

## بررسی آزمایشگاهی و توموگرافی عملکرد ژل‌های پلیمری برای کاهش تخلخل و تراوایی محیط‌های متخلخل

مینا کلاته آقامحمدی<sup>۱\*</sup>، جعفر قاجار، فریدون اسماعیل‌زاده، دانشکده شیمی نفت و گاز دانشگاه شیراز

### چکیده

تولید آب اضافی از مخازن هیدروکربوری یکی از مشکلات بزرگ صنعت نفت است که پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی بسیاری دارد. ژل‌های پلیمری کاربرد گسترده‌ای برای کاهش تولید آب اضافی حین تولید نفت و گاز از مخازن، با استفاده از مسدود کردن نواحی با تراوایی بالا و افزایش بازده جاروب‌زنی<sup>۱</sup> دارند. در این مقاله به بررسی عملکرد سیستم ژل پلیمری HPAM/PEI برای انسداد فضای حفرات و کاهش تراوایی با هدف کنترل تولید آب از مخازن پرداخته شده است. ابتدا ترکیب بهینه‌ی ژل و مدت پایداری با استفاده از آزمایشات بطری به‌عنوان یک روش استاندارد برای مشخص کردن خواص ژل پلیمری تعیین شد. سپس عملکرد و پایداری ژل با استفاده از تست‌های سیلاب‌زنی در نمونه‌های مغزه‌ی تمیز مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. سرانجام، تغییرات موضعی تخلخل ناشی از جریان ژل در مغزه با استفاده از داده‌های حاصل از تصاویر سه‌بعدی توموگرافی کامپیوتری (CT) محاسبه شده در حالت‌های قبل و بعد از تزریق ژل، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که سیستم ژل با غلظت ۱۵۰۰۰ قدم وزنی از HPAM و ۸۰۰۰ قدم وزنی از PEI عملکرد خوبی در کاهش تراوایی دارد و می‌تواند برای چندین ماه در حضور آب و در دمای بالا درون محیط متخلخل پایدار بماند. همچنین تصاویر سی‌تی‌اسکن نشان داد که توزیع تخلخل اولیه، تاثیر زیادی در عملکرد ژل برای مسدود کردن فضای منافذ دارد.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۹/۰۲/۲۵

تاریخ ارسال به داور: ۹۹/۰۲/۲۶

تاریخ پذیرش داور: ۹۹/۰۳/۱۶

### واژگان کلیدی:

ژل پلیمری، پلی‌آکریل‌آمید هیدرولیز شده، پلی‌اتیلن‌ایمین، کاهش تراوایی، کاهش تخلخل، سی‌تی‌اسکن.

### مقدمه

نامتجانس تراوایی عمل می‌کنند. [۱] و [۵-۱۵] فناوری ژل پلیمر مبتنی بر مخلوط با گرانبوی پایین متشکل از یک پلیمر و یک کراس‌لینکر<sup>۲</sup> است که با عنوان ژلانت<sup>۳</sup> شناخته می‌شود. پلیمر و کراس‌لینکر معمولاً در آب محلول هستند. ژلانت در سطح تهیه می‌شود و سپس در ناحیه‌ی موردنظر تزریق می‌شود. سپس ژلانت از طریق واکنش متقابل بین پلیمر و کراس‌لینکر با گذشت زمان و دما به یک ساختار شبکه‌ای سه‌بعدی می‌رسد. [۱۶] از ژل‌های پلیمری می‌توان برای بستن کامل یک لایه ماتریس یا یک شکستگی تولیدکننده‌ی آب استفاده کرد. ژل‌های پلیمری پایه‌ی آبی به‌طور گسترده‌ای برای کاهش یا بسته شدن کامل مناطق تولید آب استفاده می‌شود. پلی‌آکریل‌آمیدها متداول‌ترین نوع پلیمرها هستند که می‌توانند با استفاده از هر کراس‌لینکر آلی و غیرآلی برای کنترل تولید آب مورد استفاده قرار گیرند. ژل‌های پلیمری به‌طور کلی بر اساس نوع واکنش پلیمر-کراس‌لینکر به دو گروه تقسیم می‌شوند. اولین مورد مبتنی بر پیوند یونی بین گروه‌های کربوکسیلات در زنجیره‌ی پلی‌آکریل‌آمید هیدرولیز شده<sup>۴</sup> و کاتیون‌های سه‌ظرفیتی (کراس‌لینکر غیرآلی<sup>۵</sup>) است. [۱۷ و ۱۱] به‌طور مثال ژل‌های دارای پیوند غیرآلی از پیوند میان گروه کربوکسیلات با بار منفی روی PHPA<sup>۶</sup> و کاتیون‌های سه‌ظرفیتی با بار مثبت مانند  $Al^{3+}/Cr^{3+}$  حاصل می‌شوند. این نوع ژل‌ها

اغلب مخازن به‌دلیل تفاوت در توزیع اندازه‌ی حفرات، تراوایی و وجود شکاف، ژئولوژی پیچیده و ناهمگنی دارند. در میان خواص پتروفیزیکی مختلف، تراوایی یکی از مهم‌ترین فاکتورها در محاسبات مهندسی مخازن است. ناهمگنی مخزن یکی از دلایل بازیافت کم نفت و تولید زود هنگام آب است. [۱] تولید آب اضافی یکی از مشکلات جدی در صنعت نفت و گاز است و با گذشت عمر مخازن نفت و گاز افزایش می‌یابد. مشکلات زیادی از قبیل مشکلات اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی در ارتباط با تولید آب اضافی وجود دارند. تولید آب اضافی هزینه‌های اضافی ناشی از نیاز به جداسازی و دفع آب‌های آلوده و نگرانی‌های زیست‌محیطی به‌دلیل حضور مواد سمی مانند جیوه و آرسنیک در آب ایجاد می‌کند. نهایتاً این موارد می‌تواند منجر به پایان عمر اقتصادی چاه شود. [۴-۱]

روش‌های مختلف مکانیکی و شیمیایی در میدان‌های نفت و گاز جهت مواجهه با آب تولیدی ناخواسته به کار گرفته شده است. [۵] به‌ویژه روش تزریق ژل‌های پلیمری به‌عنوان یک روش شیمیایی برای مقابله با مشکلات تولید آب استفاده شده است. ژل‌های پلیمری برای افزایش بازده جاروب‌زنی و کاهش تولید آب اضافی طراحی شده‌اند و اثرات منفی ناهمگونی مخزن را به حداقل می‌رسانند. ژل‌های پلیمری با دو مکانیسم انسداد مسیریها و اصلاح تراوایی نسبی آب (کاهش

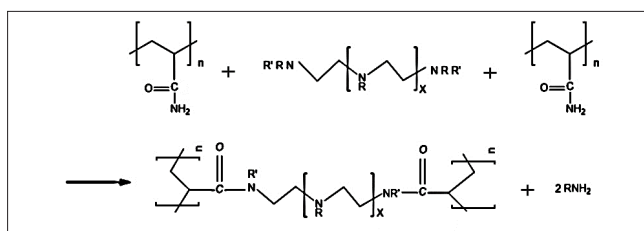
\* نویسنده‌ی عهد‌دار مکاتبات (Kalateh\_mina@yahoo.com)

گرفته است. اما، تاکنون مطالعه‌ی دقیق در مورد تغییرات تخلخل و نفوذپذیری نمونه‌های مغزه در اثر تزریق ژل در غلظت‌های مختلف و همچنین تاثیر ناهمگونی بر کاهش تخلخل و نفوذپذیری نمونه‌ها با تزریق ژل انجام نشده است. بنابراین، هدف از این مطالعه بررسی نفوذپذیری و تغییرات تخلخل موضعی در مقیاس منافذ ناشی از تزریق ژل پلیمری در محیط متخلخل با استفاده از داده‌های چگالی در مقیاس خاکستری تهیه شده از تصاویر سه بعدی CT در حالات قبل و بعد از تزریق ژل می‌باشد.

### ۱- روش کار

#### ۱-۱ آماده‌سازی محلول ژل پلیمری و مغزه‌ها

در این کار پلی‌آکریل‌امید هیدرولیز شده (HPAM) محلول در آب (شرکت آلدریچ) و پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI) (شرکت آلدریچ)، به ترتیب به‌عنوان پلیمر و کراس‌لینکر آلی سازگار با محیط‌زیست برای تشکیل ژل استفاده شدند. HPAM مورد استفاده دارای درجه هیدرولیز ۲۰-۱۵ درصد مولی و وزن مولکولی میانگین ۶-۵ میلیون دالتون (MD) است. آب مقطر به‌عنوان حلال، استفاده شد. مکانیسم ژله‌ای<sup>۱۵</sup> شدن برای سیستم ژل PEI/HPAM در شکل ۱ نشان داده شده است.



واکنش میان HPAM و PEI که نهایتاً منجر به تشکیل ژل می‌شود. [۲۱، ۷]

برای آماده‌سازی محلول‌های ژلانت با غلظت‌های مختلف ابتدا مقدار مشخصی از HPAM در آب مقطر حل شده و به مدت ۵ ساعت روی همزن مغناطیسی قرار گرفت تا محلول همگن شود. سپس محلول به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفت و سپس مقدار مشخص از کراس‌لینکر به محلول اضافه شد و مدت نیم ساعت به‌منظور همگن‌سازی هم زده شد.

همچنین در این مطالعه دو نمونه سندپک<sup>۱۶</sup> و یک مغزه‌ی کربناته مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات اندازه‌گیری شده مغزه‌ها در شرایط خشک قبل از آزمایش‌های تزریق ژل در جدول ۱ نشان داده شده است. سندپک از ماسه‌های کوارتز ریز ساخته شده و توسط یک رزین و یک سخت‌کننده در آزمایشگاه سیمان می‌شوند. مغزه‌ی کربناته از رخنمون<sup>۱۷</sup> سازند آسماری در جنوب‌غربی ایران انتخاب شد.

پایدارند و در مخازن با دمای پایین استفاده می‌شوند اما کیفیت این نوع ژل در دماهای بالا به‌علت تضعیف پیوند یونی کاهش می‌یابد. مورد دوم مبتنی بر پیوند کووالانسی بین کراس‌لینکر (کراس‌لینکر آلی) و پلیمرهای بر پایه‌ی پلی‌اکریل‌امید هستند. اغلب این ژل‌ها از پلیمر با پایه‌ی آکریل‌امیدی و کراس‌لینکر PEI تشکیل می‌شوند. سیستم ژل PEI<sup>۱۸</sup>/PatBA<sup>۱۹</sup> نمونه‌ای از این نوع سیستم است که در آن پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI) یک کراس‌لینکر آلی است. کراس‌لینکرهای آلی در طیف وسیعی از دما پایدار هستند که ممکن است به اتصال حاصل از پیوند کووالانسی که بسیار پایدارتر از پیوند یونی است، مرتبط باشد. [۱۸ و ۱۹]

المنتشری<sup>۱۰</sup> و همکارانش (۲۰۰۸)، عملکرد سیستم PAM/PEI در مغزه‌های ماسه‌سنگی Berea در ۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و افت فشار ۶۸/۹۵ بار را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. سیستم کاملاً محیط متخلخل را مسدود کرده و به مدت سه هفته پایدار ماند. [۱۸] الکرسانی<sup>۱۱</sup> و همکارانش (۲۰۱۵) سیستم ژل PAM/PEI را به‌عنوان یک سیستم ارزان‌قیمت مورد مطالعه قرار دادند و آن را با PatBA در آب‌شور با دمای ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مقایسه کردند. آنها برای ارزیابی سیستم ژل PAM/PEI در مغزه‌های ماسه‌سنگی و کربناته در دمای بالا از آزمایش‌های رئولوژیکی و سیلاب‌زنی مغزه استفاده کردند. برای نمونه‌های ماسه‌سنگی و کربناته کاهش نفوذپذیری به ترتیب معادل ۹۴ و ۹۹/۸ درصد مشاهده شد. [۱۶]

سریت<sup>۱۲</sup> (۱۹۹۲)، تاثیر نفوذپذیری سنگ بر عملکرد چندین نوع ژل پلیمری را بررسی کرد. او برای به‌دست آوردن کسری از منافذ پر از ژل، از تزریق آب‌نمک حاوی یدید پتاسیم استفاده کرد. در طول آزمایشات مغزه، قوی‌ترین ژل نفوذپذیری همه‌ی مغزه‌ها را تا حد زیادی (به چند میکرو داریسی) کاهش داد. همچنین، مطالعات با مواد ردیاب<sup>۱۳</sup> نشان داد که این ژل‌ها اغلب منافذ موجود را پر می‌کنند. در ژل‌های ضعیف‌تر، با افزایش نفوذپذیری سنگ، فاکتور مقاومت باقیمانده کاهش می‌یابد. مطالعات ردیاب برای این نوع ژل‌ها همچنین نشان داد که بخش کوچکی از منافذ موجود توسط ژل‌ها پر شده است. [۶] المنتشری، زیتا و ناصرالدین (۲۰۱۰)، جابه‌جایی سیستم ژل PAM/PEI را به‌صورت بصری با توموگرافی کامپیوتری مورد بررسی قرار دادند. کاهش نفوذپذیری بیش از ۹۴ درصد برای مغزه‌های قرار گرفته در دمای ۵۰ و ۴۵ درجه‌ی سانتی‌گراد محقق شد. در حالی که ژلانت از مغزه‌های ماسه‌سنگی بسته شده<sup>۱۴</sup> در دمای ۲۱ درجه‌ی سانتی‌گراد، با استفاده از آب‌نمک حاوی سدیم یدید بسته شدند. [۲۰]

مطالعات انجام شده اغلب مکانیسم‌های تشکیل ژل و پایداری آن در شرایط مخزن را مورد بررسی قرار داده است. همچنین در برخی مطالعات کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها با تزریق ژل مورد بررسی قرار

شبکه‌ی ژل خارج می‌شود و از این رو باعث انقباض ژل می‌شود. [۱۴] با مقایسه‌ی جرم ژل با جرم اصلی ژلانت می‌توان میزان سینرسیس را اندازه گرفت. [۲۲] گاهی اوقات سینرسیس برای همه‌ی ژل‌ها اتفاق نمی‌افتد در حالی که استحکام آنها کاهش می‌یابد. در این موارد، کد استحکام ژل به‌طور منظم برای نظارت بر پایداری سیستم‌های ژل تعیین می‌شود. در این مطالعه از ثبت مداوم کدهای استحکام برای تعیین پایداری ژل در آزمایشات استاتیک (آزمایش بطری) استفاده شده و همچنین ثابت ژل در مغزه‌ها پس از آزمایش‌های تزریق ژل بررسی شده است.

### ۳-۲-۱- آزمایشات سیلاب‌زنی سندپک

فرآیند انجام تست‌های تزریق به این صورت است که، نمونه‌ها شسته و خشک شدند و سپس در شرایط خلأ با آب، اشباع شدند و تخلخل اولیه‌ی نمونه‌ها توسط روش اشباع محاسبه شد. جهت محاسبه‌ی تراوایی نمونه‌ها آب با دبی‌های مختلف تزریق شد و افت فشار در نمونه اندازه‌گیری شد. سپس تراوایی مطلق نمونه‌ها از رابطه‌ی داری برای جریان خطی در محیط متخلخل، معادله‌ی ۱، محاسبه شد.  $k$  تراوایی مطلق،  $Q$  دبی در واحد  $\mu\text{m}^3/\text{s}$ ، گرانیروی در واحد  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ،  $\Delta P$  افت فشار در طول مغزه در واحد  $\text{Pa}$ ،  $A$  سطح مقطع مغزه  $2\text{m}$  و  $L$  طول مغزه در واحد  $m$  هستند.

$$k = Q\mu L / A\Delta P \quad (1) \text{ رابطه‌ی (۱)}$$

در مرحله‌ی بعد محلول ژل به درون مغزه‌ها تزریق شد و سپس در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفت تا به استحکام کافی برسد. برای محاسبه‌ی مدت زمان لازم در این مرحله برای رسیدن به استحکام کافی، از تست بطری استفاده شد به این صورت که یک بطری حاوی همان ژل همزمان با مغزه در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار داده شد و در زمان‌های مختلف حالت ژل بررسی شد. زمانی که ژل درون بطری به استحکام کافی رسید مغزه از آن خارج شد و تخلخل و تراوایی آن با روش ذکر شده اندازه‌گیری شد.

### ۳-۱- تصاویر توموگرافی کامپیوتری

امروزه به‌منظور بررسی کیفیت مخزن و ارزیابی میزان تولید، اطلاعات در مورد خصوصیات پتروفیزیکی مخزن اهمیت زیادی دارد. در این بین، تعیین میزان تخلخل مخزن و البته پیوستگی این حفرات همچنین تعیین جنس سنگ‌های تشکیل‌دهنده‌ی مخزن و ویژگی‌های آن از اهمیت بالایی برخوردار است. به این منظور روش‌های مختلفی جهت تعیین این خصوصیات در طول زمان به کار گرفته شده است. یکی از این روش‌ها که در چند سال اخیر مورد ارزیابی قرار گرفته است، استفاده از تصاویر سی‌تی‌اسکن مغزه است. این تصاویر به‌وسیله‌ی نرم‌افزارهای آنالیزگر تصویر مورد آنالیز و

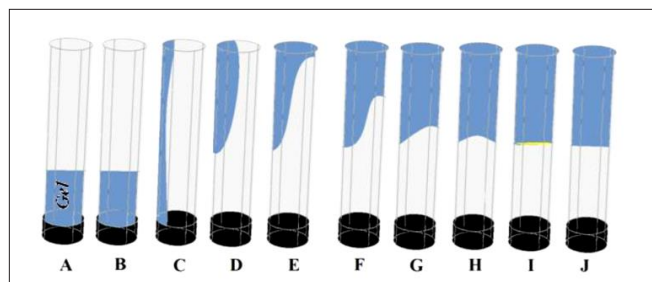
کد نمونه	طول (cm)	قطر (cm)	$\phi$ (%)	K (D)
S1	۵/۵۰	۳/۶۵	۲۰/۷۰	۳/۵۰
S3	۵/۵۵	۳/۶۶	۳۱/۵۰	۸/۰۴
R1	۴/۴۵	۲/۵۴	۱۲/۴۲	۰/۱۵

### ۲-۱- روند تست‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق، دو نوع آزمایش: آزمایش بطری (استاتیک) و آزمایش سیلاب‌زنی انجام شده است. از آزمایشات استاتیک برای کسب بینش در مورد زمان ژل شدن و استحکام ژل‌ها در شرایط مختلف و بهینه‌سازی غلظت HPAM و PEI استفاده شد. غلظت بهینه‌سازی شده برای بررسی اثر ژل‌های پلیمری در کاهش تراوایی و تخلخل محلی استفاده شد.

### ۱-۲-۱- اندازه‌گیری زمان ژل شدن و استحکام

قبل از انجام آزمایشات سیلاب‌زنی، لازم است پارامترهایی مانند زمان ژل شدن<sup>۱۸</sup>، استحکام ژل<sup>۱۹</sup> و پایداری ژل تعیین شود. روش آزمایش بطری، به‌عنوان یک روش آزمایشگاهی استاندارد، اندازه‌گیری نیمه‌ی کمی از خواص ژل مانند استحکام ژل و سرعت ژل شدن را فراهم می‌کند. [۹] در این روش، ژل درون بطری ریخته می‌شود و در دمای موردنظر قرار می‌گیرد. سپس بطری در بازه‌های زمانی معینی معکوس می‌شود و حالت ژل در هنگام تشکیل ثبت می‌شود. در این روش، استحکام ژل با توجه به حالت ژل مشاهده شده از (۱) تا (۱۰) نامگذاری شده است. (شکل ۲) در این کار، از روش آزمایش بطری برای بررسی تاثیر برخی پارامترها از جمله غلظت HPAM و PEI، دما و شوری آب تشکیل‌دهنده بر زمان بندش، استحکام ژل و پایداری استفاده شد.



شکل ۲ | تعریف کد استحکام ژل در روش تست بطری با استفاده از کدهای جدول سیدانسک [۹]

### ۲-۲-۱- اندازه‌گیری پایداری ژل

ناپایداری سیستم ژل عمدتاً ناشی از پدیده‌ی سینرسیس<sup>۲۰</sup> و کاهش گرانیروی ژل است. سینرسیس فرآیندی است که طی آن آب از

## ۲- بحث روی نتایج تست‌ها

## ۲-۱- تعیین غلظت بحرانی پلیمر، بررسی اثر غلظت پلیمر و کراس‌لینکر بر زمان بندش و استحکام ژل

غلظت بحرانی، حداقل غلظتی است که در آن پلیمر می‌تواند در حضور کراس‌لینکر تشکیل ژل بدهد. به این منظور غلظت‌های ۴۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۷۰۰۰ قدم وزنی از پلیمر HPAM و غلظت ۴۰۰۰ قدم وزنی از کراس‌لینکر جهت بررسی انتخاب شد. تمام تست‌ها در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شدند. نتایج در جدول ۲ آورده شده است. نتایج نشان داد که برای غلظت ۴۰۰۰ قدم وزنی از پلیمر هیچ ژلی تشکیل نمی‌شود و در غلظت ۵۰۰۰ قدم وزنی از پلیمر ژل تشکیل می‌شود ولی پس از مدت کوتاهی از بین می‌رود. بنابراین غلظت ۵۰۰۰ قدم وزنی به‌عنوان غلظت بحرانی پلیمر تعیین شد. برای بررسی اثر غلظت با استفاده از روش تست بطری، محلول ژلانت با غلظت‌های مختلف ۵۰۰۰، ۷۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ قدم وزنی از پلیمر و ۳۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۶۰۰۰ قدم وزنی از کراس‌لینکر در آب‌مقطر

بررسی قرار گرفته و پارامترهای مختلف از آنها استخراج می‌شود. به کمک این تصاویر می‌توان مدل سه بعدی از تخلخل و کل مغزه را به‌دست آورد. چگالی سنگ و شعاع گلوگاه‌های تخلخل از دیگر پارامترهای قابل اندازه‌گیری در این روش هستند. اساس کار این دستگاه بر مبنای اختلاف چگالی است بنابراین با توجه به اختلاف چگالی سنگ و سیال می‌توان از این روش برای بررسی خواص سنگ مخزن استفاده کرد. در این روش یک‌سری اشعه‌ی X به نمونه تابانده می‌شود و اشعه‌ی خارج شده از آن ثبت می‌شود. بسته به چگالی جسمی که در معرض تابش قرار می‌گیرد، اشعه‌ی بازگشتی ضعیف‌تر از اشعه‌ی تابیده شده است. به این ترتیب با ثبت میزان اشعه‌ی خارج شده از جسم می‌توان تصویر جسم را تشکیل داد.

قانون بیر رابطه‌ی بین شدت X-Ray تابیده شده (I) و شدت X-Ray باقیمانده (پس از تضعیف توسط جسم) (I) را با رابطه‌ی زیر تعریف می‌کند که  $\psi$  ضریب میرایی خطی، X ضخامت جسم در واحد متر است.

$$I = I_0 \exp(-\psi x) \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

رابطه‌ی بین عدد اتمی و انرژی اشعه X توسط معادله‌ی زیر بیان می‌شود:

$$\psi = \rho [\sigma(E) + (bZ^{7/8} / E^{3/2})] \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

که در این رابطه  $\rho$  چگالی الکترونی،  $\sigma(E)$  ضریب Klien-Nishina و b ثابت،  $Z$  عدد اتمی موثر شی و E انرژی فوتون اشعه‌ی X بر حسب Kev است. عدد سی‌تی‌اسکن معمولاً در واحد هانسفیلد بیان شده و با ضریب میرایی به‌شکل زیر رابطه دارد:

$$H = 1000 \times (\psi / \psi_0 - 1) \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

که در آن H ضریب میرایی در واحد هانسفیلد،  $\psi$  ضریب میرایی خطی میانگین در هر وکسل و  $\psi_0$  ضریب میرایی آب است. [۲۰ و ۱۲]

## ۱-۳-۱- آنالیز تصاویر سی‌تی‌اسکن

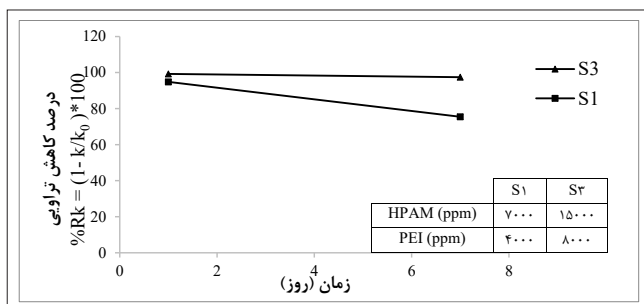
عملکرد ژل برای یک مغزه‌ی کربناته ( $R_1$ ) با استفاده از روش تصویربرداری سه بعدی مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار چهار مرحله تصویربرداری از مغزه خشک، اشباع با آب، مغزه‌ی خشک پس از تزریق ژل و مغزه‌ی اشباع با آب پس از تزریق ژل انجام شد. آنالیزها با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شد. پیش از هرگونه مقایسه، ابتدا تصاویر نمونه قبل و بعد از تزریق ژل تطابق داده شده و قسمت‌های اضافی آن حذف شد.

جدول ۲ | تعیین غلظت بحرانی پلیمر

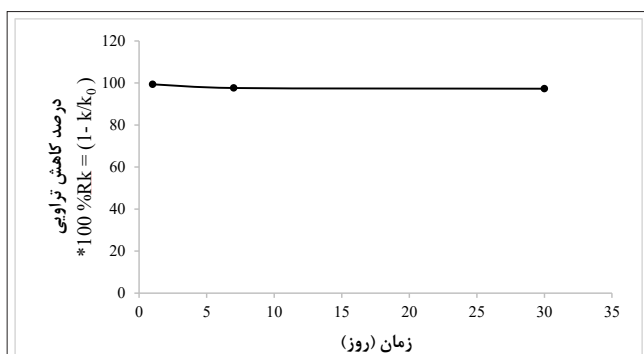
غلظت پلیمر (PPm)			K (D)
۴۰۰۰	۵۰۰۰	۷۰۰۰	
A	A	A	۱
A	A	A	۵
A	A	C	۱۰
C	B	F	۲۰
C	D	H	۴۰
C	B	H	۷۰
-	-	H	۱۰۰
-	-	H	۱۲۰

تهیه شد. تمام تست‌ها در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد. نتایج مربوط به زمان بندش و استحکام ژل در اشکال ۳ و ۴ آورده شده است.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، با افزایش غلظت پلیمر، زمان بندش کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش غلظت پلیمر، تعداد سایت‌های پلیمر برای کراس‌لینکر افزایش می‌یابد. بنابراین نرخ تشکیل ژل افزایش می‌یابد که منجر به کاهش زمان بندش می‌شود. با افزایش غلظت کراس‌لینکر هم زمان بندش کاهش می‌یابد اما اثر کاهش‌ی آن نسبت به پلیمر کمتر است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش غلظت پلیمر و کراس‌لینکر استحکام ژل افزایش می‌یابد. اما غلظت پلیمر بیشترین تاثیر را دارد و افزایش بیش از حد غلظت کراس‌لینکر باعث سینرسیس ژل می‌شود.



شکل ۵ | تغییرات کاهش تراوایی با زمان

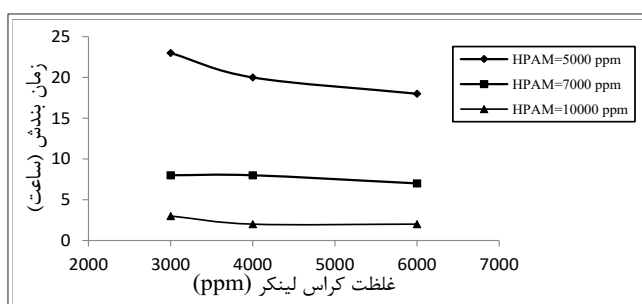


شکل ۶ | تغییرات کاهش تراوایی با زمان برای نمونه S3

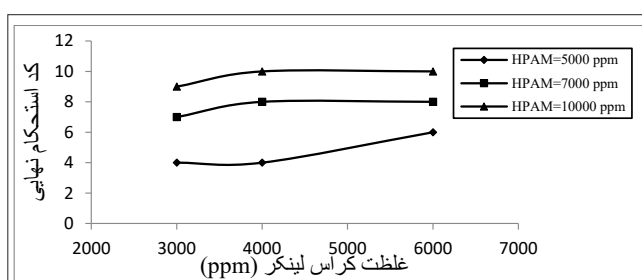
این تست برای نمونه‌ی S3 با غلظت‌های ۸۰۰۰/۱۵۰۰۰ از پلیمر و کراس‌لینکر، تا یک‌ماه ادامه یافت به‌طوری‌که این نمونه به‌مدت یک‌ماه و درون آب و در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفت و سپس تراوایی نمونه و درصد کاهش تراوایی محاسبه شد. نتایج مربوط به درصد کاهش تراوایی برای این مغزه با گذشت زمان در شکل ۶ آورده شده است. با توجه به این‌که تغییر محسوسی در میزان کاهش تراوایی دیده نمی‌شود می‌توان نتیجه گرفت که ژل در این مدت درون مغزه پایدار بوده است. بنابراین لازم است جهت حفظ پایداری ژل در محیط متخلخل، از غلظت‌های بالاتر ژل استفاده شود. بنابراین غلظت ۸۰۰۰/۱۵۰۰۰ قدم وزنی در بازه‌ی مورد بررسی به‌عنوان غلظت بهینه تعیین شد.

### ۲-۳- آنالیز تصاویر سی‌تی‌اسکن

تغییرات تخلخل در طول مغزه و همچنین تصاویر مربوط به ۳ مقطع از مغزه در حالت قبل و بعد از تزریق ژل در شکل ۷ رسم شده است. لازم به ذکر است که این تصاویر، تصاویر خام سی‌تی‌اسکن نیستند بلکه با توجه به مقادیر عدد سی‌تی‌اسکن نقشه‌های رنگی در مقاطع مختلف سنگ توزیع چگالی را نشان می‌دهند. عدد سی‌تی‌اسکن مربوط به سنگ بالاتر از ۳۰۰۰ است و برای هوا ۱۰۰۰- است. سی‌تی‌اسکن



شکل ۷ | تغییرات زمان بندش با تغییر غلظت کراس‌لینکر برای غلظت‌های مختلف پلیمر



شکل ۸ | تغییرات کد استحکام نهایی با تغییر غلظت کراس‌لینکر برای غلظت‌های مختلف پلیمر

### ۲-۲- بررسی پایداری ژل در محیط متخلخل

برای بررسی پایداری ژل درون محیط متخلخل دو نمونه محلول ژلانت با غلظت‌های ۴۰۰۰/۷۰۰۰ قدم وزنی از پلیمر و کراس‌لینکر و ۸۰۰۰/۱۵۰۰۰ از پلیمر و کراس‌لینکر در محیط متخلخل مقایسه شد. ابتدا تراوایی اولیه‌ی دو نمونه اندازه‌گیری شد. سپس ژل داخل نمونه‌ها تزریق و تراوایی آنها پس از تزریق ژل محاسبه شد. سپس نمونه‌ها به‌مدت یک هفته داخل آب و در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفتند. بعد مجدداً تراوایی آنها اندازه‌گیری شد. میزان کاهش تراوایی بر حسب درصد از رابطه‌ی مقابل محاسبه شد که  $K_{after}$  تراوایی پس از تزریق ژل و  $K_{before}$  تراوایی قبل از تزریق ژل و PPR<sup>۲۳</sup> درصد کاهش تراوایی است.

$$PPR = 100 \times (1 - K_{after} / K_{before}) \quad (۵)$$

همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، درصد کاهش تراوایی در مغزه‌ی حاوی ژل با غلظت ۴۰۰۰/۷۰۰۰ قدم وزنی از HPAM/PEI مقدار ۹۴/۸۲ درصد و برای مغزه‌ی حاوی ژل با غلظت ۸۰۰۰/۱۵۰۰۰ قدم وزنی، ۹۹/۳۸ درصد بود. مقدار درصد کاهش تراوایی پس از یک هفته برای مغزه‌ی حاوی ژل با غلظت ۴۰۰۰/۷۰۰۰ قدم وزنی از پلیمر و کراس‌لینکر به ۷۵/۴۵ درصد کاهش یافت که ناشی از تضعیف ژل در دمای بالا است. درصد کاهش تراوایی در مغزه‌ی حاوی ژل با غلظت ۸۰۰۰/۱۵۰۰۰ تغییر محسوسی نداشت.



تراوایی نمونه (mD)	تخلخل (CT)	تخلخل آزمایشگاهی	نمونه سنگ R1
۱۵۳/۷	۱۳/۲۹	۱۲/۴۲	قبل از تزریق ژل
۳۳/۹۱	۱۰/۱۶	۱۰/۶۸	بعد از تزریق ژل

آزمایشگاهی، تخلخل اولیه ۱۲/۴۲ درصد و تخلخل نهایی ۱۰/۶۸ درصد، نیز مطابقت دارد.

### ۳- نتیجه گیری

۱- غلظت‌های مختلف از HPAM/PEI جهت تشکیل ژل مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت پلیمر و کراس‌لینکر زمان ژل شدن کاهش و استحکام ژل افزایش می‌یابد. برای ادامه‌ی تست‌ها دو غلظت (۴۰۰۰/۷۰۰۰ و ۸۰۰۰/۱۵۰۰۰) با کد استحکام نهایی مناسب یعنی بالاتر از H انتخاب شدند.

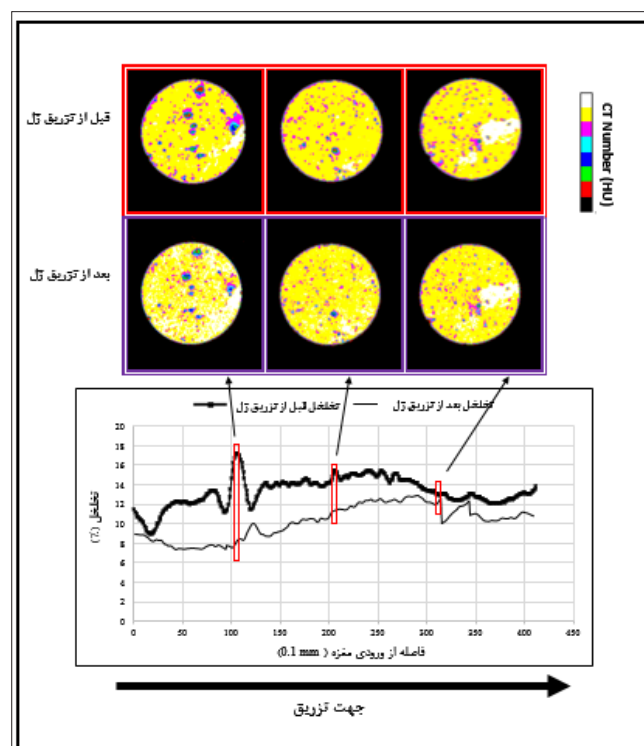
۲- دو غلظت ذکر شده از نظر پایداری مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که درصد کاهش تراوایی ناشی از تزریق ژل با غلظت ۴۰۰۰/۷۰۰۰ از HPAM/PEI درون مغزه طی یک هفته از ۹۴/۸۲ درصد به مقدار ۷۵/۴۵ درصد کاهش می‌یابد که ناشی از تضعیف ژل در دمای بالا است. بنابراین این ژل نمی‌تواند مدت زیادی در دمای بالا پایدار بماند و با گذشت زمان تخریب خواهد شد.

۳- برای غلظت ۸۰۰۰/۱۵۰۰۰ قدم وزنی از HPAM/PEI درصد کاهش تراوایی پس از یک هفته از ۹۹/۲۴ درصد به ۹۷/۴۲ درصد کاهش یافت. درصد کاهش تراوایی برای این نمونه پس از یک‌ماه ۹۷/۲ درصد اندازه‌گیری شد.

۴- نتایج تزریق ژل درون محیط متخلخل نشان داد که غلظت بهینه‌ی ژل عملکرد خوبی در جهت کاهش تراوایی دارد که می‌تواند تا چندین ماه در مخزن پایدار بماند. در واقع، غلظت ۸۰۰۰/۱۵۰۰۰ قدم وزنی از HPAM/PEI در بازه‌ی مورد بررسی به‌عنوان غلظت بهینه، تراوایی مغزه را بیش از ۹۷ درصد کاهش داد و این ژل تا یک‌ماه تقریباً بدون تغییر در دمای ۱۰۰ درجه درون مغزه باقی ماند. بنابراین روش تزریق ژل پلیمری می‌تواند روش کارآمدی برای کاهش تراوایی محیط‌های ناهمگن باشد.

۵- در این کار همچنین ما توانایی روش تصویربرداری سه بعدی با اشعه‌ی X را برای ارزیابی کمی و کیفی تغییرات تخلخل و ناهمگنی در طول مغزه، ناشی از تزریق ژل بهینه در مغزه، نشان دادیم. تحلیل

گرفته شده از یک نمونه ژل نشان داد که عدد سی‌تی‌اسکن مربوط به ژل پلیمری حدود ۲۰ می‌باشد. به دلیل عدد سی‌تی‌اسکن پایین ژل، انسداد حفرات و گلوگاه‌ها در تصاویر خام واضح نیست. بنابراین با تبدیل تصاویر خام به تصاویر رنگی می‌توان تغییرات تخلخل در طول نمونه را بهتر مشاهده کرد. همان‌طور که نمودار توزیع تخلخل (شکل ۷) نشان می‌دهد، بیشترین تغییرات در تخلخل در محل‌هایی رخ می‌دهد که بزرگ‌ترین حفرات را دارند.



شکل ۷ | تغییرات توزیع تخلخل در طول مغزه قبل و بعد از تزریق ژل

مقایسه‌ی تصاویر نشان می‌دهد که ژل مسیرهای بزرگ‌تر و حفرات درشت‌تر را برای حرکت انتخاب می‌کند و بیشترین تغییرات در این نواحی دیده می‌شود در حالی که حفرات ریزتر کم‌ترین تغییرات را دارند و مقایسه‌ی کلی دو نمودار نشان می‌دهد که مغزه پس از تزریق ژل همگن‌تر شده است. همچنین نتایج حاصل از اندازه‌گیری تراوایی و تخلخل قبل و بعد از تزریق ژل در جدول ۳ آورده شده است.

تحلیل نتایج تصاویر سی‌تی‌اسکن با نرم‌افزار متلب نشان می‌دهد که تخلخل نمونه از مقدار اولیه ۱۳/۲۹ درصد به مقدار ۱۰/۱۶ درصد پس از تزریق ژل کاهش یافته است که با نتایج حاصل از تست‌های

#### ۴- اختصارات

- HPAM: پلی آکریل آمید هیدرولیز شده  
 PEI: پلی اتیلن ایمین  
 K: تراوایی  
 CT: سی تی اسکن  
 φ: تخلخل  
 ppm: قدم وزنی (قسمت در میلیون) ■

نتایج تصاویر سی تی اسکن نشان داد که تخلخل نمونه از مقدار اولیه‌ی ۱۳/۲۹ درصد به مقدار ۱۰/۱۶ درصد پس از تزریق ژل کاهش یافته است که با نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی، تخلخل اولیه ۱۲/۴۲ درصد و تخلخل نهایی ۱۰/۶۸ درصد، نیز مطابقت داشت. نتایج حاصل از تصاویر سی تی اسکن نشان داد در یک محیط ناهمگن، ژل به مسیره‌های بزرگ‌تر نفوذ می‌کند و تخلخل و تراوایی آن را کاهش می‌دهد و نهایتاً محیط را همگن تر می‌کند.

#### پانویس‌ها

- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| 1. Sweep efficiency                                 | 13. Tracer                            |
| 2. Cross linker                                     | 14. Shut in                           |
| 3. Gelant   | 15. Gelation                          |
| 4. Hydrolyzed polyacrylamide                        | 16. Sand pack                         |
| 5. Inorganic crosslinker                            | 17. Outcrop                           |
| 6. Partially hydrolyzed polyacrylamide              | 18. Gelation time                     |
| 7. Trivalent chromium (Cr(III))/ trivalent aluminum | 19. Gel strength                      |
| 8. Polyacrylamide/tert-butyl acrylate               | 20. Syneresis                         |
| 9. Polyethylenimine                                 | 21. Permeability after gel treatment  |
| 10. Al-Muntasheri                                   | 22. Permeability before gel treatment |
| 11. El-Karsani                                      | 23. Percent permeability reduction    |
| 12. Seright   |                                       |

#### منابع

- [1]. Lee J. H. and Lee K. S., "Performance of gel treatments in reservoirs with multi-scale heterogeneity," J. Chem., vol. 2013, 2013.
- [2]. El Karsani K. S. M., Al Muntasheri G. A., Sultan A. S., and Hussein I. A., "Impact of salts on polyacrylamide hydrolysis and gelation: new insights," J. Appl. Polym. Sci., vol. 131, no. 23, 2014.
- [3]. El-Karsani K. S. M., Al-Muntasheri G. A., and Hussein I. A., "Polymer systems for water shutoff and profile modification: a review over the last decade," Spe J., vol. 19, no. 01, pp. 135-149, 2014.
- [4]. Alqam M. H., Nasr-El-Din H. A., and Lynn J. D., "Treatment of super-K zones using gelling polymers," in SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, 2001.
- [5]. Bailey B et al., "Water control," Oilf. Rev., vol. 12, no. 1, pp. 30-51, 2000.
- [6]. Seright R. S., "Impact of permeability and lithology on gel performance," in SPE/DOE Enhanced Oil Recovery Symposium, 1992.
- [7]. Jia H. et al., "New insights into the gelation behavior of polyethylenimine cross-linking partially hydrolyzed polyacrylamide gels," Ind. Eng. Chem. Res., vol. 51, no. 38, pp. 12155-12166, 2012.
- [8]. Al-Muntasheri G. A., Nasr-El-Din H. A., Al-Noaimi K., and Zitha P. L. J., "A study of polyacrylamide-based gels crosslinked with polyethyleneimine," SPE J., vol. 14, no. 02, pp. 245-251, 2009.
- [9]. Sydansk R. D., "Conformance improvement in a subterranean hydrocarbon-bearing formation using a polymer gel," 4683949, Aug. 1987.
- [10]. Seright R. S., "Reduction of gas and water permeabilities using gels," SPE Prod. Facil., vol. 10, no. 02, pp. 103-108, 1995.
- [11]. Karimi S., Kazemi S., and Kazemi N., "Syneresis measurement of the HPAM-Cr (III) gel polymer at different conditions: An experimental investigation," J. Nat. Gas Sci. Eng., vol. 34, pp. 1027-1033, 2016.
- [12]. Al-Muntasheri G. and Zitha P., "Gel under Dynamic Stress in Porous Media: New Insights using Computed Tomography," Proc. SPE Saudi Arab. Sect. Tech. Symp., no. 2002, 2009, doi: 10.2118/126068-MS.
- [13]. Seright R. S. and Martin F. D., "Impact of gelation pH, rock permeability, and lithology on the performance of a monomer-based gel," SPE Reserv. Eng., vol. 8, no. 01, pp. 43-50, 1993.
- [14]. Jia H., Pu W.-F., Zhao J.-Z., and Jin F.-Y., "Research on the gelation performance of low toxic PEI cross-linking PHPAM gel systems as water shutoff agents in low temperature reservoirs," Ind. Eng. Chem. Res., vol. 49, no. 20, pp. 9618-9624, 2010.
- [15]. Karimi S., Esmailzadeh F., and Mowla D., "Identification and selection of a stable gel polymer to control or reduce water production in gas condensate fields," J. Nat. Gas Sci. Eng., vol. 21, pp. 940-950, 2014.
- [16]. ElKarsani K. S. M., Al Muntasheri G. A., Sultan A. S., and Hussein I. A., "Performance of PAM/PEI gel system for water shut off in high temperature reservoirs: Laboratory study," J. Appl. Polym. Sci., vol. 132, no. 17, 2015.
- [17]. Ganguly S., Willhite G. P., Green D. W., and McCool C. S., "Effect of flow rate on disproportionate permeability reduction," in International Symposium on Oilfield Chemistry, 2003.
- [18]. Al-Muntasheri G. A., Nasr-El-Din H. A., and Zitha P. L. J., "Gelation Kinetics and Performance Evaluation of an Organically Crosslinked Gel at High Temperature and Pressure," SPE J., vol. 13, no. 03, pp. 337-345, 2008, doi: 10.2118/104071-PA.
- [19]. Liu Y., Dai C., You Q., Zou C., Gao M., and Zhao M., "Experimental Investigation on a Novel Organic-Inorganic Crosslinked Polymer Gel for Water Control in Ultra-High Temperature Reservoirs," in SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, 2017.
- [20]. Al-Muntasheri G. A., Zitha P. L. J., and Nasr-El-Din H. A., "A new organic gel system for water control: a computed tomography study," SPE J., vol. 15, no. 01, pp. 197-207, 2010.
- [21]. Reddy B. R., Dalrymple L. Eoff, E. D., Black K., Brown D., and Rietjens M., "A natural polymer-based cross-linker system for conformance gel systems," SPE J., vol. 8, no. 02, pp. 99-106, 2003.
- [22]. Bryant S. L., Rabaioli M. R., and Lockhart T. P., "Influence of Syneresis on Permeability Reduction by Polymer Gels," SPE Prod. Oper., vol. 11, no. 4, pp. 209-215 %& 209, 1996, doi: 10.2118/35446-PA.