد زیرساخت‌هایی برای انتقال و مهندسی یون آب دریا به مناطق نفتی کشور عیان گردد. البته سیر تحول روش‌های ازدیاد برداشت چه در تزریق آب و چه در تزریق گاز با احساس نیاز به بازیافت بیشتر و هزینه‌ی کمتر رابطه‌ی مستقیم داشته و تنها داشتن گاز یا آب فراوان دلیل قانع‌کننده‌ای برای تعیین روش نیست. از سوی دیگر در پس هر مقاله‌ای علمی اسپانسی صنعتی وجود دارد که قصد دارد با صرف هزینه به نتیجه‌ی جدیدی برای بهینه‌سازی روش تولید دست یابد. در کشور ما ده‌ها مقاله‌ی دانشگاهی به‌عنوان پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد و دکترا در مورد روش‌های ازدیاد برداشت انجام شده؛ بدون اینکه هیچ بازخورد صنعتی از آنها گرفته شود و شاید این بزرگ‌ترین شکاف بین بخش علمی و صنعتی در ایران باشد. از سوی دیگر تصمیم‌گیری در خصوص بودجه‌ی پروژه‌ها در مرکز و نهادهای تصمیم‌گیر انجام می‌شود. در شرایطی که این مراکز کاملاً با حال و هوای متخصصان درگیر در پروژه بیگانه‌اند، طبیعی است که بسیاری از تصمیمات بهینه نباشد. ■

نمک تغییر خواهد کرد که می‌تواند ضخامت EDL را کاهش دهد.

هدف از تزریق آب کم‌شور به‌وجود آوردن لایه‌ای آبی روی سطح سنگ است که باعث تغییر ترشوندگی و افزایش ضریب بازیافت می‌شود.

اضافه شدن سورفکتانت در یک فضای کم‌شور می‌تواند کمک زیادی به طراحی یک لایه‌ی استرنی پایدار آبی روی دیواره‌ی سنگ باشد که خود می‌تواند ضریب بازیافت نفت را در فرآیند سیلاب‌زنی افزایش دهد.

همان‌گونه که اشاره شد روش تزریق آب هوشمند، مرحله به مرحله و با تلاش و تحقیق افراد و گروه‌های مختلف کامل تر شد؛ سیری تکاملی که برای گاز نیز اتفاق افتاد. از این‌رو قضاوت در مورد روش بهینه‌ی ازدیاد برداشت قبل از مطالعات دقیق و میدان‌محور قطعاً نتیجه‌ی بهینه‌ای به‌دست نخواهد داد. گاهی نتایج حاصل در یک میدان نقیض نتایج حاصل در میدان هم‌جوار بوده و صدور نظر کلی و قطعی در مورد استفاده از روش‌های علمی مختلف نظیر آنچه امروز در صنعت نفت ایران در خصوص مزایای تزریق گاز عنوان می‌شود پایه‌ی علمی چندانی ندارد.

کدام روش ازدیاد برداشت مفیدتر است؟

روش ازدیاد برداشت باید با توجه به شرایط و آزمایش‌های انجام شده با سنگ و سیال خاص هر میدان و مخزن انتخاب شود؛ در ایران تکیه‌ی بسیاری بر تزریق گاز می‌شود و به‌دلیل ارائه‌ی گزارش‌های فنی از

ترکیب یونی آب نمک تزریقی است. آنها در مورد اندازه‌گیری زاویه‌ی تماس دریافتند که با رقیق کردن آب دریا تراوایی سنگ هرچه بیشتر به سمت آب‌دوست پیش خواهد رفت که می‌تواند نشانه‌ی خوبی برای افزایش ضریب بازیافت باشد.

اما پس از تلفیق پیشرفت‌های علم شیمی و استفاده از دانش کشش سطحی بین سیالات و همچنین بین سطح و سیال درهای جدیدی بر روش‌های تزریق آب باز شد که در آینده با ورود تزریق مواد شیمیایی مثل سورفکتانت‌ها و پلیمرها باعث تکمیل این روش و افزایش هرچه بیشتر ضریب بازیافت گردید.

هر سطح باردار می‌تواند بارهای غیرهمسان خود را جذب کند. سطوح سنگ نیز بار مشخصی دارد. از این‌رو بارهای غیرهمنام به سطح سنگ می‌چسبند و اولین لایه‌ی الکترونی مجاور سنگ را به‌وجود می‌آورند که آنرا Counter Ion می‌نامند و اولین لایه‌ی چسبیده به سنگ را Adsorbed Layer می‌نامند. سپس لایه‌ی دوم با توجه به شرایط دمایی با فاصله‌ی از لایه‌ی اول به‌وجود می‌آید که بارهای آن لزوماً همسان نیستند و فاصله‌ی آنها مانند لایه‌ی اول منظم نیست. این لایه‌ی دوم را Diffuse layer می‌نامند.

لایه‌ی الکتریکی دوگانه‌ی EDL توسط استرن مطالعه شد که لایه‌ی اول آن به‌نام استرن نامیده می‌شود.

با تزریق آب نمک به سازند، شارژ الکتریکی در ترکیب نفت و آب نمک و سنگ و آب

