Archive of SID

# بررسی آزمایشگاهی فرایند تزریق امتزاجی در نفت سنگین با استفاده از دستگاه میکرومدل

تورج بهروز*+، ریاض خراط
تهران، دانشگاه صنعت نفت، مرکز تحقیقات دانشکده مهندسی نفت تهران

محمد حسین غضنفری
تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت

**چکیده:** در این مطالعه، به منظور بررسی فرایند تزریق امتزاجی با انجام یک سری آزمایش، تعدادی حلال هیدروکربنی مانند هپتان، اکتان و دکان برای جابه جایی نفت سنگین در الگوی میکرومدلی به کار برده شده است. در این مشاهدات آزمایشگاهی پارامترهای متفاوتی مانند اثر نوع حلال تزریقی، سرعت تزریق حلال، نحوه تزریق حلال(عمودی و افقی) و همچنین الگوهای متفاوت جریان ساده و زاویه دار، بر میزان بهره دهی نفت مورد بررسی واقع شده است. درهنگام تزریق حلال‌های هیدروکربنی، به کمک دوربین دیجیتالی که با رایانه کنترل می شود در بازه های دلخواه از این فرایند عکس گرفته و در نهایت به کمک نرم افزار آنالیز، عکس‌ها آنالیز شده است. در این آزمایش‌ها دیده شده است که افزایش سرعت تزریق سیال به درون الگو، اثر منفی بر میزان بهره‌دهی دارد، البته سرعت تزریق باید به حدی باشد که فرایند نفوذ حاکم باشد. سپس مقایسه در دو حالت تزریق عمودی و تزریق حلال به صورت افقی نشان داد که بهره دهی حالت عمودی بیشتر است. هم چنین با بررسی پدیده انسداد آب مشاهده شدکه تزریق حلال بعد از تزریق آب بر میزان بهره‌دهی چندان تاثیر ندارد. مشاهده شد که هر چه جرم مولکولی حلال بیشتر باشد بهره‌دهی کم‌تر و در نهایت بازیافت نفت در الگوهای زاویه‌دار جریان از الگوهای ساده بالاتر است.

**واژه‌های کلیدی:** میکرو مدل، نفت سنگین، الگوی محیط متخلخل، حلال، فرایند نفوذ، آنالیز عکس، انسداد آب، بهره دهی.

***KEY WORDS:*** *Micromodel, Heavy oil, Porous media pattern, Solvent, Diffusion process, Image analysis, Water blockage, Recovery.*

## مقدمه

فرایندهای غیر امتزاجی حتی اگر به طور کامل موفق اجرا شود، ممکن است مقدار قابل ملاحظه ای از نفت را به علت وجود نیروهای مویینگی[۱] در مخزن باقی بگذارد. با صرف‌نظر کردن از نیروهای مویینگی فرایندهای غیر امتزاجی بسیار موثر خواهد بود. به هر حال در همه فرایندهای امتزاجی، حلال (جا به‌جا کننده نفت)ناروانی کم‌تری نسبت به نفت سنگین دارد و جبهه حرکت هیچ‌گاه پایدار نیست، و پدیده انگشتی شدن[۲] اتفاق می‌افتد، و در نهایت عمل جاروب کردن[۳] به درستی انجام نمی‌شود.

*عهده دار مکاتبات
+E-mail: tbbehrouz@yahoo.com

(۱) Capillary
(۲) Fingering
(۳) Sweeping


www.SID.ir

Archive of SID

مخازن نفت سنگین زیادی در جهان وجود دارد. حدود یک سوم نفت جهـان کـه در کانادا واقـع شـده، نفت سنگیـن و بیوتـومین است. کل نفت‌های سنگین در دنیا حدود ۱۰ تریلیون بشکه است،که به تقریب چیزی در حدود ۳ برابر نفت درجای معمولی است. آلبرتا حدود ۲ تریلیون نفت سنگین درجا دارد.

جا به جایی نفت با استفاده از فرایند غیر امتزاجی مانند تزریق آب کامل نیست، اما سیال‌ها می‌توانند درهم حل شده و به طور کامل جابه جا شوند. در هنگام فرایند امتزاجی هیچ‌گونه نفت اشباع شده باقی نمی‌ماند. اکنون تزریق حلال به عنوان یکی از روش‌های برداشت مطرح شده است. بحث اصلی در فرایندهای امتزاجی این است که فاز حلال، دسترسی قابل ملاحظه‌ای به نفت باقی‌مانده داشته باشد. مکانیسم اصلی در فرایندهای تزریق حلال، نفوذ و پراکندگی است. ضریب پراکندگی و ضریب نفوذ با هم رابطه دارند.

در این مطالعه، به بررسی مواردی پرداخته شده است که بر میزان بهره‌دهی نفت سنگین تاثیرگذار است. عواملی مانند نوع حلال تزریقی، سرعت تزریق حلال، نحوه تزریق حلال و پدیده انسداد آب مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. میکرومدل برای مشاهده دو بعدی جریان، تعیین رفتار جریان در مقیاس بسیار ریز و برای درک بهتری از فرایند جابه‌جایی به کار می‌رود.

## آزمایش‌ها

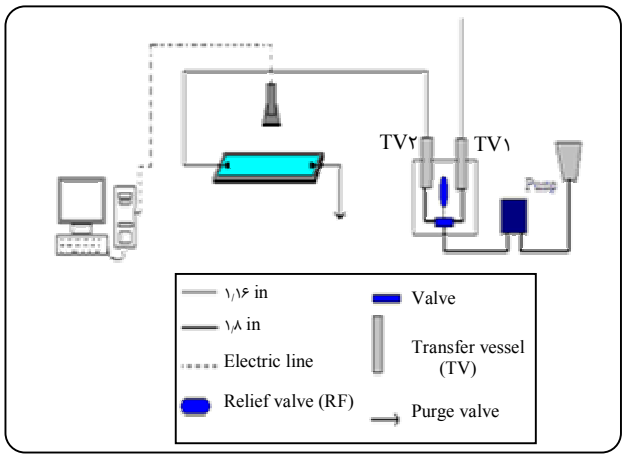
### مراحل آزمایش

### طراحی الگو

طراحی الگو[۱] نخستین و مهم‌ترین گام در آزمایش‌های میکرومدل است. ابتدا باید مدل محیط متخلخل به کمک کامپیوتر طراحی شود، و پس از طی مراحل متفاوتی مانند قرار دادن در مقابل پرتو فرا بنفش و استفاده از اسیدهای نیتریک و فلوئوریک آن را روی شیشه حک کرد. الگوهای متفاوتی را با عدد کوئوردیناسیون، پخش منافذ[۲]، پخش دهانه‌های محیط متفاوت[۳] و تخلخل متفاوت می‌توان طراحی کرد.

### آماده کردن ماسک

ماسک برای انتقال الگو به شیشه با کیفیت بالا به کار می‌رود بـه طوری‌که دانه‌هـای روی آن شفاف و مسیـر جریان تیره است.




**شکل ۱ـ شمایی از دستگاه میکرومدل.**

بعد از پرینت گرفتن، آن را در مقابل پرتو فرا بنفش قرارمی‌دهند و می‌توانند الگو را بر روی شیشه پیاده کنند.

### حک کردن روی شیشه

۱ـ برداشتن رنگ از پشت آینه با استفاده از رنگ بر

۲ـ استفاده از لمینت و قرار دادن در مقابل پرتو فرا بنفش

۳ـ استفاده از نیتریک اسید

۴ـ استفاده از فلوریدریک اسید

### آزمایش‌ها در دستگاه میکرومدل

آزمایش‌ها در دستگاه میکرومدل فشار پایین انجام می‌شود. شکل ۱ نمایی از دستگاه میکرومـدل فشار پایین را نشان می‌دهد.

سیالات مورد استفاده: در اینجا از نفت سنگین واقعی (نفت یکی از مخازن ایران) استفاده می شود و سه حلال به نام‌های هپتان، اکتان و دکان مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین برای مقایسه بهره دهی حلال‌ها و آب، به نفت سنگین آب تزریق می‌شود. برای این‌که فرایند به طور واضح مشخص باشد، به حلال‌ها سودان رد اضافه می‌کنیم تا قرمز شود و به آب متیلن بلو اضافه می‌کنیم تا آبی شود. رنگ نفت هم که تیره است پس برای تشخیص رنگ‌ها در حین فرایند مشکلی نخواهیم داشت. همچنین برای تمیز کردن الگوها بعد از انجام آزمایش از سیالات تمیزکننده مانند الکل، تولوئن و آب استفاده می‌شود.

(۱) Pattern

(۲) Pore size distribution

(۳) Throat orientation


www.SID.ir

Archive of SID

## نتیجه‌ها و بحث

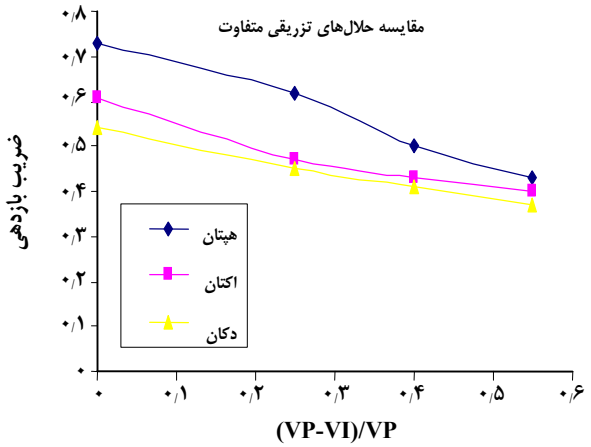
یک سری آزمایش انجام شد و برخی حلال‌ها مانند هپتان، اکتان و دکان برای جابه‌جا کردن نفت سنگین مورد استفاده قرار گرفت. نفت مورد استفاده، نفت واقعی یکی از مخازن ایران است. حلال‌ها با سرعت‌های تزریق متفاوت به الگو تزریق شده‌اند. همچنین نحوه تزریق متفاوت ( افقی و عمودی) مورد آزمایش قرار گرفت. در نهایت پدیده انسداد آب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و سرعت‌های متفاوت مانند ۰/۰۰۰۲ میلی لیتر بر دقیقه و ۰/۰۰۰۴ میلی لیتر بر دقیقه سرعت‌هایی هستند که در آنها فرایند به صورتی پیش می‌رود که فرایند نفوذ حاکم باشد چون پدیده نفوذ عامل مهمی در فرایندهای تزریق امتزاجی است، لذا این آزمایش‌ها باید با سرعت‌هایی انجام شود که نفوذ، فرایند غالب باشد. یادآوری این نکته ضروری است که در تمامی شکل‌ها VI میزان سیال تزریقی و VP حجم حفره های الگو را نشان می‌دهد.

### اشباع کردن الگوها

اشباع کردن الگوها از نفت یکی از مشکل‌ترین و وقت‌گیرترین قسمت این آزمایش‌هاست. ابتدا باید فشار روی الگو طوری تنظیم شود که حرکت سیال فقط در مسیرهای محیط متخلخل انجام شود و هیچ‌گونه نشتی بین لایه‌ها نباشد. اگر فشار روی الگو کم باشد، حتما نشت[1] خواهیم داشت و اگر فشار خیلی زیاد باشد ممکن است الگو بشکند. برای اشباع کردن، نفت سنگین را در یک ظرف می‌ریزیم، یک سر ظرف را به یک کپسول نیتروژن وصل می‌کنیم که به وسیله‌ی تزریق نیتروژن بر روی نفت اعمال فشار کند، و از ظرف محتوی نفت یک لوله دیگر به الگو متصل می‌شود که بر اثر فشار روی نفت از طریق این لوله به الگو منتقل می‌شود. فشار روی نفت را باید بسیار پایین نگه داشت تا آرام آرام الگو اشباع شود، زیرا اگر فشار خیلی زیاد باشد، نفت به سرعت از خروجی خارج می‌شود و بعضی جاهای الگو اشباع نمی‌شود.

### تزریق آب

بعد از اشباع کامل الگو، تزریق آب اولین آزمایشی بود که انجام شد. به طور معمول آب از جاهایی می‌رود که مقاومت کم‌تری دارد، چون جابه جا کردن نفت سنگین کار آسانی نیست. جابه جایی نفت به وسیله‌ی آب به طور کامل پیستونی نیست،




**شکل ۲ـ مقایسه حلال‌های متفاوت.**

آب به طور معمول در وسط الگو حرکت می‌کند و قطعا نمی‌تواند همه‌ی نفت را جابه‌جا کند و در نتیجه بازدهی بسیار پایینی دارد.

### تزریق حلال

حلال‌های متفاوت مانند هپتان، اکتان و دکان در سرعت‌های متفاوت تزریق به نفت سنگین تزریق می‌شوند. تفاوت اصلی در تزریق آب و نفت این است که نفت و حلال به طور کامل و به هر نسبتی در هم حل می‌شوند و مکانیسم اصلی جریان پدیده نفوذ است، لذا بازدهی بالاتری دارد.

### عامل‌های موثر بر میزان بهره دهی در فرایند تزریق امتزاجی

#### انواع سیال تزریقی

#### اثر انواع حلال تزریقی

حلال‌های تزریقی در نفت می توانند به هر نسبتی حل شوند. هدف در این قسمت، بررسی اثر حلال‌های متفاوت در کم کردن ناروانی نفت است. این کم کردن ناروانی به خاطر حل شدن حلال سبک‌تر از نفت در نفت سنگین است. اگر در فرایندی پدیده نفوذ عامل مهمی باشد، سیالات با ضریب نفوذ بالاتر دارای منحنی غلظت تیزتری در الگو هستند. به طور کلی می‌توان از نفوذ در جهت حرکت سیال صرف‌نظر کرد، به خاطر این‌که اثری که حرکت سیال از خود به‌جا می‌گذارد چندین برابر اثر نفوذ است. اثر حلال‌های متفاوت در شکل ۲ رسم شده است. مشاهده می شود که هپتان بازدهی بیشتری از اکتان و اکتان بازدهی بیشتری از دکان دارد. دلیل اصلی این پدیده به خاطر این است که ضریب

(۱) Leakage


www.SID.ir

Archive of SID

نفوذ حلال سبک‌تر در نفت سنگین بیشتر است. علی‌رغم این‌که حلال سبک‌تر ناروانی کم‌تری دارد، و نسبت تحرک در این واکنش به عنوان یک عامل منفی بر برداشت اثر می‌گذارد. با وجود پدیده‌ی بالا مشاهده می‌شود بازده هپتان از همه حلال‌ها در این مقایسه بیشتر است. در واقع مفهوم این عبارت این است که پدیده‌ی انتقال ماده حتی در یک سیستم با ناروانی بالا مهم است.

## تزریق آب

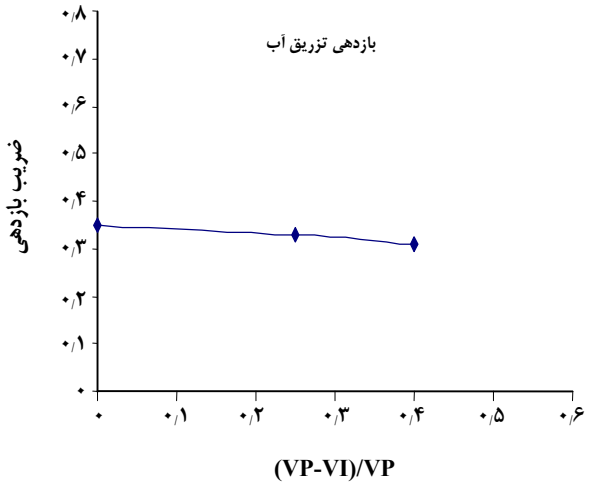
شرایط تزریق آب مشابه شرایط تزریق حلال است (تزریق با همان سرعت در همان الگوی محیط متخلخل). با توجه به این‌که فرایند تزریق آب یک فرایند غیر امتزاجی است، مشاهده می‌شود بعد از رویت قطره‌های آب در قسمت خروجی الگوی محیط متخلخل با افزایش میزان آب تزریقی، بازدهی تغییر قابل ملاحظه‌ای ندارد. شکل ۳ نمودار بهره دهی فرایند تزریق آب را نشان می‌دهد.

## مقایسه تزریق حلال و آب

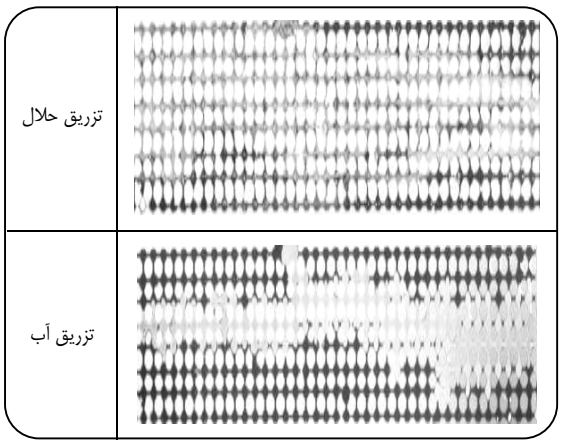
همان‌طوری که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بازدهی دکان از تمام حلال‌های مورد استفاده در شرایط یکسان کم‌تر است. در این‌جا بر آنیم که مقایسه‌ای بین بهره دهی آب و دکان داشته باشیم. در شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد که بازدهی تزریق دکان از بازدهی تزریق آب در مقدار تزریق های یکسان بیشتر است. مقدار بازدهی نهایی تزریق آب و دکان در شکل ۴ آمده و بازدهی دکان در حدود ۷۵ درصد و بازدهی نهایی آب در حدود ۳۹ درصد است.

## اثر سرعت تزریق حلال

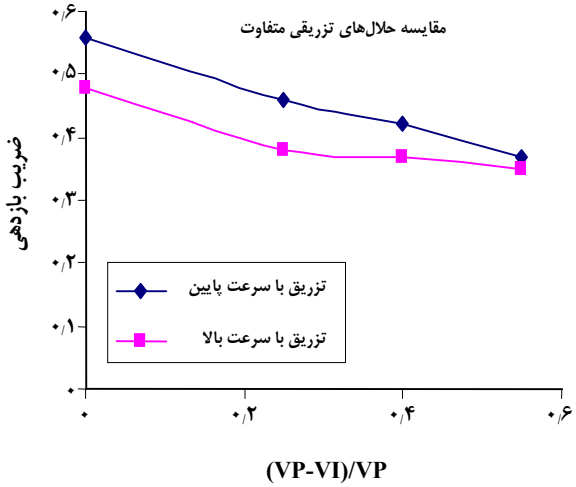
حلال‌های هیدروکربنی بعد از تزریق در الگوی محیط متخلخل حرکت می‌کنند. در این فرایند ممکن است پخش، فرایند مهم‌تری نسبت به نفوذ باشد. اگر سرعت تزریق در الگو خیلی زیاد باشد، آنگاه زمان کافی برای نفوذ در درون منفذ وجود ندارد، لذا باید سرعت تزریق طوری تنظیم شود که نفوذ عامل مهمی در برداشت نفت باشد. در این محیط، پخش طولی با زیاد شدن سرعت زیاد می‌شود. در تزریق با سرعت پایین‌تر، نفوذ عمودی نیز اتفاق می‌افتد که عامل مهمی در جاروب کردن نفت است. در این مرحله اثر سرعت تزریق بر بازدهی نفت سنگین مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌همین علت نوع نفت، الگوی محیط متخلخل و نوع سیال تزریقی مشابه است و ما فقط سرعت تزریق را تغییر می‌دهیم. سرعت‌های ۰٫۰۰۰۲ cc/min و ۰٫۰۰۰۴ cc/min مورد مطالعه قرار گرفتند.




شکل ۳ـ تزریق آب به الگو.



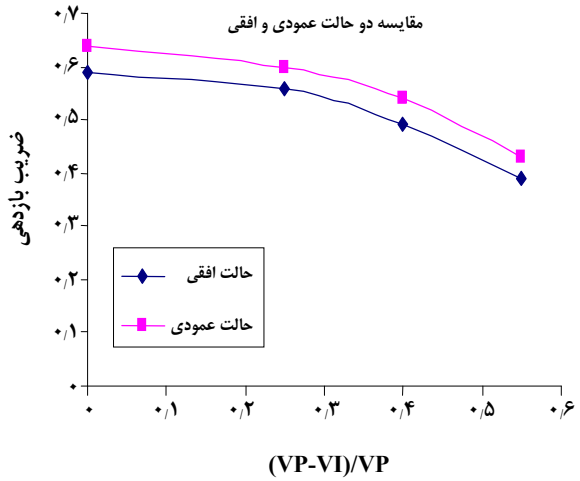

شکل۴ـ شمای از بازدهی نهایی آب و نفت.



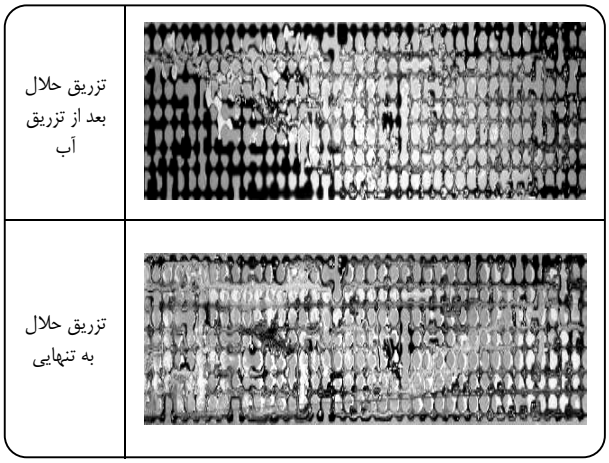

شکل ۵ـ مقایسه سرعت‌های متفاوت تزریق.


www.SID.ir

Archive of SID




**شکل ۶ ـ مقایسه‌ی دو حالت تزریق افقی وعمودی.**




**شکل۷ـ پدیده انسداد آب.**

نتیجه آنالیز فرایند تزریق در دو سرعت متفاوت در شکل ۵ آورده شده و مشاهده می‌شود که هر چه سرعت تزریق سیال پایین‌تر باشد، بازده بالاتری دارد، که با گذشت زمان بیشتر تفاوت این دو نمودار ملموس است زیرا در زمان‌های زیادتر فرصت برای فرایند نفوذ بیشتر است.

### اثر گرانش

هدف از این مطالعه، بررسی اثر گرانروی بر میزان بهره دهی نفت سنگین در الگوهای محیط متخلخل است. تفاوت چگالی حلال و نفت، باعث یک سری حرکت[۱] در محیط متخلخل می‌شود که میزان این حرکت بستگی به مقدار تفاوت چگالی و سرعت تزریق دارد. با توجه به این‌که در این آزمایش‌ها همواره چگالی حلال از چگالی نفت کم‌تر است و همچنین عمل تزریق از بالا به پایین الگوی محیط متخلخل صورت می‌گیرد، در نتیجه حلال، تمایلی برای حرکت به پایین الگو با توجه به سبک تر بودن نخواهد داشت. حلال از بالا با فشار تزریق می‌شود پس می‌تواند محیط بیشتری را ضمن حرکت خود جاروب کند. به عبارت دیگر، میزان بهره دهی در سیستم تزریق عمودی بیشتر از تزریق افقی است. مقایسه ای بین میزان برداشت در دو حالت عمودی و افقی با استفاده از آنالیز تصویرها در شکل ۶ آمده است. می‌توان نشان داد که برای رسیدن به بازدهی یکسان در دو حالت مذکور، باید در حالت تزریق افقی مقدار حلال بیشتری تزریق شود. این پدیده به معنای آن است که حتی در فرایندهای با نفت سنگین و ناروانی بالا، نیروی گرانشی عامل مهمی در افزایش بازده برداشت دارد.

### انسداد آب[۲]

در این قسمت، تزریق حلال به عنوان برداشت ثانویه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به این صورت که ابتدا به الگوی اشباع شده از نفت سنگین، آب تزریق می‌کنیم و بعد از مشاهده آب در قسمت خروجی الگو یعنی وقوع میان‌شکن[۳]، تزریق حلال را آغاز می‌کنیم. مشاهده می‌شود که آب موجود در الگو مانند یک مانع عمل کرده و اجازه نمی‌دهد که حلال و نفت به خوبی در هم حل شوند و از آن‌جایی که نفوذ در این فرایند بسیار مهم است و هر مانعی که بر سر تماس حلال و نفت قرار گیرد بر بازدهی این فرایند اثر منفی می‌گذارد. افزون بر این، مشاهده می‌شود که حلال تمایل دارد از مسیری عبور کند که در پیش آب آن را جاروب کرده است و این به خاطر وجود نفت سنگین است. شکل ۷ پدیده انسداد آب را نشان می‌دهد. همچنین نفت باقی مانده در الگو را در دو فرایند تزریق ثانویه حلال و تزریق ثالثیه حلال (تزریق حلال بعد از تزریق آب) را نشان می‌دهد. به وضوح دیده می‌شود که انسداد آب باعث کاهش بازدهی فرایند می شود. در این شکل رنگ سیاه نفت را نشان می دهد.

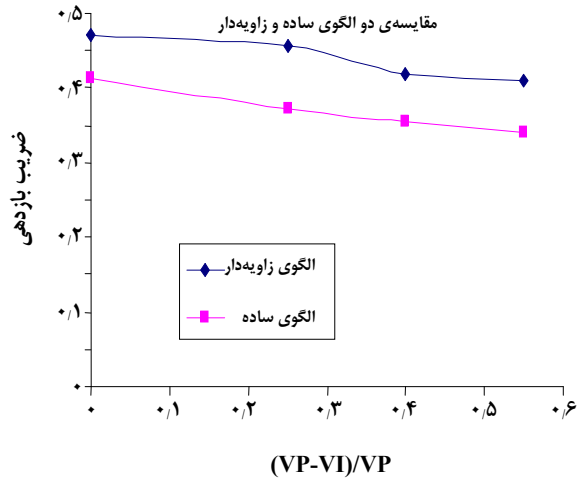
### اثر نحوه تزریق

در این مطالعه دو نوع الگوی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت.

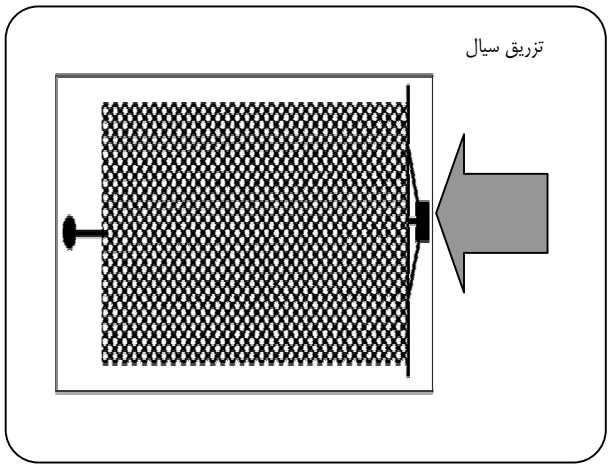
(۱) Movement
(۲) Water blockage
(۳) Breakthrough


www.SID.ir

Archive of SID




**شکل ۸ ـ مقایسه بازدهی در دو الگوی ساده و زاویه‌دار.**




**شکل ۹ـ نمونه تزریق در یک الگوی زاویه دار.**

الگوی اول، جهت تزریق به صورت مستقیم و در الگوی دوم، زاویه دهانه ها برابر ۳۰ درجه است. مشاهده می‌شود که هر چه از حالت مستقیم به حالت زاویه دار نزدیک می‌شویم، میزان بهره‌دهی بیشتر می‌شود. زیرا درحالت زاویه‌دار، ماده تزریقی دیرتر میان‌شکن می‌شود و همچنین ضریب نفوذ عمودی حلال در نفت، درحالت زاویه‌دار بیشتر است. این دو دلیل باعث می‌شود که در حالت زاویه دار بهره دهی بالاتری داشته باشیم که در شکل ۸ این موضوع به وضوح آمده است. در شکل ۹ زیر نمونه تزریق در یکی از الگوهای زاویه دار نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود زاویه بین دو pore به صورت زاویه دار است.

## نتیجه‌گیری نهایی

هدف از انجام این آزمایش‌ها، تزریق حلال و آب در الگوهای میکرومدلی و بررسی اثر پارامترهای متفاوت بر میزان بهره‌دهی نفت سنگین می‌باشدکه خلاصه نتیجه‌ها در زیر آورده شده است:

۱ـ تزریق حلال به صورت عمودی و از بالا به درون الگوی محیـط متخلخل بـاعث بالا رفتن میـزان بـرداشت نفت می‌شـود. این به معنای آن است که حتی در سیستم های با ناروانی بالا نیروی گرانش، عامل مهمی در افزایش برداشت است.

۲ـ بازدهی حلال‌هایی که وزن مولکولی پایین‌تری دارند بیشتر است. چون حلال‌های سبک‌تر ضریب نفوذ بالاتری دارند، لذا بیشتر نفوذ می‌کنند و باعث بازدهی بیشتری می‌شود. در این آزمایش‌ها بازده هپتان بیشتر از اکتان و دکان است.

۳ـ بازده برداشت نفت سنگین، در هنگام تزریق حلال با سرعت پایین‌تر بالاتر از وقتی است که با سرعت بالاتر تزریق می‌کنیم، زیرا در تزریق حلال با سرعت پایین‌تر فرصت کافی برای پدیده نفوذ وجود دارد.

۴ـ پدیده‌ی انسداد آب در تزریق حلال بعد از تزریق آب باعث می‌شود که بازدهی فرایند تزریق حلال کم‌تر از موقعی باشد که حلال به طور مستقیم تزریق می‌شود.

۵ـ میزان برداشت نفت سنگین در فرایند تزریق حلال بیشتر از میزان برداشت در فرایند تزریق آب است.

*تاریخ دریافت: ۸۵/۹/۲۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۴/۴*

## مراجع

[1] Salama, D. and Kantzas, A., “Experimental Observation of Miscible Displacement of Heavy Oils with Hydrocarbon Solvents”, SPE 97854, International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Nov. (2005).


www.SID.ir

Archive of SID

[2] Von Rosenberg, D. V., "On the Mechanics of Steady-State Single Phase Fluid Displacement from Porous Media", *AlChE Jour.*, March (1956).

[3] Salama, D. and Kantzas, A., "Monitoring of Diffusion of Heavy Oil with Hydrocarbon Solvent in Presence of Sand", SPE 97855, SPE International Thermal Operations and Heavy Oil, Calgary, Nov. (2005).

[4] Koch, H. and Slobod, R.L., "Miscible Slug Process", SPE 714-G, Petroleum Branch Fall Meeting, LosAngless, Nov. (1956).

[5] Blackwell, R.J. and Terry, J.R., "Factors Influence the Efficiency of Miscible Displacement", SPE 1131-G, Annual Fall Meeting of Society of Petroleum Engineering, Houston, Texas, Oct. (1958).

[6] Koval, E.T., "A Method for Predicting the Performance of Unstable Miscible Displacement in Heterogeneous Media", *Soc. Pet. Eng. J.*, June, (1963).

[7] O'Steen, B.L. and Huang, E.T.S., "Modeling of Trapping and Dendritic Oil Mobilization During Miscible Displacement", paper SPE 18082, presented at the 63rd SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas ,Oct. (1988).

[8] Coats, K.H. and Smith, B.D., "Dead End Pore Volume and Dispersion in Porous Media", Trans. AIME, *Soc. Pet. Eng. J.*, **231**, 73, March (1964).

[9] Salter, SJ. and Mohanty., K.K., "Multiphase Flow in Porous Media: Microscopic Observations and Modeling", paper SPE 11017, presented at the 57th SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA., Sept. (1982).

[10] Slobod, R. and Hewlett, E., "The Effect of Gravity Segregation in Laboratory Studies of Miscible Displacement in Vertical Unconsolidated Porous Media", SPE 743, Hudson Bay Oil and Gas Company, Calgary, March (1963).

[11] Gatlin, C. and Slobod, R, L., "The Alcohol Slug Process for Increasing Oil Recovery", Trans. AIME, Vol. 219, (1960).


www.SID.ir