

نشریه علمی-تخصصی

پژوهش‌های نوین علوم مهندسی

ماهنامه علمی-تخصصی پژوهش‌های نوین علوم مهندسی
سال دوم، بهمن و اسفند ۱۳۹۶، شماره ۱۳ و ۱۴

**تاثیر استفاده از ترکیب نانو سیلیس و متاکائولن در بتن حاوی لاستیک ریزدانه
دانه بازیافتی بر خصوصیات مکانیکی بتن**

نوید چلنگران، محمدمهدی جباری

**مطالعه آزمایشگاهی اثر امولسیون کننده و نانوذرات بر تولید نفت از مخازن نفتی
شکاف‌دار**

عبدالحمید انصاری، اکبر ثابت

**کاربرد روش المان مجزا در مکانیسم شکست دیسک‌های شبه سنگی حفره دار و
بررسی مقاومت کششی آن‌ها**

حسن سرفراز، محمدفاروق حسینی، آرمین راست بود

**مطالعه آزمایشگاهی استفاده از بازدارنده‌های ترمودینامیکی برای جلوگیری از
تشکیل پدیده هیدرات گازی در پالایشگاه ششم پارس جنوبی**

عبدالحمید انصاری، محمد کشتکار

**مطالعه آزمایشگاهی بررسی بهبود بازیافت نفت با استفاده از سورفکتانت
کاتیونی و پلیمر با فرآیند سیلاب زنی**

ربابه پرواز، اسدالله ملک زاده

NRES.ir

پژوهش‌های نوین علوم مهندسی

ماهنامه علمی-تخصصی پژوهش‌های نوین علوم مهندسی،
سال دوم، شماره سیزدهم و چهاردهم، بهمن و اسفند ۱۳۹۶

صاحب امتیاز و مدیر مسئول:
امیرحسین یوسفی
سر دبیر: میلاد فتاحی
مدیر داخلی: منیژه ملائی

اعضای شورای علمی نشریه:

جناب آقای دکتر محمدعلی ارجمند، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی
جناب آقای دکتر شهرور اسدی، دانشگاه شهید بهشتی
جناب آقای دکتر رضا افضل، دانشگاه خواجه نصرالدین طوسی
جناب آقای دکتر علی جباری، دانشگاه اراک
سرکارخانم دکتر ساغر جارچی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی
جناب آقای دکتر چنگیز دهقانیان، دانشگاه تهران
جناب آقای دکتر نعمت حسینی، دانشگاه شهید بهشتی
سرکارخانم دکتر راحله خادمیان، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی
جناب آقای دکتر علی رحمانی، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی
سرکارخانم دکتر فائزه رحمانی، دانشگاه خواجه نصرالدین طوسی
جناب آقای دکتر قدرت الله رودینی، دانشگاه سیستان و بلوچستان
جناب آقای دکتر محبعلی رهدار، دانشگاه سیستان و بلوچستان
جناب آقای دکتر مرتضی زیودار، دانشگاه سیستان و بلوچستان
جناب آقای دکتر محمدحسین کاظمی، دانشگاه شاهد
جناب آقای دکتر علی فروغی، دانشگاه تبریز
جناب آقای دکتر علی لکی روحانی، دانشگاه زنجان
جناب آقای دکتر سیدحمید هاشمی، دانشگاه اراک

۰۲۱ ۳۳۲۰۲۴۸۷



۰۲۶ ۳۲۷۲۴۷۸۷



۰۲۱ ۴۳۸۵۷۱۲۴

۰۲۶ ۳۲۷۴۷۱۵۸

تهران: افسریه ۱۵، متری چهارم، کوچه ۳۸، پلاک ۲۸، واحد ۲
کرج: چهارراه هفت تیر، خیابان لاله ۱، پلاک ۱۴، طبقه همکف

فراخوان پذیرش مقاله

توسعه پرشتاب و گسترده علوم به ویژه در حوزه فنی و مهندسی، انجام اقدامات علمی برای معرفی دستاوردهای علمی را بیش از پیش ضروری کرده است. توسعه پایدار ایران اسلامی، مستلزم ایجاد زیرساخت‌های علمی به ویژه در حوزه علوم مهندسی است. موسسه مدیریت دانش شباک با همکاری اساتید برجسته دانشگاهی با هدف معرفی پژوهش‌های علوم مهندسی و ایجاد فرصتی برای تبادل مطالعات و تجارب در این حوزه، نشریه پژوهش‌های نوین علوم مهندسی را منتشر می‌کند.

تحریریه به منظور انتشار گسترده پژوهش‌های روزآمد از اساتید، صاحب‌نظران، مهندسان، دانشجویان، کارشناسان، پژوهشگران و علاقه‌مندان علوم مهندسی، دعوت می‌کند تا با ارائه مقالات علمی ارزشمند خود، از طریق وبسایت نشریه به نشانی www.nres.ir ضمن مشارکت فعال به غنای این نشریه کمک نمایند. برای ارسال مقاله به نشریه کافی است تا در وبسایت نشریه ثبت‌نام نموده و با ورود به پنل کاربری، مقاله خود را ثبت کنید. پس از بررسی اولیه و داوری علمی از طرف تحریریه جهت انتشار مقاله با نویسنده مسئول تماس گرفته می‌شود.

موضوعات نشریه پژوهش نوین علوم مهندسی:

- مهندسی صنایع
- مهندسی عمران
- مهندسی مکانیک
- مهندسی معدن
- مهندسی هوا فضا
- مهندسی مواد و متالورژی
- مهندسی برق و الکترونیک
- مهندسی انرژی و فیزیک
- مهندسی شیمی، نفت و پلیمر
- مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات
- مبانی علوم مهندسی
- مدیریت دانش در علوم مهندسی

فهرست مقالات

صفحه	عنوان مقاله
۱	تاثیر استفاده از ترکیب نانو سیلیس و متاکائولن در بتن حاوی لاستیک ریزدانه دانه بازیافتی بر خصوصیات مکانیکی بتن نوید چلنگران، محمدمهدی جباری
۹	مطالعه آزمایشگاهی اثر امولسیون کننده و نانوذرات بر تولید نفت از مخازن نفتی شکافدار عبدالحمید انصاری، اکبر ثابت
۲۷	کاربرد روش المان مجزا در مکانیسم شکست دیسک‌های شبه‌سنگی حفره‌دار و بررسی مقاومت کششی آنها حسن سرفراز، محمدفاروق حسینی، آرمین راست بود
۳۷	مطالعه آزمایشگاهی استفاده از بازدارنده‌های ترمودینامیکی برای جلوگیری از تشکیل پدیده هیدرات گازی در پالایشگاه ششم پارس جنوبی عبدالحمید انصاری، محمد کشتکار
۵۱	مطالعه آزمایشگاهی بررسی بهبود بازیافت نفت با استفاده از سورفکتانت کاتیونی و پلیمر با فرآیند سیلاب زنی ربابه پرواز، اسدالله ملک زاده

تأثیر استفاده از ترکیب نانو سیلیس و متاکائولن در بتن حاوی لاستیک ریزدانه دانه بازیافتی بر خصوصیات مکانیکی بتن

نوید چلنگران^۱، محمدمهدی جبّاری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

۲- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

jabbari@iaushiraz.ac.ir

چکیده

سال‌هاست که لاستیک فرسوده خودروها و نبودن راهی مناسب برای بازیافت یا استفاده دوباره آن‌ها، باعث مشکلات زیست‌محیطی شده است. به علت زیاد بودن چقرمگی لاستیک، می‌توان از این خصوصیت برای افزایش چقرمگی بتن استفاده نمود که در صورت خرد کردن لاستیک، می‌توان خرده لاستیک را جایگزین بخشی از سنگ‌دانه بتن کرد و مقادیر بسیار زیادی از لاستیک فرسوده را در بتن‌ریزی‌های حجیم مصرف نمود؛ اما همین جایگزینی باعث کاهش معیارهای مقاومتی بتن می‌گردد. هنگامی می‌توان از خرده لاستیک بازیافتی در بتن استفاده کرد که بتوان ضعف مقاومتی بتن را جبران کرد. در این پژوهش ۱۳ طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفت. لاستیک ضایعاتی با اندازه ۱ تا ۳ میلی‌متر جایگزین ۵، ۱۰ و ۱۵٪ از ماسه شده و به جهت جبران کاهش معیارهای مقاومتی و همچنین افزایش مقاومت از ترکیب دو افزودنی نانو سیلیس و متاکائولن با مقادیر بهینه استفاده شده و مقاومت فشاری و کششی (برزیلین) اندازه‌گیری شده است. نتایج حاکی از تأثیرات مثبت استفاده از دو افزودنی نانو سیلیس و متاکائولن بر مقاومت فشاری و کششی بتن حاوی خرده لاستیک می‌باشد. مشاهده می‌گردد با اضافه شدن نانو سیلیس و متاکائولن به طرح مخلوط، مقاومت فشاری و کششی ۵ الی ۱۰ درصد افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: نانو سیلیس، متاکائولن، مقاومت فشاری، خرده لاستیک

۱. مقدمه

سالانه بیش از ۲۴۲ میلیون تایر فرسوده فقط در آمریکا دور انداخته می‌شود، این مقدار فقط متعلق به کشور آمریکا بوده و ۱،۲٪ از وزن کل ضایعات شهری را به خود اختصاص داده است [۱]. جدا از لاستیک ضایعات شهری، سالانه چند بیلیون لاستیک در دره‌ها دفن می‌گردد یا به آتش کشیده می‌شود که به‌غیر از آلودگی‌های محیط زیستی، بروی سلامتی انسان نیز تأثیرات مخرب دارد [۲].

اضافه کردن خرده لاستیک به آسفالت، باعث افزایش پلاستیسیته آسفالت شده و در انقباض و انبساط دمایی، از ترک خوردن و جمع شدگی آسفالت جلوگیری می‌کند [۳]. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای پیرامون استفاده و کاربرد خرده لاستیک در بتن شده است. بررسی تأثیر اندازه لاستیک بر خواص مقاومتی بتن نشان داده که اگرچه مقاومت بتن حاوی لاستیک کاهش می‌یابد ولی ظرفیت پلاستیک بتن به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد [۴]. جایگزینی خاکستر لاستیک تایر به‌عنوان بخشی از ماسه، باعث کاهش هوای موجود در بتن، افزایش زمان‌گیرش، افزایش مقاومت فشاری و خمشی می‌گردد،

همچنین تأثیرات مثبت مقاومتی در برابر آسیب‌های ذوب و یخ‌بندان دارد [۵]. استفاده از حجم کم لاستیک در بتن، خطر پوسته‌شدن ناگهانی بتن در دماهای زیاد را کاهش می‌دهد [۶]. با جایگزینی لاستیک به‌جای ماسه باعث به تعویق افتادن پیدایش اولین ترک در بتن، کاهش درصد ناحیه ترک و افزایش انعطاف‌پذیری بتن می‌گردد [۷]. اگر دانه‌های لاستیکی دارای سطح خشن باشند و یا با آب یا اسید، پیش عمل‌آوری شده باشند، چسبندگی بهتری با مخلوط بتن خواهند داشت و ممکن است منجر به کسب مقاومت فشاری بهتری شود [۸].

با جایگزینی خرده لاستیک به‌جای ریزدانه مقاومت فشاری حدوداً ۶۵٪ کاهش می‌یابد و با جایگزینی خرده لاستیک به‌جای درشت‌دانه، مقاومت فشاری حدوداً ۸۵٪ کاهش خواهد یافت [۹]. با اضافه کردن خرده لاستیک با اندازه ۴٫۷۵ میلی‌متر به مقدار ۱ تا ۱۰٪ وزنی سیمان به بتن، تغییر چندانی در مقاومت فشاری بتن مشاهده نشده است [۱۰]. یکی از عواملی که باعث کاهش مقاومت بتن در طرح‌های حاوی خرده لاستیک می‌گردد این است که سوراخ‌های ریز موجود در دانه‌های لاستیکی از آب پر می‌شود و موجب ایجاد حفرات می‌گردد [۱۱]. بتن حاوی درشت‌دانه لاستیکی بار فشاری زیادی را پس از گسیختگی تحمل می‌کند و تغییر مکان‌های زیادی را بدون متلاشی شدن به نمایش می‌گذارد. این جابجایی‌ها و تغییر شکل‌ها، پس از باربرداری قابل بازگشت هستند. این رفتار نشان‌دهنده جذب انرژی زیاد بتن حاوی لاستیک می‌باشد [۱۱].

۲. برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش، در ابتدا طرح مخلوط بر اساس ACI به‌گونه‌ای طراحی گردید که اسلامپ بین ۵۰ الی ۷۰ میلی‌متر باشد. مقاومت فشاری برای نمونه‌ها با ابعاد ۱۵*۱۵ سانتی‌متر در سنین ۱۴۰۷ و ۲۸ روز اندازه‌گیری شده و مقاومت کششی و مدول الاستیسیته با ابعاد استوانه ۱۵*۳۰ سانتی‌متر ساخته و برای سن ۲۸ روزه اندازه‌گیری شده است. هر افزودنی به‌صورت جداگانه، برای سه درصد متفاوت جایگزینی معیارهای مقاومتی بررسی گردید. در آخر مقاومت فشاری بهینه نانو سیلیس، متاکائولن اندازه‌گیری و با بیشترین مقدار وزنی خرده لاستیک ترکیب گردید.

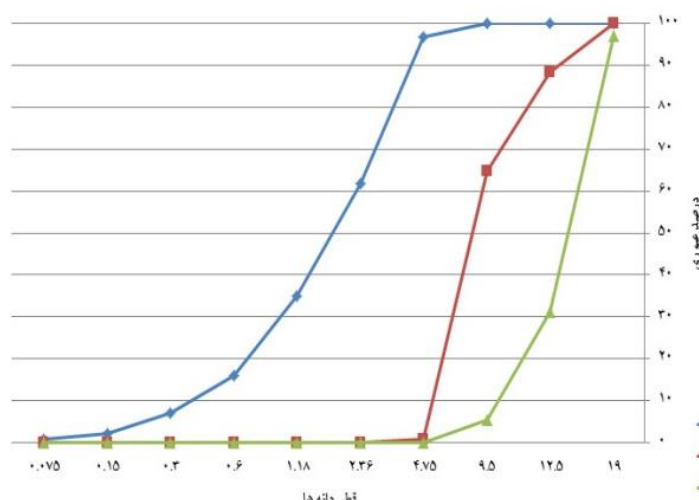
۲-۱. مصالح

سیمان مورد استفاده در این پژوهش تیپ ۲ فارس نو می‌باشد، این سیمان مقاومت در برابر حمله سولفات و کلرایدها بوده و دارای گرمای هیدراسیون کمتری می‌باشد. آنالیز شیمیایی این سیمان در جدول شماره ۱ آمده است. متاکائولن مورد استفاده در این پژوهش ساخته‌شده توسط شرکت 20micron می‌باشد که آنالیز شیمیایی آن در جدول شماره ۱ موجود می‌باشد. پودر نانو سیلیس مصرف‌شده، از شرکت نانو ساو خریداری‌شده، این نوع نانو سیلیس دارای ابعاد ۲۰ نانومتر می‌باشد و آنالیز شیمیایی این پودر در جدول شماره ۱ توضیح داده‌شده است.

جدول ۱- ساختار شیمیایی مواد سیمانی مورد استفاده

نانو سیلیس	متاکائولن	سیمان	ترکیب شیمیایی (%)
۹۸	۵۱٫۸۵	۲۱	Sio2
-	۴۳٫۸۷	۵٫۴	Al2O3
۰٫۲۹۴	۰٫۹۹	۴٫۲۱	Fe2O3
۰٫۳۹۳	۰٫۲	۶۳٫۵۹	CaO
-	۰٫۱۸	۱٫۷	MgO
۰٫۱۸۵	-	۱٫۸	SO3
-	۰٫۱۲	۰٫۸	K2O
۰٫۳۲۸	۰٫۰۱	۰٫۱۲	Na2O
-	۰٫۵۷	۱٫۳۸	L.O.I

لاستیک استفاده شده از نوع تایر ضایعاتی خودرو بوده که در دو اندازه متفاوت خرد شده است. لاستیک‌های خرد شده با ابعاد 1 الی 3 میلی‌متر بانام Pr نام‌گذاری شده است. لاستیک ضایعاتی حاوی سیم و پود می‌باشد که جهت حصول بهترین نتیجه، پود و سیم اضافی با تکان دادن و چرخاندن خرده لاستیک‌ها در سطل، از لاستیک جداسازی شده است. ماسه مصرفی از نوع معدنی بوده و با وزن مخصوص خشک ۲۵۹۰ و حداکثر بعد ۴٫۷۵ میلی‌متر می‌باشد که نمودار دانه‌بندی آن در تصویر ۱ آمده است. در طرح اختلاط از شن نخودی با وزن مخصوص خشک ۲۶۲۰ و حداکثر بعد ۱۲٫۵ میلی‌متر و شن بادامی با وزن مخصوص خشک ۲۶۰۰ و حداکثر بعد ۱۹ میلی‌متر استفاده شده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه

فوق روان کننده مصرفی بانام تجاری super plast P.C 5000N بر پایه کربوکسیلات اثر بوده که با ایجاد ممانعت فضایی بین ذرات، باعث پخش و یکنواخت شدن بتن و مانع از به هم چسبیدن دوباره ذرات می‌گردد همچنین کاهش ۳۰٪ آب اختلاط را در پی دارد.

۲-۲. طرح مخلوط

طرح اختلاط با توجه به دستورالعمل استاندارد aci 211 طراحی گردید [۱۲]. طرح بر اساس اشباع با سطح خشک محاسبه شده و رطوبت سنگ‌دانه از آب اختلاط کسر شده است. بدین منظور ۴ طرح اختلاط بتن با مقاومت هدف ۴۰ مگاپاسکال طراحی گردید که هر کدام از طرح‌های اختلاط شامل ۳ دسته هستند. نسبت آب به سیمان ۰٫۲۹ لحاظ گردیده است و به واسطه کاهش و افزایش فوق روان کننده، مقدار اسلامپ اندازه‌گیری شده در تمامی طرح‌ها 50 ± 20 میلی‌متر بوده است. در هنگام ساخت بتن، ابتدا فوق روان کننده با آب ترکیب کرده و درون میکسر ریخته شده‌اند، سپس افزودنی (نانو سیلیس و یا متاکائولن) را در آب ریخته، پس از آن سنگ‌دانه و سیمان، از درشت‌دانه تا ریزدانه وارد میکسر کرده و به مدت ۲ دقیقه، اختلاط توسط میکسر صورت پذیرفته است. در طرح‌های حاوی خرده لاستیک، جهت اختلاط بهتر، ابتدا خرده لاستیک را با ماسه ترکیب کرده سپس مانند طرح‌های قبل وارد میکسر کرده. پس از میکس کامل بتن، ابتدا اسلامپ بتن مشخص گردیده و سپس اقدام به نمونه‌برداری شده است، لازم به ذکر است که در تمامی نمونه‌برداری‌ها، قالب‌ها در سه لایه پر شده، هر لایه ۲۵ ضربه کوبیده شده و در نهایت صاف گردیده و در حوضچه نگهداری قرار داده شده‌اند. در جدول ۲، جزئیات طرح اختلاط بتن آمده است.

به علت جذب آب زیاد نانو سیلیس و متاکائولن، جهت ترکیب صحیح و یکنواخت مصالح، استفاده از فوق روان کننده قوی، اجتناب‌ناپذیر است و در صورت عدم استفاده از فوق روان کننده، طرح اختلاط با کاهش آب و عدم اختلاط صحیح مواجه خواهد شد.

جدول ۲- طرح مخلوط بتن

مشخصات نمونه	شن (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	نانو سیلیس (kg/m^3)	متاکائولن (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)	لاستیک (kg/m^3)	اسلامپ (mm)
control	۹۹۲	۸۸۴,۰۶	۲۸۲,۶	-	-	۱۳۰,۰۲	۰,۸۵	-	۶۰
N 1%	۹۹۲	۸۸۴,۰۶	۲۷۹,۷	۲,۸	-	۱۳۰,۰۲	۰,۸۵	-	۴۵
N 3%	۹۹۲	۸۸۴,۰۶	۲۷۴,۱	۸,۴	-	۱۳۰,۰۲	۱,۱	-	۴۰
N 5%	۹۹۲	۸۸۴,۰۶	۲۶۸,۴	۱۴,۱	-	۱۳۰,۰۲	۱,۲	-	۳۵
M 5%	۹۹۲	۸۸۴,۰۶	۲۶۸,۴	-	۱۴,۱	۱۳۰,۰۲	۱,۱	-	۵۵
M 10%	۹۹۲	۸۸۴,۰۶	۲۵۴,۳	-	۲۸,۲	۱۳۰,۰۲	۱,۲	-	۶۰
M 15%	۹۹۲	۸۸۴,۰۶	۲۴۰,۲	-	۴۲,۳	۱۳۰,۰۲	۱,۳۵	-	۴۵
Pr 5%	۹۹۲	۸۳۹,۸۵	۲۸۲,۶	-	-	۱۳۰,۰۲	۰,۸۵	۴۴,۲	۵۵
Pr 10%	۹۹۲	۷۹۵,۶۵	۲۸۲,۶	-	-	۱۳۰,۰۲	۰,۹	۸۸,۴	۵۰
Pr 15%	۹۹۲	۷۵۱,۴۵	۲۸۲,۶	-	-	۱۳۰,۰۲	۱	۱۳۲,۶	۴۵
15%M.3%N.5%PR	۹۹۲	۸۳۹,۸۵	۲۳۱,۷	۸,۴	۴۲,۳	۱۳۰,۰۲	۱,۷	۴۴,۲	۴۵
15%M.3%N.10%PR	۹۹۲	۷۹۵,۶۵	۲۳۱,۷	۸,۴	۴۲,۳	۱۳۰,۰۲	۱,۸	۸۸,۴	۵۰
15%M.3%N.15%PR	۹۹۲	۷۵۱,۴۵	۲۳۱,۷	۸,۴	۴۲,۳	۱۳۰,۰۲	۱,۹	۱۳۲,۶	۵۵

۳. بحث و نتایج

مقاومت فشاری و مقاومت کششی طبق استانداردهای BS EN 12390 و ASTM C469 صورت پذیرفته است [۱۳]. آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن توسط دستگاه جک بتن شکن ۲۰۰ تن صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است سرعت بارگذاری در تمامی آزمایش‌ها ۰,۵ Mpa/s به صورت ثابت در نظر گرفته شده است. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، برای تمامی طرح‌های اختلاط ۹ نمونه مکعبی ۱۵*۱۵ سانتی‌متر، در سنین ۲۸, ۱۴, ۷ روز ساخته شده‌اند. همچنین برای آزمایش کشش (برزیلین) که توسط محفظه برزیلین صورت پذیرفته است، برای هر طرح اختلاط ۳ نمونه ۱۵*۳۰ در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفته است. در تصاویر ۲ - الف دستگاه جک بتن شکن جهت سنجش مقاومت فشاری بتن و در تصویر ۲-ب دستگاه جک بتن شکن حاوی محفظه برزیلین جهت سنجش مقاومت کششی به تصویر کشیده شده است.



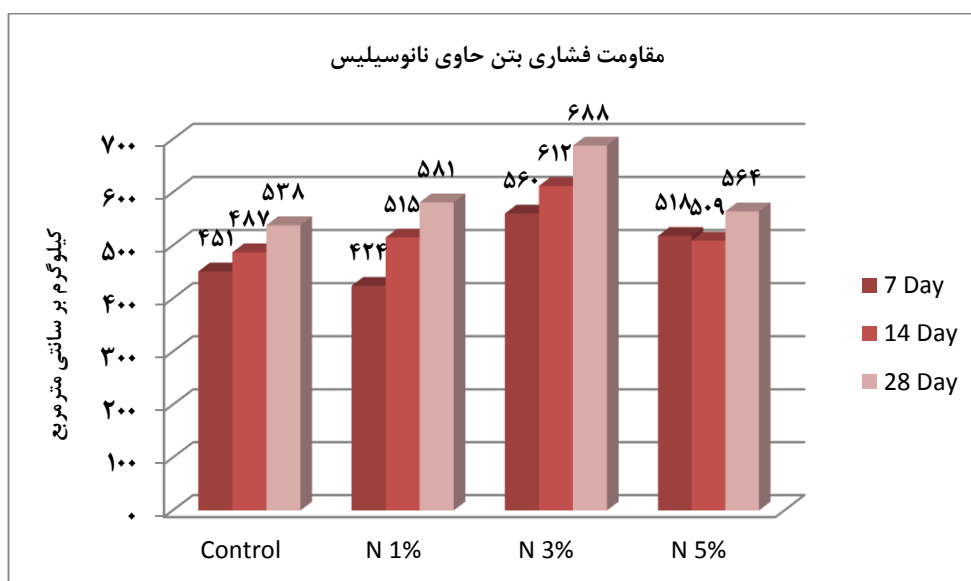
تصویر ۲-ب- آزمون کشش (برزیلین)



تصویر ۲-الف- سنجش مقاومت فشاری بتن

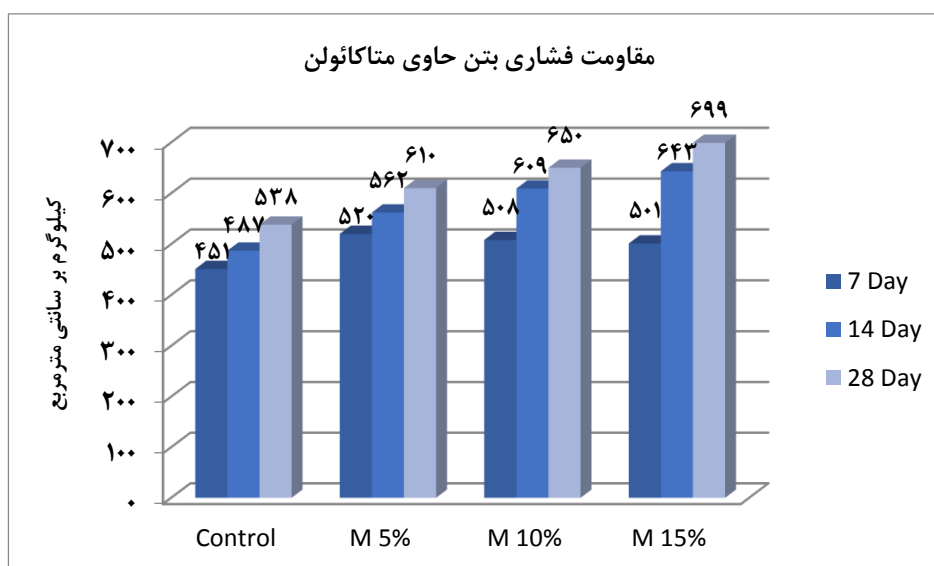
۱-۳. مقاومت فشاری

در تصویر ۳ مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری در طرح‌های حاوی نانو سیلیس، بیشترین افزایش مقاومت را نمونه‌های حاوی ۳٪ نانو سیلیس داشتند که مقاومت ۲۸ روزه به نسبت نمونه شاهد تقریباً ۲۵٪ افزایش مقاومت داشته است.



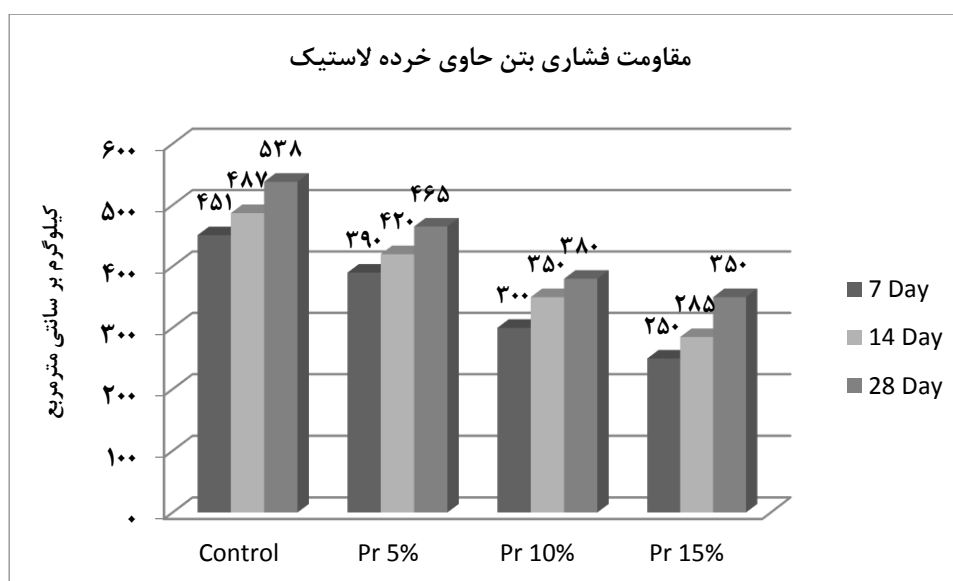
تصویر ۳- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانو سیلیس

در نمونه‌های حاوی متاکائولن، بیشترین مقاومت فشاری را نمونه‌های حاوی ۱۵٪ متاکائولن داشتند که تقریباً ۳۰٪ افزایش مقاومت فشاری را کسب کرده‌اند، در تصویر ۴، نمودار تغییرات مقاومت فشاری بتن حاوی متاکائولن آورده شده است.



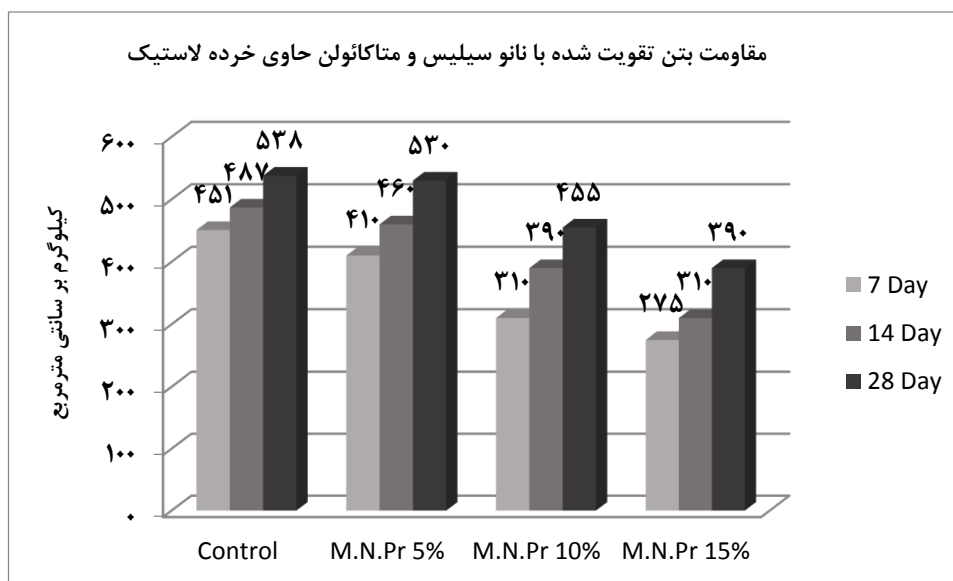
تصویر ۴- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی متاکائولن

در نمونه‌های حاوی لاستیک که در تصویر ۵ به تصویر کشیده شده‌اند، بیشترین مقاومت را نمونه‌های حاوی ۵٪ خرده لاستیک کسب کرده و با افزایش مقدار لاستیک، شاهد کاهش مقاومت فشاری خواهیم بود.



تصویر ۵- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی لاستیک

با ترکیب مقادیر بهینه مقاومتی، جهت افزایش خصوصیات مقاومتی بتن، مشاهده می‌گردد، نمونه حاوی ۱۵٪ خرده لاستیک و مقادیر بهینه نانو سیلیس و متاکائولن، مقاومت فشاری ۳۹۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع را کسب نموده است. نتایج ترکیب این افزودنی‌ها در تصویر ۶ آمده است.



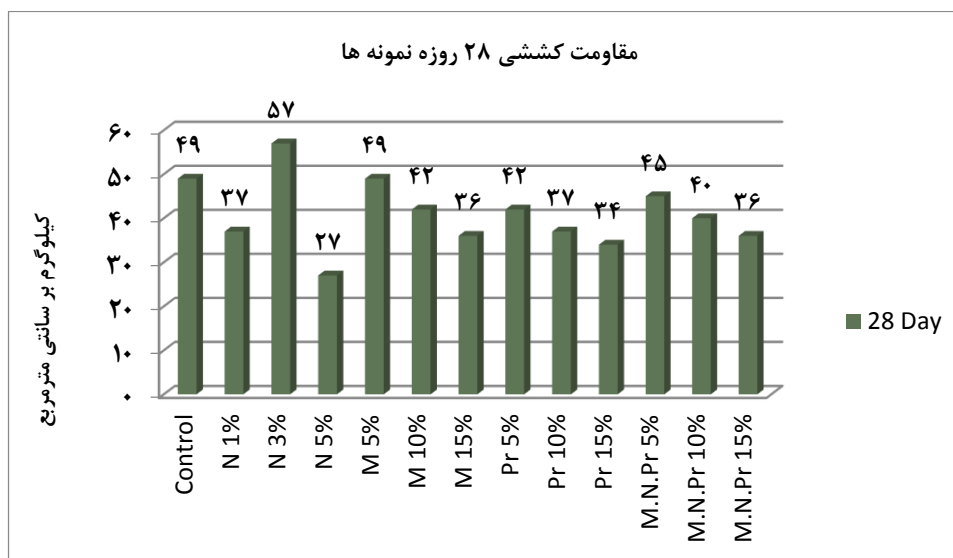
تصویر ۶- مقاومت فشاری نمونه‌های ترکیب نانو سیلیس، متاکائولن و خرده لاستیک

۲-۳. مقاومت کششی

جهت انجام آزمایش مقاومت کششی، نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵*۳۰ سانتی‌متری را درون محفظه برزیلین قرار داده و درون دستگاه جک بتن شکن قرار داده، پس از شکسته شدن نمونه، نیروی اعمالی را در رابطه (۱-۱) قرار داده و مقاومت کششی را محاسبه کرده‌ایم.

$$T = \frac{P}{\pi \times l \times d}$$

رابطه (۱-۱):



تصویر ۷- مقاومت کششی نمونه‌ها در تمامی طرح‌های اختلاط

همان‌گونه که در تصویر ۷ مشخص شده است، نمونه‌های حاوی ۱۵٪ متاکائولن، ۳٪ نانو سیلیس و ۵٪ خرده لاستیک بیشترین مقدار مقاومت کششی را کسب نموده‌اند.

نتیجه‌گیری

- استفاده از خرده لاستیک در بتن باعث کاهش مقاومت فشاری و کششی بتن می‌گردد.
- باوجود کاهش معیارهای مقاومتی بتن حاوی لاستیک، دارای شکست نرم‌تر و تغییر شکل بسیار کمتری نسبت به بتن معمولی می‌باشد.
- بتن حاوی خرده لاستیک، دارای رنگ تیره‌تر و دارای یکپارچگی بهتر از بتن معمولی می‌باشد.
- درصد بهینه مقاومتی خرده لاستیک ۵٪ می‌باشد و درصد بهینه مقاومتی نانو سیلیس ۳٪ و متاکائولن ۱۵٪ می‌باشد.
- در صورت استفاده از نانو سیلیس و یا متاکائولن در طرح اختلاط، به علت جذب آب زیاد این افزودنی‌ها، حتماً باید از فوق روان کننده استفاده گردد و ترجیحاً نسبت آب بیشتر از ۰,۴.
- با افزایش درصد جایگزینی متاکائولن، چسبندگی بتن افزایش می‌یابد.

قدردانی

با تشکر فراوان از مسئول آزمایشگاه عمران دانشگاه آزاد واحد شیراز جناب آقای مهندس هادی فاطمی بابت تمامی زحمات، لطف‌ها و همکاری‌های ایشان در جهت انجام این پژوهش.

مراجع

- [1] Everett, Jess W., and Salim Dougla. "Scrap tire disposal(II): Case study and recommendations." *Journal of Solid Waste Technology and Management* 25, no. 1 (1998): 51-60.
- [2] Amirkhanian, Serji. "Utilization of waste materials in highway industry: a literature review." *Journal of solid waste technology and management* 24, no. 2 (1997): 94-103.
- [3] Epps, Jon A. *Uses of recycled rubber tires in highways*. Vol. 198. Transportation Research Board, 1994.
- [4] Lee, Hee Suk, Hosin Lee, Jang Soo Moon, and Hwan Wook Jung. "Development of tire added latex concrete." *Materials Journal* 95, no. 4 (1998): 356-364.
- [5] Al-Akhras, Nabil M., and Mohammed M. Smadi. "Properties of tire rubber ash mortar." *Cement and concrete composites* 26, no. 7 (2004): 821-826.
- [6] Hernández-Olivares, F., and G. Barluenga. "Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete." *Cement and concrete research* 34, no. 1 (2004): 109-117.
- [7] Botros, Amany G. "Micheal," Improving plastic shrinkage cracking of concrete using recycled waste rubber crumbs." *HBRC Journal* 3, no. 3 (2007).
- [8] Rostami, H., J. Lepore, T. Silverstraim, and I. Zundi. "Use of recycled rubber tires in concrete." In *Proceedings of the international conference on concrete*, vol. 1993, pp. 391-399. London, United Kingdom: Thomas Telford Services Ltd, 2000.
- [9] Eldin, Neil N., and Ahmed B. Senouci. "Rubber-tire particles as concrete aggregate." *Journal of materials in civil engineering* 5, no. 4 (1993): 478-496.
- [10] Huynh, Hai, Dharmaraj Raghavan, and C. Ferraris. "Rubber particles from recycled tires in cementitious composite materials." *NISTIR* 5850 (1996): 23.
- [11] Raghavan, Dharmaraj, H. Huynh, and C. F. Ferraris. "Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite." *Journal of Materials science* 33, no. 7 (1998): 1745-1752.
- [12] American Concrete Institute. Committee 211. (1977). *Recommended practice for selecting proportions for normal and heavyweight concrete (ACI 211.1-77)*. Detroit :The Institute,
- [13] Standard, A. S. T. M. C496 (2003). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Annual Book of ASTM Standards, 4(2).
- [14] ASTM, C39. (1996), *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. Annual book of ASTM standards, 4.

مطالعه آزمایشگاهی اثر امولسیون کننده و نانوذرات بر تولید نفت از مخازن نفتی شکافدار

عبدالحمید انصاری^۱، اکبر ثابت^۲

۱- نویسنده مسئول، گروه مهندسی نفت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لامرد، لامرد، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لامرد، لامرد، ایران

abdolhamida61@gmail.com

چکیده

هدف از انجام این پژوهش، مطالعه آزمایشگاهی اثر امولسیون کننده DME و نانوذرات بر تولید نفت از مخازن شکافدار عمودی می باشد که به طور آزمایشگاهی و تئوری مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش از نانوذرات دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) استفاده شد. با توجه به تعداد پارامترهای درگیر و به منظور کاهش تعداد آزمایش ها، از روش طراحی آزمایش تاگوچی در نرم افزار Minitab استفاده گردید. همچنین پس از انجام آزمایش، برای بررسی کیفیت رویش نفت از محیط متخلخل جهت تست ATR به منظور بررسی اثر فرآیند سیلاب زنی، نمونه گیری شد و تست های مذکور به عمل آمد. بر اساس بررسی های انجام گرفته با افزایش طول، اندازه دهانه و دانسیته شکاف ها میزان تولید نفت از مخزن افزایش می یابد اما افزایش غلظت نانوذره و امولسیون کننده، الزاماً منجر به افزایش تولید نفت نخواهد شد بلکه این پارامتر دارای یک مقدار بهینه است که مقدار آن ۵۰ ppm می باشد. همچنین بیشترین میزان تولید نفت در صورت اجرای آزمایش در شرایط بهینه (طول شکاف ۱۲ cm، اندازه دهانه ۰/۳mm، دانسیته شکاف ۴۰۰ و غلظت نانوذره ۵۰ ppm) توسط روش های آماری بدست آمد که مقدار آن در حدود ۸۰/۹۸ درصد از نفت در جای مخزن می باشد که با مقدار تجربی (۷۵/۱۰ درصد) در حدود ۵/۸۸ درصد اختلاف دارد.

کلمات کلیدی: ازدیاد برداشت نفت، سیلاب زنی، نانوذرات، امولسیون کننده، دی اکسید تیتانیوم.

۱- مقدمه

مطابق پیش بینی های به عمل آمده، افزایش تقاضای جهانی برای انرژی همچنان ادامه خواهد داشت و اگر چه استفاده از انرژی های جایگزین مانند انرژی های هسته ای و انرژی های تجدید پذیر در سال های آتی افزایش می یابد، ولی این افزایش در مقایسه با انرژی های فسیلی کم بوده و نقش اصلی منابع انرژی تجدید پذیر حداقل تا دو دهه آینده نقش تکمیلی و حامی خواهد بود. با درک این واقعیت که میزان تقاضا انرژی جهانی در سال های آتی به بالاترین میزان خود خواهد رسید، نیاز به ایجاد یک تحول علمی و عملی در هسته اصلی علوم مهندسی نفت و گاز، جهت افزایش میزان بهره وری بیش از پیش احساس می شود. در این میان، علم نانو بعنوان علمی که هدف آن بازنگری در ساختار تولیدی مواد و بهینه کردن فرآیند تولید و بهره برداری از آنهاست، این پتانسیل را دارد که انقلابی عظیم در تمامی فناوری های حال حاضر بشری از جمله بهره برداری از منابع هیدروکربوری ایجاد نموده و با استفاده از قابلیت های گسترده خود فناوری هایی پر بارده تر و سالم تر نسبت به آنچه امروزه شاهد هستیم، معرفی نماید. بصورت کلی علم نانو از طریق کنترل ساختار ماده در ابعاد اتمی و ایجاد ساختار بهینه برای

مواد، سبب بهبود بسیاری از خواص مانند سطح مفید، استحکام، صرفه جوئی در میزان ماده مصرفی و غیره می‌گردد. در صنعت نفت و گاز نیز از آنجا که قدرت، پایداری و ابعاد تجهیزات مورد استفاده از اهمیت به سزائی برخوردار است می‌توان با استفاده از فناوری نانو به تحولات چشمگیری دست یافت. چنانچه در یکی از مقالاتی که به تازگی چاپ شده به این نکته اشاره شده است که انتظار می‌رود با کمک فناوری نانو ضریب برداشت جهانی نفت و گاز تا حدود ۱۰٪ افزایش پیدا کند [۱]. به منظور پاسخگوئی به روند رشد روز افزون تقاضای جهانی جهت تامین منابع نفت و گاز، یا باید منابع جدید هیدروکربنی کشف شده و مورد بهره برداری قرار گیرند و یا با استفاده از فناوری های گوناگون، نفت و گاز در جا و بدون استفاده درون مخزن تحت فرآیند های ازدیاد برداشت مورد بهره برداری قرار گیرد. در این حال و با توجه به شرایط سخت اکتشاف و نیز صیانت از منابع هیدروکربوری موجود، استفاده از روش دوم منطقی تر و اصولی تر می باشد. امروزه فناوری نانو در زمینه ازدیاد برداشت از مخازن نفتی و گازی، پیشرفت های اساسی را ایجاد نموده است. برای مثال استفاده از سیالات هوشمند یا نانوسیالات که سبب تغییر در خاصیت ترشوندگی سنگ مخزن شده و نیروی کششی دراگ و اتصال دهنده ها را در جهت پیوستگی شن کاهش می دهند و یا استفاده از نانومواد فعال سطحی^۱ که سبب افزایش میزان برداشت از مخازن به نسبت کاملاً کنترل شده می گردد.

در سال ۱۳۸۹، عالمزاده و وثوقی، بکارگیری نانوذرات سیلیس (SiO_2) در مرحله سیلاب زنی آبی و نحوه تاثیر آن روی تغییرات ترشوندگی مخازن و میزان برداشت نفت را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش از نانوذرات سیلیکا با ابعاد ۱۴ نانومتر استفاده شد. با استفاده از این نانوذره می‌توان ترشوندگی سطوح سنگ‌های کربناته در مخازن را تغییر داده و از حالت نفت دوست یا مختلط به آب دوست تبدیل کرد. بدین منظور تغییرات آب دوستی با استفاده از روش زاویه تماس روی مغزه‌های شنی و کربناته ارزیابی شده است. همچنین این کار روی مغزه‌های اشباع شده با آب نمک و نفت که آب نمک و نانوذره با دو غلظت مختلف به آن‌ها تزریق شده است نیز صورت گرفته است. با مقایسه نتایج زاویه تماس مشاهده شد که با افزایش غلظت، زاویه تماس کوچک شده که این امر به معنای افزایش آب دوستی و به موجب آن افزایش خاصیت ترشوندگی مغزه می‌باشد. در مرحله بعد تاثیر افزایش غلظت نانوذره سیلیس مورد آزمایش قرار گرفت که در این مرحله با استفاده از داده‌های بدست آمده میزان برداشت نفت در حالت بدون استفاده از نانوذره و در حالت استفاده از نانوذره با درصد وزنی‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱/۰ و ۵/۰ مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه نتایج بدست آمده مشخص شد که وجود نانوذره میزان بازیافت نفت را افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش درصد وزنی نانوذره تا ۰/۱. درصد میزان بازیافت نفت بیشتر خواهد شد ولی در حالت تزریق نانوذره با درصد وزنی ۵/۰ تاثیر چندانی در میزان برداشت نفت مشاهده نخواهد شد [۲].

در سال ۲۰۱۰، تورمود اسکوج و همکاران در طی یک بررسی مفصل، مقایسه‌ای بین حرکت نفت در مخزن توسط نانوذرات سیلیکا و نانوذرات CDG داشتند. نتایج حاصل از تحقیقات ایشان نشان داد که در صورت استفاده از نانوذرات سیلیکا در غلظت‌های پایین، افزایش قابل توجهی در میزان برداشت نفت نخواهد داشت ولی در صورتی که از نانوذره مذکور در غلظت ۶۰۰ ppm استفاده شود، میزان برداشت نفت به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. استفاده از نانوذره CDG در هر غلظتی به مقدار قابل توجهی باعث ازدیاد برداشت نفت خواهد شد [۳].

در سال ۲۰۱۳ موهذید و همکارانش به بررسی اثر نانوذرات کریستالی در محلول آبی سورفکتانت سدیم دو دسیل سولفات بر روی بازده بازیافت نفت در سیلاب زنی نانوسیال دی‌الکتریک پرداختند. در این پژوهش ۴ نمونه کریستال در اندازه‌های متفاوت مورد استفاده قرار گرفت و تاثیر اندازه ذرات بر روی فرآیند امولسیون شونده خود به خودی که به نوبه‌ی خود تعیین کننده راندمان بازیافت نفت بود بررسی شد. آنها مشاهده کردند تفاوت در مقدار نانوذرات جذب شده در سطح مشترک، تغییرات در کشش سطحی موضعی را بوجود می‌آورد، در نتیجه باعث کاهش تنش ناشی از حرکت سیال می‌شود. با توجه به آزمایشات صورت گرفته نشان داده شد که نانوسیال اکسید روی (ZnO) که شامل ذرات بزرگتر بودند ۱۴۵٪ بازیافت نفت را در مقایسه با نانوذرات ZnO با اندازه کوچکتر افزایش می‌دهد. این در حالی بود که ۶۳٪ بازیافت نفت بیشتری توسط نانوسیال Al_2O_3 با

^۱ Surfactants

ذرات کوچکتر در مقایسه با ذرات بزرگتر صورت گرفت. تشکیل یک لایه ابری شکل در سطح مشترک نفت - آب در طی آزمایشات مشاهده گردید که این نشان دهنده فرآیند امولسیون بود. آنها با توجه به وقوع این پدیده به این نتیجه دست یافتند که برای بوجود آمدن امولسیون خود به خودی در سیلاب زنی نانوسیال، وجود کشش سطحی فوق العاده کم لازم نیست [۴].

مغزی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ اثر نانو ذرات سیلیکا بر روی کارایی محلول پلیمر پلی آکریل آمید و نمک در فرایند سیلاب زنی برای بازیافت نفت سنگین مورد آزمایش قرار دادند. سیلاب زنی بر روی یک میکرو مدل شیشه‌ای اشباع از نفت و با شوری‌های مختلفی از محلول پلیمر بدست آمده، انجام شد. همچنین هر آزمایش مجدداً با همان میزان شوری ولی با حضور نانوذرات سیلیکا تکرار گردید. آزمایشات نشان دادند که با افزایش میزان شوری محلول پلیمر، بازیابی نفت کاهش خواهد یافت. اما حضور نانوذرات سیلیکا در هر آزمایش می‌تواند افت بازیابی را کمتر نماید. همچنین ویسکوزیته محلول پلیمر با یک غلظت از نمک، کمتر از ویسکوزیته همین محلول پلیمر در حضور نانوذرات سیلیکا می‌باشد [۵].

کریمی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ اثر نانوسیال زیرکونیم اکسید (ZrO_2) بر روی ترشوندگی مخازن کربناته شکافدار به عنوان یکی از عوامل اصلی در ازدیاد برداشت نفت مورد مطالعه قرار دادند. بر این اساس چندین نانوسیال متشکل از نانوذرات ZrO_2 و مخلوط سورفکتانت‌های غیر یونی ساخته شد. اثر نانوسیال بر ترشوندگی سنگ کربناته به کمک تست اندازه‌گیری زاویه تماس و تست آشام خود به خودی مورد بررسی قرار گرفت. آنها نشان دادند که نانوسیال تهیه شده می‌تواند به طور قابل توجهی باعث تغییر ترشوندگی سنگ از وضعیت به شدت نفت دوست به وضعیت به شدت آب دوست شود. به منظور مشخصه‌یابی سنگ‌ها از تحلیل میکروسکوپ روبش الکترونی استفاده شد. نتایج نشان دهنده تاثیر این نانوسیال‌ها و جذب نانوذرات بر روی سطح سنگ بود. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که تغییر ترشوندگی توسط جذب و رشد نانوذرات ZrO_2 بر روی سطح سنگ یک فرآیند بسیار آهسته می‌باشد که نیاز به یک دوره زمانی دو روزه دارد [۶].

۲- روش تحقیق

مطابق جدول (۱) تعداد فاکتورها در این پژوهش ۴ عدد (غلظت، اندازه دهانه شکاف، طول شکاف و دانسیته شکاف) و هر کدام در ۳ سطح می‌باشند.

جدول (۱): معرفی عوامل مؤثر در واکنش

سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	عامل
۱۲	۸	۴/۵	طول شکاف (cm)
۰/۳	۰/۲	۰/۱	اندازه دهانه شکاف (mm)
۴۰۰	۲۰۰	۱۰۰	دانسیته شکافها (تعداد در واحد متر)
۱۰۰	۵۰	۷۵	غلظت امولسیون کننده DME و نانوذره در آب (ppm)

با توجه به اینکه تعداد فاکتورها در این پژوهش ۴ عدد (غلظت، اندازه دهانه شکاف، طول شکاف و دانسیته شکاف) و هر کدام در ۳ سطح می‌باشند، با استفاده از روش تاگوچی، تعداد آزمایش‌ها مطابق جدول (۲) بدست آمد.

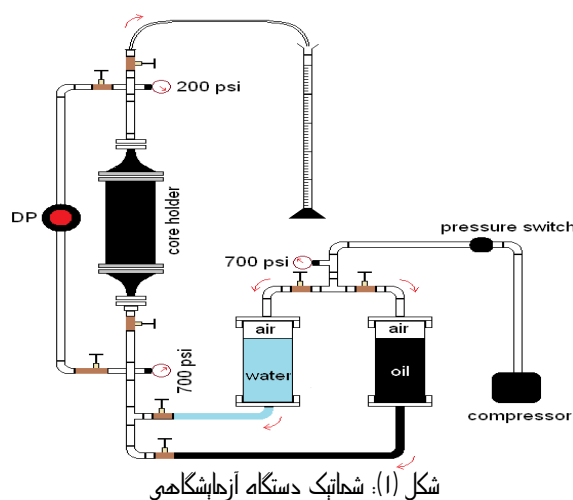
پس با انجام ۹ آزمایش می‌توان به نتیجه مطلوب دست یافت. بر اساس مطالعات انجام شده مشخص شد که در اکثر شکاف‌ها اندازه دهانه شکاف بین ۰/۱ mm تا ۰/۳ mm تغییر می‌کند (موسوی، ۱۳۹۰: ۲۴-۱۸). بنابراین در این آزمایش‌ها اندازه دهانه شکاف در محدوده ۰/۱-۰/۳ mm در نظر گرفته شد. همچنین طول شکاف و تعداد شکاف بر اساس قطر مخزن (۷/۶ cm) به ترتیب در محدوده ۴/۵-۱۲ cm و ۲-۴ در نظر گرفته شد. بنابراین با استفاده از اطلاعات موجود و سپس با در نظر گرفتن شرایط آزمایش، طول شکاف، اندازه دهانه شکاف، تعداد شکاف، فاصله بین شکاف و دانسیته شکاف مطابق جدول (۲) بدست آمد.

جدول (۲): شرایط آزمایشگاهی مخزن شکافدار عمودی.

شماره آزمایش	طول شکاف (cm)	اندازه دهانه شکاف (mm)	تعداد شکاف	فاصله بین دو شکاف (cm)	دانشیه شکاف (Fractures/meter)	غلظت (ppm)
۱	۴/۵	۰/۱	۲	۲	۱۰۰	۷۵
۲	۴/۵	۰/۲	۳	۱/۵	۲۰۰	۵۰
۳	۴/۵	۰/۳	۴	۱	۴۰۰	۱۰۰
۴	۸	۰/۱	۳	۱/۵	۲۰۰	۱۰۰
۵	۸	۰/۲	۴	۱	۴۰۰	۷۵
۶	۸	۰/۳	۲	۲	۱۰۰	۵۰
۷	۱۲	۰/۱	۴	۱	۴۰۰	۵۰
۸	۱۲	۰/۲	۲	۲	۱۰۰	۱۰۰
۹	۱۲	۰/۳	۳	۱/۵	۲۰۰	۷۵

– بررسی فرآیند تزریق نانو ذرات و امولسیون کننده بر فرایند سیلاب زنی آبی

برای انجام آزمایش‌های ازدیاد برداشت از مخازن شکافدار عمودی، دستگاهی طراحی و ساخته شد که در شکل (۱) نشان داده شده است. تجهیزات مورد استفاده در این آزمایش شامل استوانه پلیمری جهت شبیه‌سازی بستر متخلخل (core-holder)، مخزن محلول آب دریا و نانوذرات TiO_2 ، مخزن نفت، کمپرسور و وسایل جانبی مثل سوئیچ فشار^۱، فشار سنج، شیر آلات و ... بوده است.



– مواد مورد استفاده

الف) نفت خام

از نفت خام میدان نفتی بی‌بی‌حکیمه برای استفاده در این آزمایش‌ها، نمونه‌گیری به عمل آمد. اطلاعات فیزیکی و شیمیایی آن از شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب بدست آمد. در جدول‌های (۳) و (۴) به ترتیب ویژگی‌های نفت مصرفی و درصد اجزاء نفت خام ذکر شده است.

^۱ -Pressure Switch

جدول (۳): ویژگی‌های نفت مورد استفاده در آزمایش‌ها.

فشار مخزن (psi)	دمای مخزن (°F)	گرانروی نفت (cP)	دانسیته نفت (API)
۶۳۳۴	۲۳۵	۲۲/۳	۲۶/۸

جدول (۴): درصد اجزاء نفت خام.

CO	H ₂ S	C _{۷+}	C _۶	nC _۵	iC _۵	nC _۴	iC _۴	C _۳	C _۲	C _۱	ترکیبات
۴/۳۴۴	۴/۰۱۸	۴۹/۵۱	۵/۱۹	۳/۵۳	۲/۶۹۸	۲/۴۵	۱/۰۶	۴/۳۷	۴/۱۳	۱۸/۷	درصد مولی

ب) آب دریا

از آب خلیج فارس (بندر گناوه) به عنوان حلال نانوذرات و انجام فرآیند سیلاب‌زنی آبی استفاده شد.

ج) نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم (TiO₂)

در این پژوهش از نانوذرات دی اکسید تیتانیوم (خریداری شده از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان) با اندازه متوسط ۱۰ تا ۳۰ نانومتر جهت افزایش بازده روبش نفت خام استفاده شد که به صورت معلق در آب دریا تهیه شد. شکل ظاهری و تصویر SEM آن در شکل (۲) آورده شده است.



شکل (۲): نانوذرات دی اکسید تیتانیوم (TiO₂)، (الف) شکل ظاهری، (ب) تصویر SEM.

د) امولسیون کننده DME

در این پژوهش از امولسیون کننده DME خریداری شده از شرکت ایمن تاش سپاهان اصفهان استفاده شده است.

– پایداری نانوذرات در آب

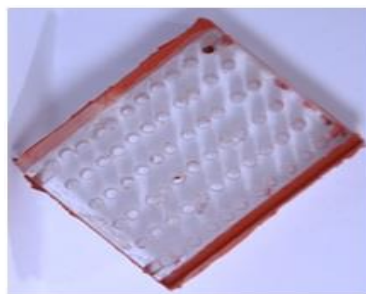
برای پایداری نانوسیال TiO₂ – آب، از دستگاه امواج فراصوتی مدل UP400S ساخت شرکت Hielscher آلمان استفاده شد. و در آن با قرار دادن پراب تیتانیومی دستگاه درون محلول به مدت ۳۰ دقیقه برای هر ۶۰۰ میلی لیتر استفاده شد، شکل (۳).



شکل (۳): پایداری نانو سیال با استفاده از دستگاه امواج فراصوت.

– آماده‌سازی شکاف‌های عمودی

برای بررسی اثر شکاف در مخزن در مقیاس آزمایشگاهی، باید شکافی ساخته شود که بتواند تمامی خصوصیات آن با شکاف واقعی در مخزن تطابق داشته باشد. از جمله خصوصیات شکاف این است که دارای تخلخل کم و تراوایی زیاد می‌باشد و از دو طرف به ماتریس منتهی می‌شود. برای ساخت چنین مدلی در مقیاس آزمایشگاه، از دو قطعه پلکسی گلاس^۱ به عرض ثابت ۳/۱cm و ضخامت ۳mm استفاده شده که بتواند در مخزن قرار گیرد. همچنین برای برقراری ارتباط بین ماتریس و شکاف، بر روی این قطعات سوراخ‌هایی به قطر ۲mm ایجاد شد که فاصله مرکز به مرکز آن‌ها در حدود ۳/۵mm می‌باشد. برای ایجاد دهانه شکاف در اندازه مطلوب، از طلقی با اندازه‌های کوچک در بین دو قطعه پلکسی گلاس استفاده شد که در فواصل مختلف از یکدیگر قرار گرفتند تا در اثر فشار این فاصله تغییر نکند. ابتدا با استفاده از اطلاعات موجود و سپس با در نظر گرفتن شرایط آزمایش، اندازه دهانه شکاف، طول شکاف، تعداد شکاف و فاصله شکاف‌ها از یکدیگر طبق جدول (۲) تعیین شد. همچنین به منظور جلوگیری از ورود دانه‌های سیلیس تشکیل‌دهنده محیط متخلخل به شکاف، از توری‌هایی با مش ۱۲۰ استفاده شد که به پلکسی گلاس چسبانده شدند. در شکل (۴) تصویری از شکاف مورد استفاده در مخزن نشان داده شده است.



شکل (۴): شکاف مورد استفاده در مخزن.

مقادیر حجم مخزن و دانسیته‌ی ذرات سیلیس برای کلیه‌ی آزمایش‌ها ثابت و به ترتیب برابر با $1299/056 \text{ cm}^3$ و $2/5 \text{ g/cm}^3$ می‌باشد. در جدول (۵) تمام شرایط مخزن شبیه‌سازی شده شامل حجم شکاف‌های موجود در مخزن، تعداد حفرات هر شکاف، جرم و حجم ذرات سیلیس مورد استفاده، حجم فضای خالی مخزن، تخلخل ماتریس، تخلخل و تراوایی شکاف برای هر آزمایش به طور جداگانه آورده شده است.

جدول (۵): شرایط مخزن شبیه‌سازی شده در هر آزمایش.

شماره آزمایش	حجم شکاف‌های موجود در مخزن (cm^3)	تعداد حفرات هر شکاف	جرم سیلیس (g)	حجم سیلیس (cm^3)	حجم فضای خالی (cm^3)	تخلخل ماتریس (%)	تراوایی ماتریس (D)	تخلخل شکاف (%)	تراوایی شکاف (D)
۱	۱۷/۰۲	۱۵۴	۲۴۰۰	۹۶۰	۳۲۲/۰۳	۲۴/۷۹	۱۵-۱۸	۰/۴۵	۳/۶
۲	۲۵/۹۵	۱۵۴	۲۳۳۰	۹۳۲	۳۴۱/۱۰	۲۶/۲۵	۱۵-۱۸	۰/۹	۲۸/۷۵
۳	۳۵/۱۵	۱۵۴	۲۳۵۵	۹۴۲	۳۲۱/۹۰	۲۴/۷۸	۱۵-۱۸	۱/۳۵	۹۹/۲۵
۴	۴۵/۳۸	۲۹۴	۲۳۹۰	۹۵۶	۲۹۷/۶۷	۲۲/۹۱	۱۵-۱۸	۰/۲۵	۲/۱
۵	۶۱/۵۰	۲۹۴	۲۳۶۵	۹۴۶	۲۹۱/۵۵	۲۲/۴۴	۱۵-۱۸	۰/۵	۱۶/۷
۶	۳۱/۲۵	۲۹۴	۲۳۷۰	۹۴۸	۳۱۹/۸۰	۲۴/۶۱	۱۵-۱۸	۰/۷۵	۵۶/۲۵
۷	۹۰/۷۷	۴۴۸	۲۳۴۵	۹۳۸	۲۷۰/۲۹	۲۰/۸۰	۱۵-۱۸	۰/۱۷	۱/۴
۸	۴۶/۱۳	۴۴۸	۲۳۹۰	۹۵۶	۲۹۶/۹۳	۲۲/۸۶	۱۵-۱۸	۰/۳۵	۱۰/۸
۹	۷۰/۳۱	۴۴۸	۲۳۳۰	۹۳۲	۲۹۶/۷۵	۲۲/۸۴	۱۵-۱۸	۰/۵	۳۷/۵

۳- نتایج و بحث

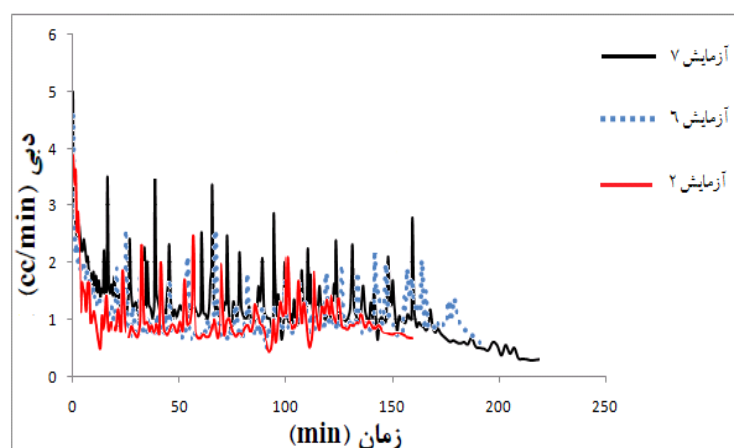
در این پژوهش بطور کلی تأثیر دو پارامتر مورد بررسی قرار گرفته شده است: ۱- اثر شکاف ۲- غلظت نانوذرات و امولسیون کننده DME. از آنجا که پارامتر شکاف تابع سه متغیر دیگر (طول، دانسیته، اندازه دهانه) می‌باشد؛ لذا آزمایش‌ها به سه دسته با غلظت‌های مشابه تقسیم‌بندی شدند. از این طریق می‌توان ضمن ثابت بودن غلظت نانوذرات و امولسیون کننده DME برای هر دسته از آزمایش‌ها، نتیجه‌ی بهتری نسبت به خواص هندسی شکاف‌ها اخذ کرد و در پایان با مقایسه هر سه دسته آزمایش نیز می‌توان تأثیر غلظت را بر بازیافت نفت به صورت کیفی حدس زد. لذا به عنوان مبنا در مرحله اول از آب دریا در فرآیند تزریق به مخزن استفاده شده که نتایج مربوط در جدول (۶) آورده شده است.

جدول (۶): نتایج مربوط به تزریق آب به مخزن

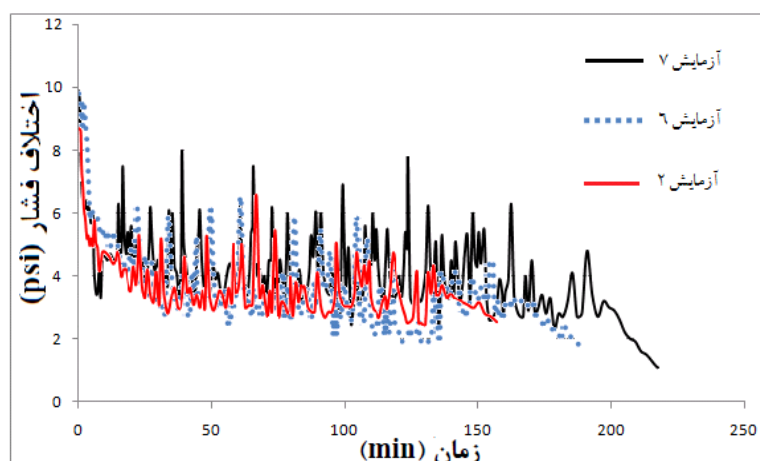
آزمایش	حجم فضای خالی (cm^3)	تخلخل ماتریس (%)	تراوایی تخلخل شکاف (%)	تراوایی شکاف (Darcy)	زمان برداشت نفت (دقیقه)	میزان برداشت نفت (سی سی)	بازیافت نفت (%)
آب	۳۲۲/۰۳	۲۴/۷۹	۱۵-۱۸	۰/۵۷	۴/۲	۹۳	۲۹

۵۰ ppm دی اکسید تیتانیوم و امولسیون کننده DME با غلظت ۵۰ ppm

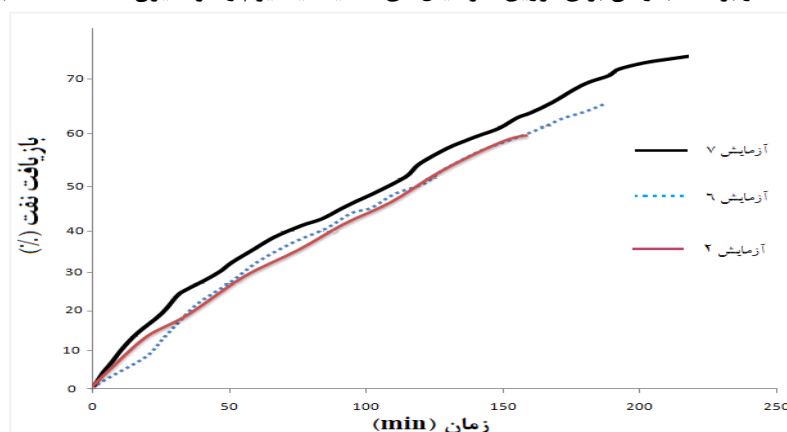
پس از آن که core-holder با نفت اشباع شد، نانوذرات دی اکسیدتیتانیوم به مقدار ۵۰ ppm در یک لیتر آب دریا اضافه گردیدند و به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه همزن التراسونیک قرار گرفت تا یک محلول نانوسیال پایدار داشته باشیم. سپس مقدار ۵۰ ppm از امولسیون کننده DME به نانوسیال پایدار شده اضافه می‌شود. سپس مخلوط آماده شده به core-holder تزریق شد و همزمان میزان حجم نفت تولیدی نسبت به زمان متناظر آن ثبت شد و نمودارهای دبی، اختلاف فشار و فاکتور بازیافت بر حسب زمان رسم شد که در نمودارهای (۱)، (۲) و (۳) نشان داده شده است.



نمودار (۱): دبی بر حسب زمان برای تزریق نانوسیال دی اکسید تیتانیوم و امولسیون کننده DME با غلظت ۵۰ ppm.



نمودار (۲): اختلاف فشار بر حسب زمان برای تزریق نانوسیال دی اکسید تیتانیوم و امولسیون کننده DME با غلظت ۵۰ ppm.



نمودار (۳): درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای تزریق نانوسیال دی اکسید تیتانیوم و امولسیون کننده DME با غلظت ۵۰ ppm.

نتایج حاصل از آزمایش‌ها در نمودارهای (۱) و (۲) نشان می‌دهد که دبی تولید نفت در ابتدای آزمایش زیاد بوده و با مرور زمان کاهش یافته است. نمودارهای دبی و اختلاف فشار نشان می‌دهد که در طول آزمایش نیز نوسانات زیادی رخ داده که مهم

ترین دلیل آن را می‌توان وجود شکاف‌ها و تغییرات اختلاف فشار دانست که بر اساس قانون داریسی که در رابطه (۱) نشان داده شده است، دبی تولید با اختلاف فشار نسبت مستقیم و با گرانیوی نفت نسبت عکس دارد. بنابراین با افزایش اختلاف فشار و کاهش گرانیوی نفت، دبی تولید نفت افزایش می‌یابد و به دلیل تراوایی بالای شکاف و اختلاف فشار بین شکاف و ماتریس، بر طبق قانون داریسی، دبی نفت از ماتریس به سمت شکاف بیشتر می‌شود.

$$Q = KA (\Delta P/\mu) \quad (۱)$$

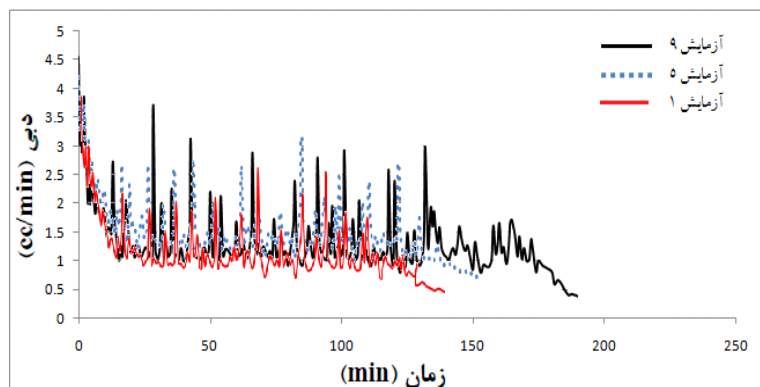
در این رابطه Q دبی نفت تولیدی، K ضریب تراوایی، A سطح مقطع، ΔP تغییرات اختلاف فشار و μ گرانیوی نفت می‌باشد. نفت پس از عبور از ماتریس به درون شکاف نفوذ کرده که اختلاف فشار و در نتیجه دبی تولید بطور ناگهانی افزایش می‌یابد و این روند تا فرا رسیدن زمان پدیده رسوخ ادامه می‌یابد و وجود پیک‌های مرتفع نیز نشان‌دهنده حرکت نفت از ماتریس به شکاف و حرکت به سمت چاه تولید است که حجم قابل ملاحظه‌ای نفت تولید می‌کند.

با توجه به نتایج نشان داده در نمودارهای (۱)، (۲) و (۳) می‌توان گفت که در آزمایش ۷، با افزایش طول و دانسیته شکاف، نوسانات بیشتری نسبت به آزمایش ۶ و ۲ مشاهده می‌شود و میزان بازیافت نفت نیز بیشتر است. همچنین با توجه به طولانی‌تر بودن شکاف و بزرگ بودن اندازه دهانه آن در آزمایش ۶ نسبت به آزمایش ۲ و در مقابل بیشتر بودن دانسیته شکاف در آزمایش ۲ نسبت به آزمایش ۶ زمان پدیده رسوخ و میزان نفت تولیدی در هر دو آزمایش به هم نزدیک می‌باشد.

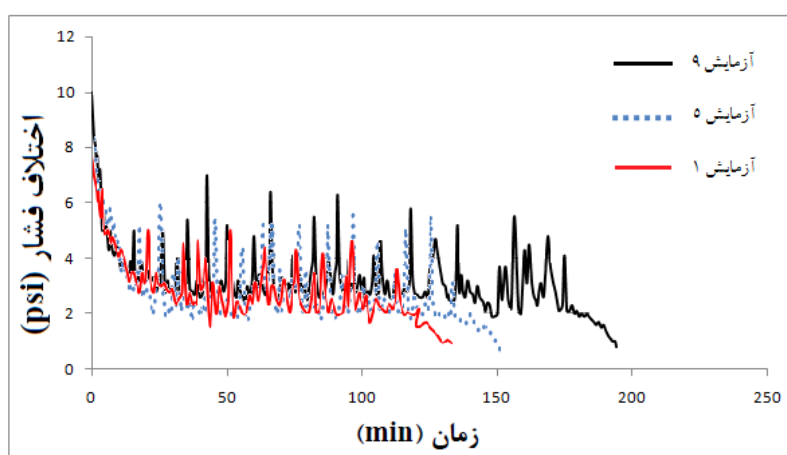
به طور کلی چنین استنباط می‌شود که با افزایش طول و دانسیته شکاف، حجم نفت موجود در شکاف افزایش یافته و سطح تماس بیشتری بین ماتریس و شکاف ایجاد می‌شود که نفت از مقاطع مختلف می‌تواند وارد شکاف شده و سپس تولید گردد. همچنین به دلیل اختلاف تراوایی و اختلاف فشار بین شکاف و ماتریس، دبی نفت از ماتریس به سمت شکاف بیشتر شده که با توجه به افزایش طول شکاف این مقدار بیشتر خواهد شد. علاوه بر این با توجه به اینکه شرایط محیطی مخزن شکاف‌دار ممکن است باعث غلبه نیروهای موئینه بر نیروهای گرانیوی شود، در نتیجه تمایل نانوذرات برای عبور از میان شکاف‌های با تراوایی بالا نسبت به جذب نانوذرات در ماتریس با تراوایی کم و انتقال دادن نفت به شکاف‌ها افزایش یافته و در نتیجه کاهش نیروهای موئینگی و افزایش عدد موئینگی باعث خروج نفت باقیمانده از خلل و فرج سنگ شده و میزان بازیافت نفت افزایش می‌یابد.

– تزریق نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و امولسیون کننده DME با غلظت ۷۵ ppm

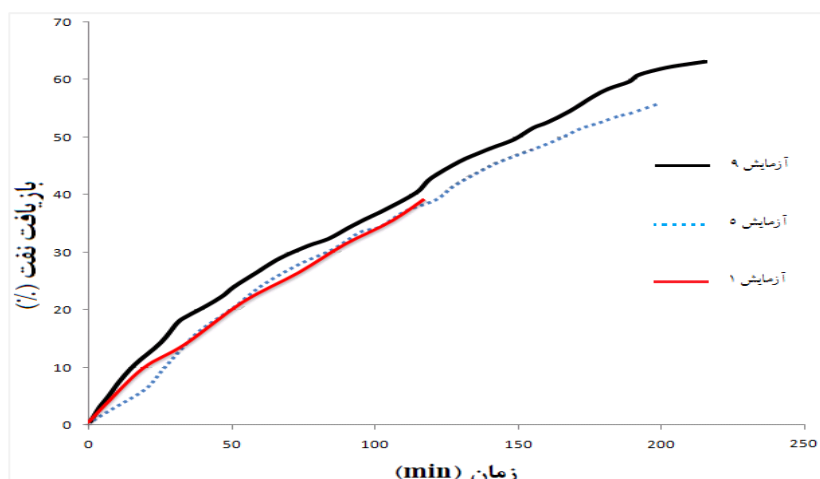
مانند آزمایش قبل، پس از تزریق نانوسیال و امولسیون کننده DME با غلظت ۷۵ ppm به core-holder، داده‌های حجم بر حسب زمان ثبت و نمودارهای دبی، اختلاف فشار و فاکتور بازیافت بر حسب زمان برای آزمایش‌های ۱، ۵ و ۹ ترسیم شد که در نمودارهای (۴)، (۵) و (۶) نشان داده شده است.



نمودار (۴): دبی بر حسب زمان برای تزریق نانوسیال دی اکسید تیتانیوم و امولسیون کننده DME با غلظت ۷۵ ppm.



نمودار (۵): اختلاف فشار بر حسب زمان برای تزریق نانوسیال دی اکسید تیتانیوم و امولسیون کننده DME با غلظت ۷۵ppm.



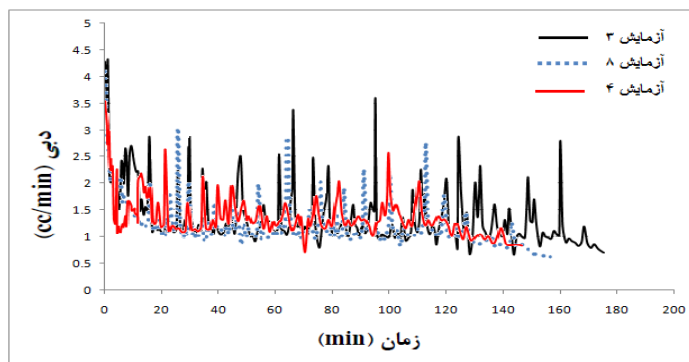
نمودار (۶): درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای تزریق نانوسیال دی اکسید تیتانیوم و امولسیون کننده DME با غلظت ۷۵ppm.

نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در آزمایش ۹ میزان بازیافت نفت نسبت به آزمایش‌های ۱ و ۵ بیشتر می‌باشد و همچنین زمان رسیدن به پدیده رسوخ طولانی‌تر بوده است که خود باعث افزایش برداشت نفت خواهد شد. همانطور که انتظار می‌رفت و در نمودارهای (۴)، (۵) و (۶) نشان داده شده است، با توجه به افزایش طول و اندازه دهانه شکاف در آزمایش ۹، سطح تماس نانوذرات تزریقی موجود در شکاف با ماتریس بیشتر شده و همچنین غلبه نیروهای گرانش بر نیروهای موئینه و کاهش نیروهای موئینی و افزایش عدد موئینی، باعث به تعویق افتادن زمان پدیده رسوخ و در نتیجه افزایش میزان تولید نفت شده است. در آزمایش ۵ نیز به دلیل افزایش طول، اندازه دهانه و دانسیته شکاف نسبت به آزمایش ۱، میزان برداشت نفت بیشتر بوده است.

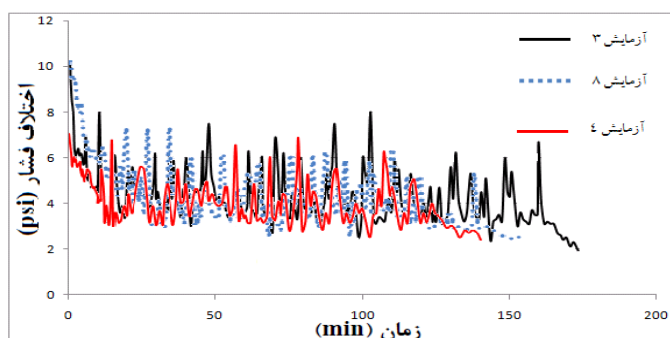
– تزریق نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و امولسیون کننده DME با غلظت ۱۰۰ ppm

مانند آزمایش‌هایی که در دو بخش گذشته صورت گرفت این بار نیز با غلظت ۱۰۰ ppm از نانوذرات و امولسیون کننده DME نمودارهای دبی، اختلاف فشار و فاکتور بازیافت بر حسب زمان برای آزمایش‌های ۳، ۴ و ۸ ترسیم شد. همانطور که

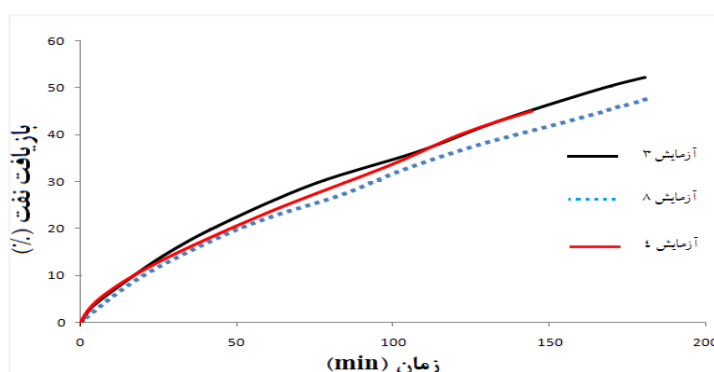
انتظار داشتیم نمودارهای بدست آمده در آزمایش ۳ نوسانات بیشتری رخ داده و اکثر پیک‌های موجود مرتفع‌تر هستند. که این علت را می‌توان با دلایل گفته شده در بخش‌های قبلی توجیه کرد.



نمودار (۷): دبی بر حسب زمان برای تزریق نانوسیال دی اکسید تیتانیوم و امولسیون کننده DME با غلظت ۱۰۰ ppm.



نمودار (۸): اختلاف فشار بر حسب زمان برای تزریق نانوسیال دی اکسید تیتانیوم و امولسیون کننده DME با غلظت ۱۰۰ ppm.



نمودار (۹): درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای تزریق نانوسیال دی اکسید تیتانیوم و امولسیون کننده DME با غلظت ۱۰۰ ppm.

قابل ذکر است میزان برداشت نفت در آزمایش ۷، ۲۰۳ cc بوده که نسبت به مقدار نانوذرات تزریقی مقدار قابل توجهی بوده است و می‌توان گفت در بین مقادیر تزریقی بهترین غلظت می‌باشد.

همانطور که انتظار می‌رفت تجزیه و تحلیل نمودارها و داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های مختلف نشان داد که تزریق نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و امولسیون کننده DME باعث تغییر ترشوندگی ماتریس از حالت نفت دوست به آب دوست شده و

در نتیجه میزان بازیافت نفت را به مقدار قابل توجهی افزایش و زمان رسیدن به پدیده رسوخ را به تعویق می‌اندازد. همچنین افزایش طول، اندازه دهانه و دانسیته شکاف باعث بهبود بازیافت نفت می‌گردد. در جدول (۷) خلاصه‌ای از داده‌های مربوط به تزریق نانوذرات TiO_2 و امولسیون کننده DME نشان داده شده است.

جدول (۷): نتایج بدست آمده از انجام آزمایش‌ها

شماره آزمایش	حجم فضای خالی (cm^3)	تخلخل ماتریس (%)	تراوایی تخلخل شکاف (%)	تراوایی شکاف (Darcy)	زمان برداشت نفت (دقیقه)	میزان برداشت نفت (cc)	درصد بازیافت نفت
۱	۳۲۲/۰۳	۲۴/۷۹	۱۵-۱۸	۰/۵۷	۴/۲	۱۱۸	۳۶/۶۴
۲	۳۴۱/۱۰	۲۶/۳۵	۱۵-۱۸	۰/۸	۲۶/۳	۱۶۷	۴۸/۹۵
۳	۳۲۱/۹۰	۲۴/۷۸	۱۵-۱۸	۱/۷۲	۷۵/۵	۱۷۸	۵۵/۳۹
۴	۲۹۷/۶۷	۲۲/۹۱	۱۵-۱۸	۰/۴۵	۳/۱	۱۴۶	۴۹/۰۵
۵	۲۹۱/۵۵	۲۲/۴۴	۱۵-۱۸	۰/۸۹	۲۶	۱۷۲	۵۹
۶	۳۱۹/۸۰	۲۴/۶۱	۱۵-۱۸	۱/۳۳	۶۲	۱۸۸	۵۸/۷۹
۷	۲۷۰/۲۹	۲۰/۸۰	۱۵-۱۸	۰/۳۶	۲/۴	۲۰۳	۷۵/۱۰
۸	۲۹۶/۹۳	۲۲/۸۶	۱۵-۱۸	۰/۷۲	۲۲	۱۵۹	۵۳/۵۴
۹	۲۹۶/۷۵	۲۲/۸۴	۱۵-۱۸	۱/۱	۴۹/۵	۱۹۱	۶۴/۳۶

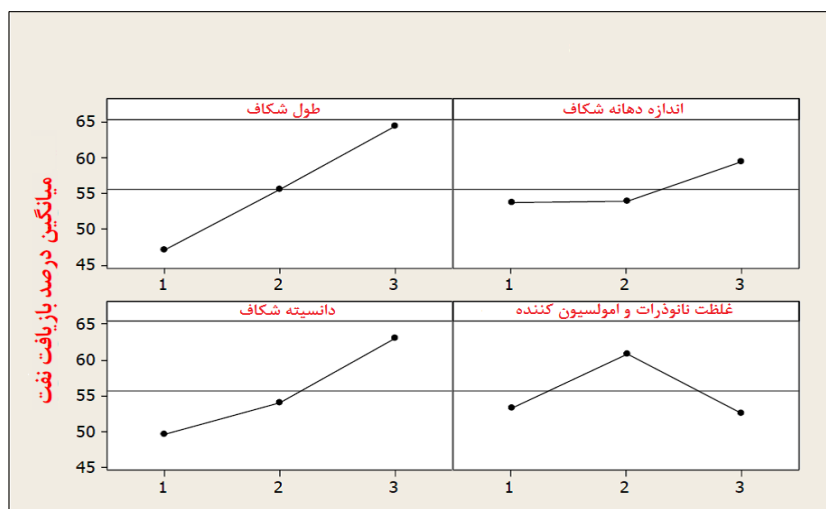
همانطور که در جدول (۷) مشاهده می‌شود تزریق نانوسیال دی اکسید سیلیسیم و امولسیون کننده DME با غلظت ppm ۵۰ بیشترین تأثیر را بر افزایش بازیافت نفت مخزن می‌گذارد. این مقادیر مجدداً در جدول (۸) آمده است.

جدول (۸): نتایج بدست آمده از تزریق نانوسیال دی اکسید سیلیسیم و امولسیون کننده DME با غلظت ppm ۵۰

شماره آزمایش	زمان برداشت نفت (دقیقه)	میزان برداشت نفت (CC)	درصد بازیافت نفت
۲	۱۶۲/۴۳	۱۶۷	۴۸/۹۵
۶	۱۸۰/۶۰	۱۸۸	۵۸/۹۵
۷	۲۱۶/۳۰	۲۲۳	۷۵/۱۰

– نمودار پارامترهای تاثیرگذار بر میزان بازیافت نفت

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزار Minitab 16، نمودار (۱۰) ترسیم شده است.



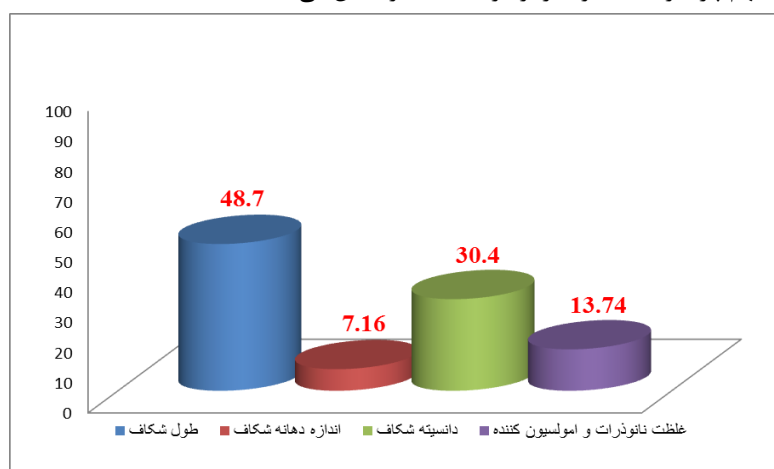
نمودار (۱۰): اثر پارامترهای تأثیرگذار بر باز یافت نفت در سطوح مختلف.

- تعیین درصد سهم هر فاکتور بر میزان باز یافت نفت با استفاده از تحلیل واریانس ANOVA در این بخش با استفاده از ANOVA، درصد سهم فاکتورهای طول شکاف، اندازه دهانه شکاف، دانشیته شکاف و غلظت نانوذرات بر میزان باز یافت نفت و همچنین شرایط بهینه برای تولید ماکزیمم میزان نفت، تعیین شده و به ترتیب در جدول های (۹) و (۱۰) آورده شده است.

جدول (۹): نتایج حاصل از تحلیل واریانس ANOVA بر باز یافت نفت

ردیف	فاکتور	درجه آزادی	مجموع مربعات	واریانس	درصد سهم
۱	طول شکاف	۲	۲۲۶/۳۷	۱۳۱/۱۸۵	۴۸/۷۰
۲	اندازه دهانه شکاف	۲	۳۳/۲۹	۱۶/۶۴۵	۷/۱۶
۳	دانشیته شکاف	۲	۱۴۱/۳۱	۷۰/۶۵۵	۳۰/۴۰
۴	غلظت نانوذرات و امولسیون کننده	۲	۶۳/۸۴	۲۷/۰۵	۱۳/۷۴
۵	خطا	۰	-	-	-
۶	جمع	۸	۴۶۴/۸۱	۲۴۵/۵۳۵	۱۰۰

شکل (۵) درصد سهم پارامترهای تأثیرگذار بر باز یافت نفت را نشان می دهد.



شکل (۵): درصد سهم پارامترهای تأثیرگذار بر باز یافت نفت.

جدول (۱۰): مقادیر بهینه پارامترهای موثر محاسبه شده بوسیله نرم افزار Minitab16.

فاکتور	سطح بهینه	شرایط بهینه آزمایشگاهی
طول شکاف	۳	۱۲ cm
اندازه دهانه شکاف	۳	۰/۳ mm
دانسیته شکاف	۳	۴۰۰ (تعداد شکاف/متر)
غلظت نانوذرات و امولسیون کننده	۲	۵۰ ppm

همانگونه که از جدول (۱۰) بر می‌آید بهترین راندمان برداشت نفت مربوط به شرایط آزمایش با طول شکاف ۱۲ cm (سطح ۳)، دهانه شکاف ۰/۳ mm (سطح ۳)، دانسیته شکاف ۴۰۰ (سطح ۳) و همچنین غلظت ۵۰ ppm (سطح ۲) می‌باشد. به همین منظور یک آزمایش با شرایط ذکر شده انجام گرفت و میزان بازیافت نفت به صورت واقعی اندازه‌گیری شد و با میزان پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار مقایسه و درصد خطا محاسبه شد. این اختلاف ناشی از خطاهای آزمایشگاهی در حین انجام آزمایش و خطاهای محاسباتی می‌باشد. جدول (۱۱) نتایج آزمایش را نشان می‌دهد.

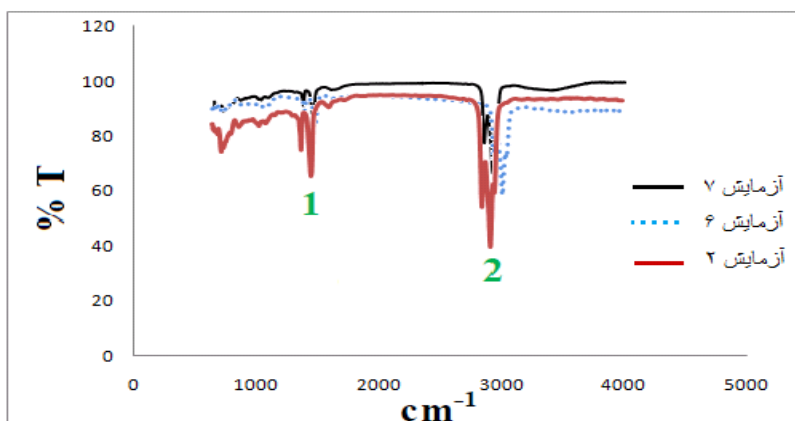
جدول (۱۱): مقایسه نتایج پاسخ پیش بینی شده در نرم‌افزار با پاسخ واقعی در آزمایشگاه

غلظت نانوذرات و امولسیون کننده	دانسیته شکاف	اندازه دهانه شکاف (mm)	طول شکاف (cm)	درصد بازیافت به صورت واقعی	درصد بازیافت پیش‌بینی شده	درصد خطا
۵۰ ppm	۴۰۰	۰/۳	۱۲	٪۷۵/۱۰	٪۸۰/۹۸	٪۵/۸۸

- بررسی طیف‌های بدست آمده از تست ATR

- مقایسه طیف‌های حاصل از تزریق نانوذرات و امولسیون کننده با غلظت ۵۰ ppm

طیف‌های بدست آمده از ATR برای تزریق نانوذرات با غلظت ۵۰ ppm در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): طیف‌های حاصل از تست ATR برای تزریق نانوذرات و امولسیون کننده با غلظت ۵۰ ppm.

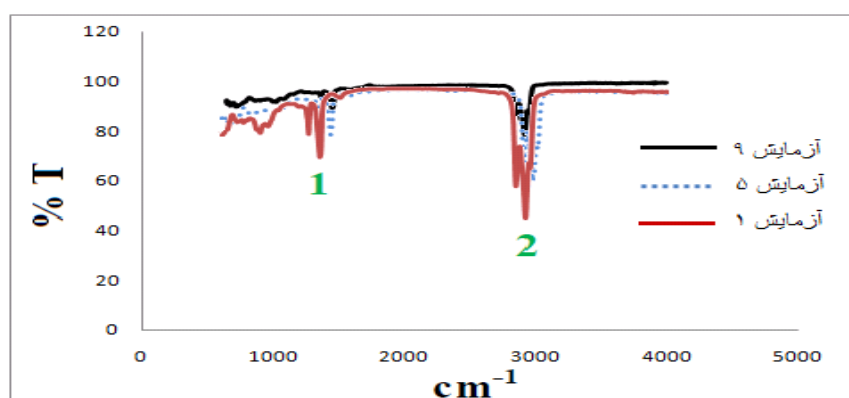
پیک‌های موجود در قسمت اول نمودارها (شماره ۱) بیانگر ترکیبات قطبی نفت و پیک‌های نشان داده شده با شماره ۲ مربوط به ترکیبات غیرقطبی نفت می‌باشند. با دقت در شکل (۶) و مقایسه‌ی ضرایب هر سه آزمایش می‌توان نتیجه گرفت با افزایش میزان برداشت نفت از مخزن، پیک‌های موجود در نمودار ATR کاهش می‌یابد زیرا میزان ترکیبات قطبی و غیر قطبی نفت در آزمایش با ضریب برداشت بیشتر، به میزان بیشتری کاهش یافته است. نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و امولسیون کننده

با وارد شدن به مخزن به دلیل دارا بودن پارامتر سطح به حجم بالا نقش جاذب‌های سطحی مؤثری را دارند و می‌توانند موجب جذب سطحی ترکیبات قطبی و غیرقطبی نفت مثل آسفالتین شده و نقش مؤثری در جهت کاهش و حذف این ترکیبات از نفت داشته باشند؛ که کاهش پیک‌های موجود در نمودار ATR نیز به منزله‌ی کاهش میزان این ترکیبات از نفت می‌باشد. همچنین اضافه کردن نانوذرات و امولسیون کننده باعث تغییر ترشوندگی از نفت‌دوست به آب‌دوست شده و نفت و ترکیبات آسفالتین که باعث نفت‌دوستی می‌شوند از محیط متخلخل خارج شده است لذا میزان ترکیبات غیر قطبی در محیط کمتر شده است. حذف ترکیبات مذکور که از جمله ترکیبات سنگین موجود در نفت خام به حساب می‌آیند، موجب کاهش گرانروی نفت و انتقال روانتر آن درون مخزن و در نتیجه افزایش برداشت نفت می‌شود.

همچنین با توجه به شکل (۶) مشخص است که طول پیک‌ها در آزمایش ۷ به میزان قابل توجهی کاهش یافته است؛ دلیل این امر برداشت میزان نفت بیشتر از مخزن در آزمایش ۷ یا به عبارتی رویش بهتر نفت به دلیل بیشتر بودن میزان دانسیته و اندازه‌ی دهانه‌ی شکاف می‌باشد که سبب وارد شدن حجم بیشتری از سوسپانسیون تزریقی به داخل شکاف‌ها و افزایش سطح تماس سوسپانسیون با بخش ماتریس و در نتیجه برداشت بیشتر در این آزمایش می‌باشد.

– مقایسه طیف‌های حاصل از تزریق نانوذرات و امولسیون کننده با غلظت ۷۵ ppm

طیف‌های بدست آمده از ATR برای تزریق نانوذرات با غلظت ۷۵ ppm در شکل (۷) نشان داده شده است.

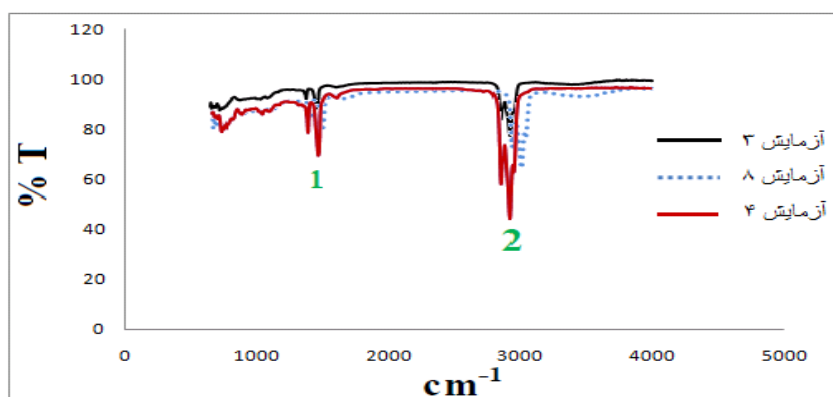


شکل (۷): طیف‌های حاصل از تست ATR برای تزریق نانوذرات و امولسیون کننده با غلظت ۷۵ ppm.

همان‌گونه که در شکل (۷) مشخص است در آزمایش ۹ طول پیک‌ها به مقدار قابل توجهی کاهش یافته که این امر نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر سوسپانسیون تزریقی در آزمایش ۹ نسبت به آزمایش‌های ۱ و ۵ می‌باشد؛ زیرا مقدار عوامل طول و دانسیته‌ی شکاف در آزمایش ۹ بیشتر از دو آزمایش دیگر می‌باشد. با افزایش طول و دانسیته‌ی شکاف‌ها سطح تماس ماتریس و شکاف افزایش یافته و حجم بیشتری از نفت داخل شکاف‌ها رفته و به سمت چاه تولیدی حرکت می‌کند. از طرفی با افزایش عوامل ذکر شده سطح بیشتری از ماتریس در مسیر رویش قرار گرفته و نانوذرات فرصت بیشتری برای عملکرد خود یعنی جذب سطحی آسفالتین و تغییر ترشوندگی سطح محیط متخلخل و کاهش مقدار آن از نفت دارند. بیشتر بودن ضریب برداشت نفت در آزمایش ۹ نیز موید همین موضوع می‌باشد.

– مقایسه طیف‌های حاصل از تزریق نانوذرات و امولسیون کننده با غلظت ۱۰۰ ppm

طیف‌های بدست آمده از ATR برای تزریق نانوذرات و امولسیون کننده با غلظت ۱۰۰ ppm در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸): طیف‌های حاصل از تست ATR برای نانوذرات و امولسیون کننده با غلظت ۱۰۰ ppm.

همان طور که مشخص است با افزایش طول، اندازه‌ی دهانه و دانسیته‌ی شکاف‌ها در آزمایش ۳ و ۸ نسبت به آزمایش ۴ پیک‌های مربوط به ترکیبات قطبی و غیرقطبی نفت کاهش یافته که این موضوع نیز موید افزایش برداشت نفت، ناشی از افزایش طول، اندازه دهانه و دانسیته‌ی شکاف‌ها می‌باشد. افزایش مقدار عوامل ذکر شده منجر به افزایش سطح تماس ماتریس و شکاف و انتقال راحت‌تر نفت به درون شکاف و انتقال آن به سمت چاه تولیدی می‌شود. همچنین افزایش عوامل ذکر شده موجب افزایش سطح تماس ماتریس با سوسپانسیون تزریقی و در نتیجه افزایش مدت زمان عملکرد ماده‌ی مذکور در جهت تغییر ترشوندگی و جذب سطحی ترکیبات سنگین موجود در نفت خام و افزایش میزان برداشت نفت می‌شود.

نتیجه‌گیری

- همان‌طور که مشخص گردید با افزایش عوامل طول، دانسیته و اندازه‌ی دهانه‌ی شکاف‌ها در یک غلظت ثابت از نانوذره‌ی و امولسیون کننده تزریقی به سیستم، ضریب بازیافت نفت از مخزن افزایش می‌یابد.

- با افزایش طول و دانسیته‌ی شکاف‌ها، میزان بازیافت افزایش می‌یابد زیرا با زیاد شدن دو عامل اخیر، به دلیل تراوایی بالای شکاف نفت از مقاطع مختلف وارد شکاف شده و به سمت چاه تولیدی حرکت می‌کند؛ در نتیجه با پر شدن شکاف از نفت، اختلاف فشار و دبی نفت تولیدی افزایش یافته و این امر موجب پیک‌های مرتفع‌تر در نمودار دبی و فشار و نوسانی‌تر شدن نمودارهای مذکور می‌شود. همچنین با افزایش پارامترهای فیزیکی شکاف، سطح تماس سوسپانسیون با نفت موجود در شکاف افزایش یافته و این مخلوط تزریقی فرصت بیشتری به منظور عملکرد خود دارد که مجموع این عوامل منجر به افزایش بازیافت نفت از مخزن می‌گردند.

- توسط نرم‌افزار Minitab این نتیجه حاصل شد که در صورتی که تمامی عوامل از جمله طول، دانسیته، اندازه‌ی دهانه‌ی شکاف، غلظت نانوذره و امولسیون کننده در سطوح بهینه‌ی خود تنظیم شوند، ضریب بازیافت نفت مخزن ۸۰/۹۸ درصد می‌باشد که با مقدار تجربی آن که ۷۵/۱۰ درصد است به دلیل خطاهای ناشی از آزمایش و محاسبات، ۵/۸۸ درصد خطا دارد.

- با تغییر در خواص هندسی شکاف‌ها در یک غلظت ثابت، طول پیک‌های نمودار ATR نیز تغییر می‌یابد که این امر به دلیل تغییر در کیفیت روبش نفت از محیط متخلخل در اثر تغییر در خواص هندسی شکاف می‌باشد. می‌توان کاهش یافتن هر چه بیشتر پیک‌ها را ناشی از روبش بهت نفت و افزایش هر چه بیشتر برداشت نفت از مخزن دانست.

منابع

- [۱] موسوی، سید رامین، (۱۳۹۰)، کاربرد فناوری‌های میکرو و نانو در صنعت نفت و گاز، ماهنامه فناوری نانو، شماره ۱۶۲، صفحه ۱۸-۲۴.
- [۲] عالم‌زاده، ای، وثوقی، م، (۱۳۸۹)، استفاده از نانو ذرات SiO_2 در مرحله سیلاب‌زنی آبی و نحوه تاثیر آن روی تغییرات ترشوندگی مخازن و میزان برداشت نفت، دانشگاه صنعتی شریف، صفحه ۹۵-۱۱۲.
- [3] Tormod Skauge, (2010). Thermally Induced Fines Mobilization: Its Relationship to Wettability and Formation Damage . Bakersfield, California SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium and Western Regional Meeting, 16-18.
- [4] H.M. Zaid, N.Yahya, N. Rasyada, A. Latiff, (2013), The Effect of Nanoparticles Crystallite Size on the Recovery Efficiency in Dielectric Nanofluid Flooding, Journal of Nano Research, Vol. 21, pp. 103-108.
- [6] Karimi, Z. Fakhroueian, A. Bahramian, N. Pour Khiabani, J. Babaei Darabad, R. Azin, S. Arya, (2012), Wettability Alteration in Carbonates using Zirconium Oxide Nanofluids: EOR Implications, Energy & Fuel Article, Vol. 26, No. 2, pp. 1028–1036.
- [5] A. Maghzi, R. Kharrat, A. Mohebbi, M.H. Ghazanfari, (2014), The impact of silica nanoparticles on the performance of polymer solution in presence of salts in polymer flooding for heavy oil recovery, Fuel, 123, pp. 123-132.

کاربرد روش المان مجزا در مکانیسم شکست دیسک‌های شبه‌سنگی حفره‌دار و بررسی مقاومت کششی آن‌ها

حسن سرفراز^{۱*}، محمد فاروق حسینی^۲، آرمین راست بود^۳

۱- دانشجوی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، sarfaraz@ut.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، mfarogh@ut.ac.ir

۳- دکتری مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، armin.rastbood@ut.ac.ir

چکیده

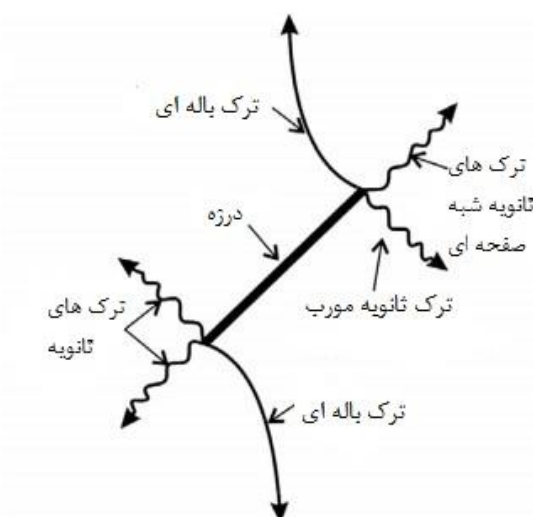
پارامترهای فیزیکی و مکانیکی از قبیل تخلخل، مقاومت فشاری، کششی و مدول الاستیسیته با معیار شکست در ارتباط هستند. توده سنگی عموماً حاوی تخلخل و حفره است. مطالعه مکانیسم انتشار ترک‌ها در سنگ برای طراحی سازه‌های سنگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف این مقاله، بررسی مکانیسم شکست در نمونه‌های شبه سنگی حاوی حفره و تأثیر آن روی مقاومت کششی با استفاده از روش عددی المان مجزا (DEM) است. نتایج مدل‌سازی عددی با تست‌های آزمایشگاهی، مقایسه شده است. در این مقاله تأثیر اندازه و موقعیت قرارگیری حفره‌ها بر الگوی شکست و مقاومت کششی نمونه‌ها بررسی شد. بدین منظور، تعدادی مدل‌سازی عددی با تخلخل‌های 0، 6.18، 6.25، 12.5 و 18.75 درصد برای نمونه‌های دیسکی از سنگ جهت شبیه‌سازی تست برزلی انجام گرفت. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که مدل‌های ساخته‌شده با نرم‌افزار UDEC مطابقت قابل قبولی از لحاظ الگوی شکست و رشد ترک با تست‌های آزمایشگاهی داشت. ترک‌های کششی معمولاً از بالا یا پایین حفره شروع می‌شود و نهایتاً تا سطح تماس نمونه و فک، گسترش می‌یابند. با افزایش تخلخل از صفر تا 6.2 درصد، مقاومت کششی با روند خطی به‌شدت کاهش می‌یابد و سپس با افزایش تخلخل تا 18.75 درصد، به‌صورت نمایی کاهش محسوسی دارد. از مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با مدل‌های آزمایشگاهی نتیجه‌گیری شد که نرم‌افزار UDEC به دلیل حل کرنش مسطح، مقاومت کششی نمونه‌های شبه سنگی را کمتر از آزمونهای آزمایشگاهی تخمین می‌زند.

واژه‌های کلیدی: روش عددی المان مجزا، مکانیسم شکست، مقاومت کششی، نرم‌افزار UDEC، تست برزلی

۱- مقدمه

توده‌های سنگی به دلیل وجود ترک، حفره و تخلخل جز مواد ناهمگن گروه‌بندی می‌شوند. تست‌های متعدد آزمایشگاهی و مشاهدات صحرایی نشان می‌دهند که قسمت‌های ضعیف، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای مقاومت توده سنگ را کاهش می‌دهند. رشد ترک از قسمت‌های ضعیف سنگ شروع می‌شود و نهایتاً با انتشار ترک‌ها در سنگ، شکست رخ می‌دهد [۱-۴]. ترک‌ها می‌توانند به‌عنوان نقطه بحرانی برای شکست نمونه سنگی باشند که از به هم پیوستن و رشد متناوب ترک‌ها، شکست نهایی سنگ اتفاق می‌افتد. بنابراین، مطالعه تولید، گسترش و به هم پیوستن این ترک‌ها در پیش‌بینی فرآیند شکست سنگ نقش مهمی را ایفا می‌کند [۵]. در مقایسه با تحقیقات متعدد در رابطه با مکانیسم شکست در نمونه‌های شبه سنگی حاوی ترک‌های از پیش موجود، مطالعات کمی از مکانیسم شکست در سنگ‌های حفره‌دار (تخلخل) گزارش شده است [۶].

Al-Harthi و همکارانش در سال 1999، تأثیر تخلخل بر مقاومت تک‌محوره و کششی نمونه‌های تالک پر تخلخل (تخلخل از 18 تا 40 درصد) را مطالعه کردند [۷]. این محققین نتیجه گرفتند که هر دو مقاومت تک‌محوره و بار نقطه‌ای با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد. Wong و همکارانش در سال 2006، به مطالعه مکانیسم شکست در نمونه‌های شبه سنگی حاوی یک حفره تحت فشار تک‌محوره پرداختند. با افزایش اندازه قطر حفره، مقاومت نمونه‌ها و تنش شروع شکست کاهش می‌یابد [۱]. مکانیسم رشد ترک‌های از پیش موجود در سنگ برای حالت‌های بارگذاری کششی و برشی متفاوت است و معمولاً به دلیل پایین بودن چقرمگی شکست کششی سنگ اغلب به صورت کششی اتفاق می‌افتد [۸]. غالباً در بارگذاری فشاری تک‌محوری مسیر رشد ترک‌ها به موازات تنش فشاری بیشینه است. برای مطالعه تجربی روند انتشار ترک‌ها در سنگ معمولاً از نمونه‌های شبه سنگی (مواد مصنوعی ساخته‌شده از ترکیب سیمان، گچ و آب) به دلیل در دسترس بودن، قابلیت تکرارپذیری استفاده می‌شود. الگوی ترک‌های ایجادشده عبارت است از (شکل ۱): ترک‌های باله‌ای و ترک‌های ثانویه. ترک‌های باله‌ای، ترک‌های کششی هستند که از مجاور نوک ترک از پیش موجود شروع می‌شوند و به صورت منحنی‌وار در امتداد فشار بیشینه گسترش می‌یابند. ترک‌های ثانویه، ترک‌های برشی هستند که در ابتدا از نوک ترک‌ها شروع می‌شوند و به دو شکل ترک‌های صفحه‌ای یا شبه صفحه‌ای و ترک‌های مورب انتشار می‌یابند [۵].



شکل ۱- الگوی ترک‌های ایجادشده در نمونه شبه سنگی حاوی ترک شیب‌دار مرکزی تحت فشار تک‌محوره [۵]

Park و Bobet در سال 2010، فرآیند شکست را در نمونه‌های شبه سنگی حاوی ۳ ترک باز و بسته از پیش موجود تحت فشار تک‌محوره مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها اختلافات و مشابهات بین ترک‌های باز و بسته با هندسه‌های متفاوت را تشخیص دادند [۹]. در این راستا، Jeon و Lee در سال 2011 با انجام آزمایش تک‌محوری در نمونه‌ای پلی متیل متاکریلی (PMMA) گرانیت دیاستون و گرانیت هانگ دانگ حاوی یک و دو ترک از پیش موجود، فرآیند انتشار و گسترش ترک را بررسی کردند [۱۰].

در این تحقیق، به منظور چگونگی تأثیر حفرات بر مقاومت کششی و مکانیسم شکست با استفاده از تست برزیلی، روش المان مجزا (DEM) بکار رفته است. پارامترها و خواص مکانیکی ورودی در نرم‌افزار UDEC از نتایج آزمایشگاهی مطالعات چاپ شده [۱۱-۱۲] از نمونه Hydro-Stone TB استفاده شده است. سپس نتایج مدل‌سازی عددی با تست‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است.

۲- مروری بر آزمونهای آزمایشگاهی انجام گرفته

در آزمونهای آزمایشگاهی انجام گرفته تعداد ۲۰ آزمون برزلی شامل نمونه های بی حفره و با حفره (تخلخل دار) انجام گرفته است. تعداد، اندازه، شکل و درصد تخلخل نمونه ها مطابق جدول ۱ می باشد. جنس نمونه ها Hydro-Stone TB، قطر نمونه و حفرات کوچک و بزرگ دایروی به ترتیب برابر با 5، 1.786 و 2.54 سانتی متر می باشد [۱۱-۱۲].

جدول ۱- تعداد نمونه های تست برزلی

درصد تخلخل					هندسه ساختار نمونه
18.75	12.5	6.25	6.18	0	
				4	بدون حفره (Solid)
			8		حفرات کوچک دایروی
2	2	4			حفرات بزرگ دایروی

۳- مدلسازی عددی

مدل های عددی، روش های محاسباتی هستند که هدف آن ها نشان دادن پاسخ مکانیکی المان های مختلف می باشد که در معرض شرایطی از قبیل تنش های برجا، سطوح آب زیرزمینی، شرایط مرزی و تغییرات ایجاد شده مثل عملیات حفاری یک شیروانی قرار گرفته اند. روش های عددی توده سنگ و خاک را به بخش های مختلفی تقسیم می کنند به طوری که هر بخش، با ویژگی های خاص مدل مربوط به خود تعریف می شود. مدل رفتاری ماده با استفاده از روابط تنش- کرنش آن ماده تعیین می شود و ساده ترین مدل، مدل الاستیک خطی با ویژگی های مدول یانگ و نسبت پواسون هست. زون ها در مدل عددی ممکن است به یکدیگر متصل باشند که در این صورت مدل پیوسته نامیده می شود و ممکن است به وسیله ناپیوستگی هایی جدا از هم باشند که در این صورت، مدل ناپیوسته نامیده می شود. مدل های ناپیوسته، امکان لغزش و جدایی در یک سطح در مدل را می دهند. بیشتر روش های رایج عددی در مسائل مکانیک سنگ، روش های پیوسته، ناپیوسته و هیبرید یا ترکیبی هستند. نرم افزار UDEC یک برنامه تحلیل عددی دو بعدی است که بر مبنای روش المان مجزا (DEM) برای تحلیل مکانیک سنگی محیط های ناپیوسته بکار می رود [۱۳].

در تست برزلی، نمونه بین دو فک قرار می گیرد و این دو فک با سرعت ثابتی نسبت به یکدیگر حرکت می کنند. مقاومت کششی از رابطه (۱) محاسبه می شود:

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi Dt} \quad (1)$$

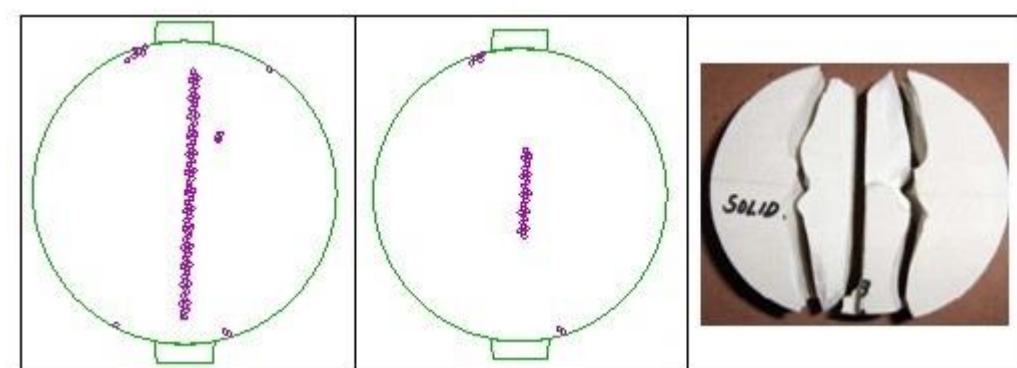
طبق رابطه (۱)، p بار وارد شده در راستای قطر، D قطر و t ضخامت نمونه است. نرخ بارگذاری فک ممکن است بر رفتار مکانیکی نمونه تأثیر بگذارد. بنابراین، نرخ بارگذاری می بایستی تاندازه ای آهسته باشد. نرخ متوسط سرعت فکها در مدلسازی عددی نمونه های شبه سنگی با نرم افزار UDEC حدوداً برابر با $1 \times 10^{-5} \text{ mm/s}$ است. پارامترهای ورودی مدل عددی مطابق جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲- خصوصیات مکانیکی مدل عددی

مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	چسبندگی (MPa)	اصطکاک (درجه)	مقاومت کششی (Mpa)
16	0.25	14	35	5.52

۳-۱- مدل عددی نمونه‌های بدون حفره (Solid)

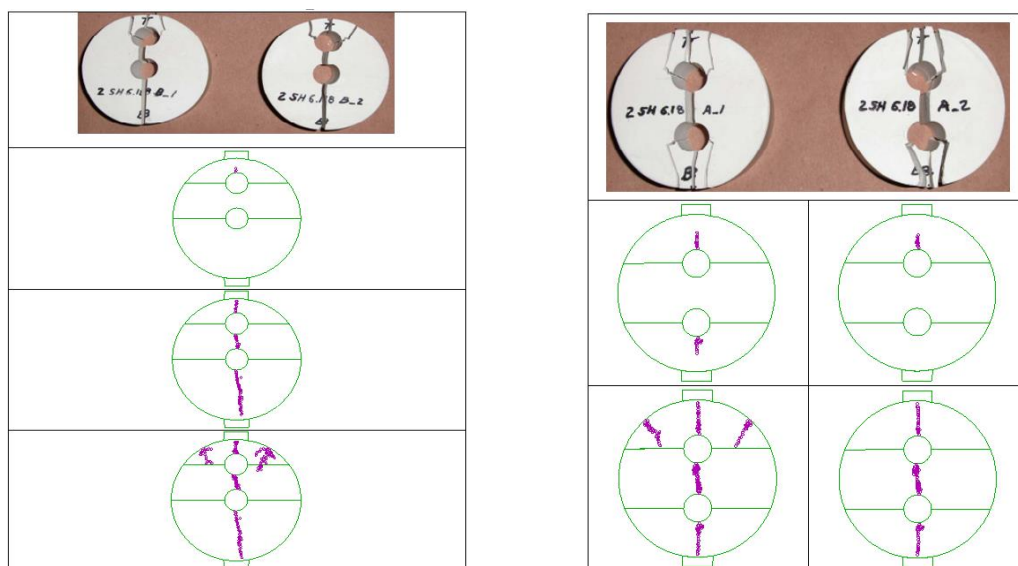
مدل عددی تست برزلی برای نمونه بدون حفره (تخلخل صفر) همراه با تست آزمایشگاهی متناظر آن مطابق شکل ۲ است. طبق این شکل، ابتدا ترک در مرکز نمونه تولید می‌شود. به مرور زمان، ترک تا سطح تماس نمونه با فک، گسترش می‌یابد. نقاط بنفش رنگ بیانگر ترک گسترش‌یافته می‌باشند. در تمامی مدل‌های عددی، خطوط سبز رنگ صرفاً جهت ایجاد حفره در نرم‌افزار UDEC است.



شکل ۲- مدل عددی نمونه تست برزلی بدون حفره همراه با تست آزمایشگاهی

۳-۲- مدل عددی نمونه‌های با تخلخل 6.18 درصد

شکل ۳، شکست نمونه‌های مدل عددی حاوی دو حفره کوچک دایروی (2SH6.18_A و 2SH6.18_B) با تخلخل یکسان 6.18 درصد را به همراه حالت شکست آن‌ها در آزمون آزمایشگاهی نشان می‌دهد. تفاوت این دو نمونه در موقعیت قرارگیری حفرات است. در این نمونه‌ها راستای قرارگیری حفرات به موازات راستای بارگذاری نمونه‌ها است. برای هر دو حالت از نمونه‌ها، شکست ابتدا در حفره بالایی شکل می‌گیرد. سپس ترک‌ها در حفره پایینی گسترش می‌یابند و در انتها ترک کل نمونه را فرا می‌گیرد. نقاط بنفش رنگ بیانگر ترک گسترش‌یافته می‌باشند.

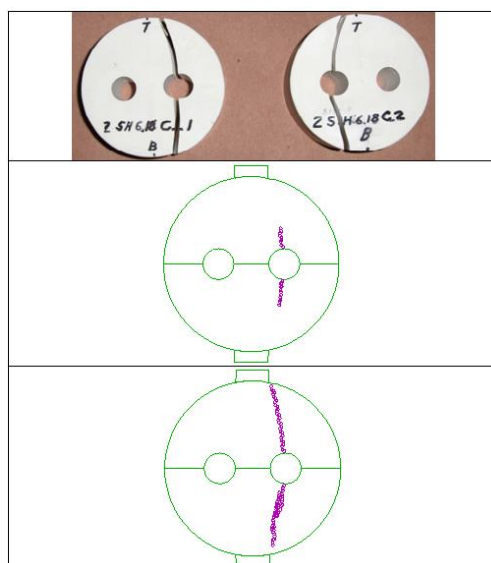


۳-۲- نمونه (2SH6.18_B1 و 2SH6.18_B2)

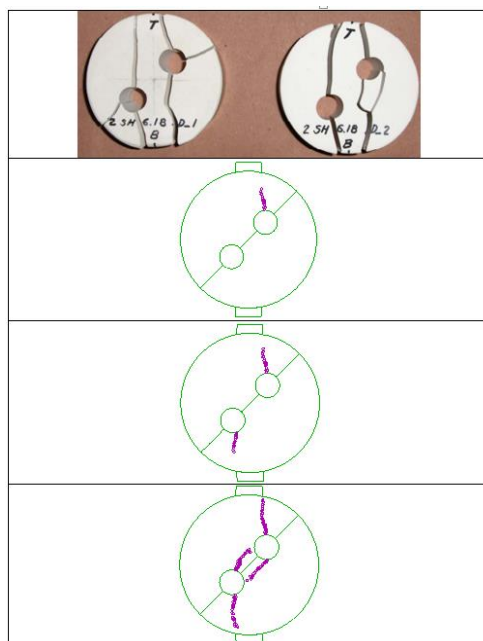
۳-۱- نمونه (2SH6.18_A1 و 2SH6.18_A2)

شکل ۳- مدل عددی نمونه‌های با تخلخل یکسان 6.18 درصد (2SH6.18_A و 2SH6.18_B) همراه با تست آزمایشگاهی

شکل ۴ و ۵، به ترتیب شکست نمونه مدل عددی حاوی دو حفره کوچک دایروی (2SH6.18_C1 و 2SH6.18_C2) و (2SH6.18_D1 و 2SH6.18_D2) را به همراه نمونه‌های متناظر آزمایشگاهی آن‌ها نشان می‌دهد. نمونه‌ها در آزمایشگاه به‌منظور تکرارپذیری الگوی شکست و تعیین مقاومت کششی، دو بار تست شده‌اند. در شکل ۴ راستای قرارگیری حفرات عمود بر راستای بارگذاری نمونه‌ها بوده و در شکل ۵ راستای قرارگیری حفرات نسبت به راستای بارگذاری نمونه‌ها متمایل است. مطابق شکل ۴، شروع شکست در بخش پایینی یکی از دو حفره است. سپس ترک‌ها در بالا و پایین این حفره، تا سطح تماس نمونه و فک گسترش می‌یابند. طبق شکل ۵، شکست از بالای حفره بالایی و سپس از ناحیه پایینی حفره پایینی شروع می‌شود.



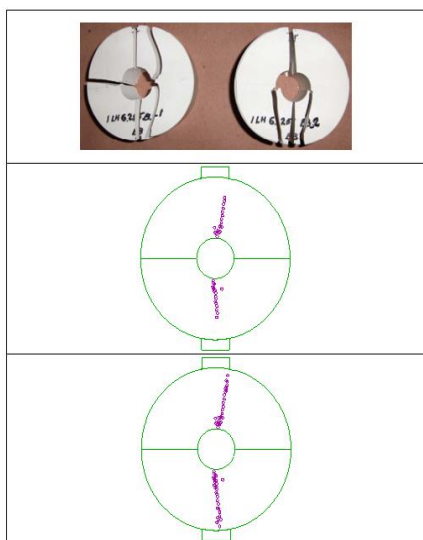
شکل ۴- مدل عددی نمونه‌های با تخلخل 6.18 درصد (2SH6.18_C1 و 2SH6.18_C2) همراه با تست آزمایشگاهی



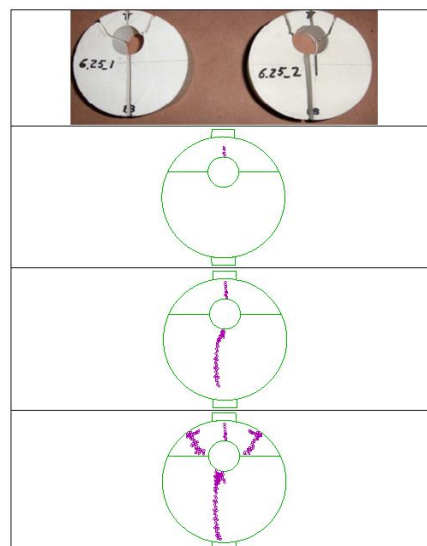
شکل ۵- مدل عددی نمونه‌های با تخلخل 6.18 درصد (2SH6.18_D1 و 2SH6.18_D2) همراه با تست آزمایشگاهی

۳-۳- مدل عددی نمونه‌های با تخلخل 6.25 درصد

شکل ۶ و ۷، به ترتیب شکست مدل عددی نمونه شبه سنگی حاوی حفره بزرگ دایروی با تخلخل 6.25 درصد (1LH6.25_A) و (1LH6.25_B) را به همراه مدل آزمایشگاهی متناظر آن‌ها نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶، که در آن حفره در بخش فوقانی نمونه قرار دارد، شکست از بالای حفره ایجاد می‌شود و به تدریج ترک از پایین حفره گسترش می‌یابد. طبق شکل ۷، که در آن حفره در بخش مرکزی نمونه قرار دارد، شکست از دو طرفین حفره شروع و تا سطح بیرونی نمونه امتداد می‌یابد.



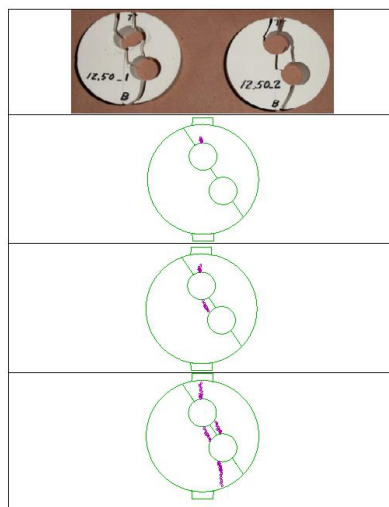
شکل ۷- مدل عددی نمونه‌های با تخلخل 6.25 درصد (1LH6.25_B)



شکل ۶- مدل عددی نمونه‌های با تخلخل 6.25 درصد (1LH6.25_A)

۳-۴- مدل عددی نمونه‌های با تخلخل 12.5 درصد

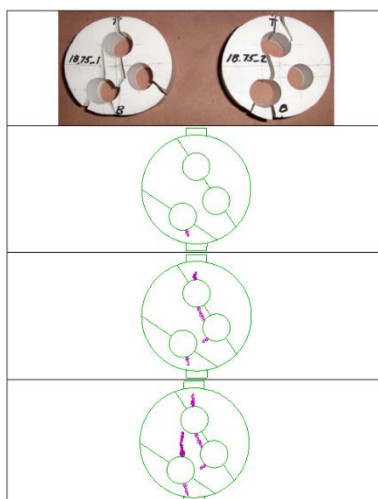
شکل ۸، شکست نمونه شبه سنگی حاوی دو حفره بزرگ دایروی با تخلخل 12.5 درصد (2LH12.5_A1 و 2LH12.5_A2) را به همراه نمونه‌های متناظر آزمایشگاهی آن‌ها نشان می‌دهد. ترک اولیه از بالای حفره بالایی شروع می‌شود و سپس ترک بین دو حفره رشد ایجاد شده و نهایتاً شکست نمونه رخ می‌دهد.



شکل ۸- مدل عددی نمونه‌های با تخلخل 12.5 درصد (2LH12.5_A1 و 2LH12.5_A2) همراه با تست آزمایشگاهی

۳-۵- مدل عددی نمونه‌های با تخلخل 18.75 درصد

شکل ۹، بیانگر نحوه شکست نمونه شبه سنگی حاوی سه حفره بزرگ دایروی با تخلخل 18.75 درصد است (3LH18.75_A1 و 3LH18.75_A2). مطابق این شکل، ترک اولیه از پایین حفره پایینی شروع می‌شود. سپس ترک‌ها گسترش می‌یابند و سرانجام نمونه دچار شکست می‌شود.



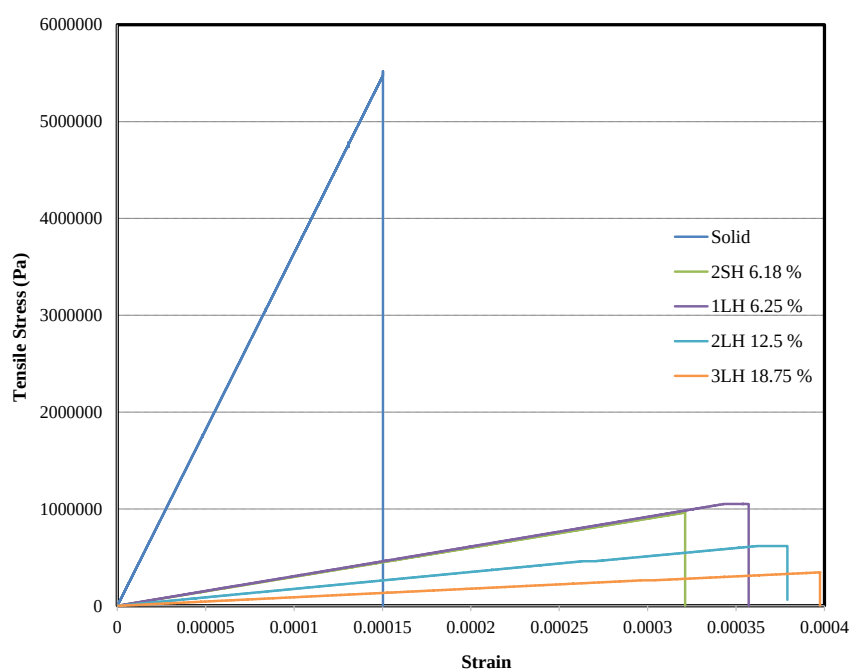
شکل ۹- مدل عددی نمونه‌های با تخلخل 18.75 درصد (3LH18.75_A2 و 3LH18.75_A1) با تست آزمایشگاهی

۴- مقایسه بین نتایج مدلسازی عددی با تست‌های آزمایشگاهی

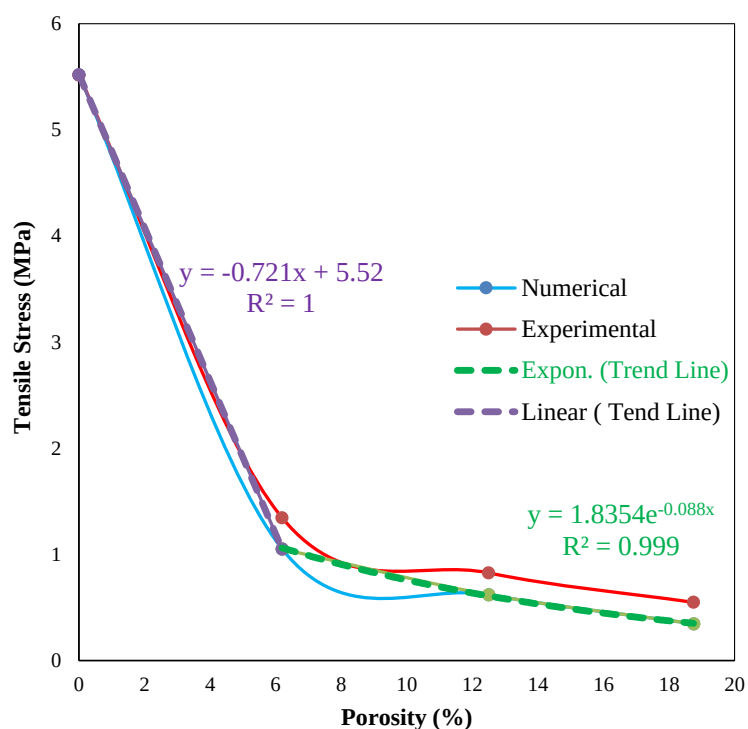
در شکل ۱۰، منحنی تنش-کرنش مدل‌های عددی شبه سنگی با درصد تخلخل 0، 6.18، 6.25، 12.5 و 18.75 درصد ترسیم شده است. مطابق این نمودار، با افزایش تخلخل از صفر تا حدود 6.2 درصد، مقاومت کششی نمونه حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین این مقاومت با افزایش تخلخل تا ۲۰ درصد، کاهش محسوسی دارد. مقادیر مقاومت کششی نمونه‌های آزمایشگاهی و مدلسازی عددی نمونه‌های شبه سنگی در جدول ۳ آمده است. شکل ۱۱ منحنی مقاومت کششی در برابر درصد تخلخل را برای نتایج حاصل از آزمونهای آزمایشگاهی و مدلسازی عددی نشان می‌دهد. نحوه تغییر مقاومت کششی نمونه با تخلخل صفر تا تخلخل 6.2 درصد، به صورت خطی و از تخلخل 6.2 تا 18.75 درصد، به صورت نمایی است.

جدول ۳- مقاومت کششی آزمایشگاهی و مدلسازی عددی در برابر تخلخل

درصد تخلخل	مقاومت کششی حاصل از تست آزمایشگاهی (MPa)	مقاومت کششی حاصل از مدلسازی عددی (MPa)
0	5.516	5.52
6.2	1.34	1.05
12.5	0.82	0.62
18.75	0.54	0.35



شکل ۱۰- منحنی تنش کرنش نمونه‌های شبه سنگی حاصل از مدلسازی عددی



شکل ۱۱- مقاومت کششی آزمایشگاهی و مدلسازی عددی در برابر تخلخل

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، برای بررسی مکانیسم شکست نمونه‌های شبه سنگی حاوی تخلخل‌های مختلف تحت آزمون برزیلی، مدل‌های عددی با نرم‌افزار UDEC بر مبنای روش عددی المان مجزا استفاده شد. ساختار مدل‌های عددی بر اساس آزمونهای برزیلی از قبل انجام گرفته بر روی نمونه‌های شبه سنگی می‌باشد. نرم‌افزار UDEC مطابقت قابل قبولی از لحاظ الگوی شکست

و رشد ترک با تست‌های آزمایشگاهی از قبل انجام گرفته دارد. نتایج مدلسازی عددی نشان داد که اندازه و موقعیت قرارگیری حفره در نمونه شبه سنگی بر الگوی شکست و مقاومت کششی تأثیرگذار است. شکست کششی معمولاً از بالا یا پایین حفره شروع می‌شود و ترک‌ها تا سطح تماس نمونه و فک، گسترش می‌یابند. با افزایش تخلخل، مقاومت کششی کاهش می‌یابد. این تغییر به‌گونه‌ای است که از نمونه بدون تخلخل تا تخلخل 6.2 درصد، مقاومت کششی با روند خطی به‌شدت کاهش می‌یابد و سپس با افزایش تخلخل تا 18.75 درصد، به‌صورت نمایی کاهش محسوسی دارد. نرم‌افزار UDEC به دلیل حل کرنش مسطح، مقاومت کششی نمونه‌های شبه سنگی را کمتر از تست‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] R. Wong, P. Lin, C.A. Tang, Experimental and numerical study on splitting failure of brittle solids containing single pore under uniaxial compression, *Mech. Mater.* 38 (1) (2006) 142–159.
- [2] P. Baud, T. Wong, W. Zhu, Effects of porosity and crack density on the compressive strength of rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 67 (2014) 202–211.
- [3] K. Oraee, N. Oraee, A. Goodarzi, P. Khajepour, Effect of discontinuities characteristics on coal mine stability and sustainability: a rock fall prediction approach, *Int. J. Min. Sci. Technol.* 26 (1) (2016) 65–70.
- [4] S.S. Peng, Topical areas of research needs in ground control – a state of the art review on coal mine ground control, *Int. J. Min. Sci. Technol.* 25 (1) (2015) 1–6
- [5] حائری، هادی؛ (۱۳۹۰)؛ مدلسازی عددی ارتباط بین ترکهای میکرو با ترکهای ماکرو در مکانیسم شکست سنگ با استفاده از روش ناپیوستگی جابه‌جایی؛ پایان‌نامه دکتری؛ دانشکده مهندسی معدن؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران
- [6] P. Lin, R.H.C. Wong, C.A. Tang, Experimental study of coalescence mechanisms and failure under uniaxial compression of granite containing multiple holes, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 77 (2015) 313–327
- [7] A.A. Al-Harthi, R.M. Al-Amri, W.M. Shehata, The porosity and engineering properties of vesicular basalt in Saudi Arabia, *Eng. Geol.* 54 (3–4) (1999) 313–320.
- [8] Ke, C.C., Chen, C.S., Tu, C.H.; 2008; “Determination of fracture toughness of anisotropic rocks by boundary element method”; *Rock Mech. Rock Engng.* Vol.41, pp.509–538.
- [9] Park CH, Bobet A (2010) “Crack initiation, propagation and coalescence from frictional flaws in uniaxial compression. *Engin. Fract. Mech.*, Vol.77, pp.2727–2748.
- [10] Lee, H., Jeon, S.; 2011; “An experimental and numerical study of fracture coalescence in precracked specimens under uniaxial compression”; *Int. J. of Solids and Structures*, Vol.48 pp.979–999
- [11] A.N. James, *Tensile Strength and Failure Criterion of Analog Lithophysal Rock*, George Washington University, Washington, 2009.
- [12] P. Lin, R.H.C. Wong, C.A. Tang, Experimental study of coalescence mechanisms and failure under uniaxial compression of granite containing multiple holes, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 77 (2015) 313–327.
- [13] Itasca Consulting Group, UDEC- Universal Distinct Element Code, version 6, 2014.

Application of Distict Element Method in Fracture Mechanism of Pseudo-Rock Samples Using Brazilian Test

Abstract

Physical and mechanical characteristics such as porosity, compressive and tensile strength and elasticity modulus are including parameters of rock mass in fracture criterion. Generally, porosity and voids are common weakness factors of rock mass. Investigation of crack propagation mechanism is most important phase in rock engineering. In this paper, Brazilian tensile tests of pseudo-rock samples were conducted using Distinct Element Method (UDEC Software). These samples contain different number, arrangement and size of holes. Porosity percentages of samples were 0, 6.18, 6.25, 12.5 and 18.75. Results of numerical modelling were compared with corresponding pre-available laboratory ones. Crack initiation, propagation and coalescence in numerical models had good conformity with experimental tests. Typically, tensile cracks were initiated in bottom or top of the holes, propagated parallel to loading axis and finally reached to the sample surface. By increasing porosity values from zero to 6.2 percent, tensile strength decreases in linear mode intensively. Exponential decreasing of tensile strength was observed for porosity values between 6.2 to 18.75 percent. Due to plain strain analysis of UDEC software, tensile strength are estimated less than experimental tests values.

مطالعه آزمایشگاهی استفاده از بازدارنده‌های ترمودینامیکی برای جلوگیری از تشکیل پدیده هیدرات گازی در پالایشگاه ششم پارس جنوبی

عبدالحمید انصاری^۱، محمد کشتکار^۲

۱- نویسنده مسئول، گروه مهندسی نفت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لامرد، لامرد، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لامرد، لامرد، ایران

abdolhamida61@gmail.com

چکیده

در این پژوهش استفاده از بازدارنده‌های ترمودینامیکی برای جلوگیری از تشکیل هیدرات گازی در پالایشگاه ششم پارس جنوبی بصورت آزمایشگاهی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. برای این منظور از چندین نمونه گاز استفاده خواهد شد. سپس شرایط ترمودینامیکی تشکیل هیدرات با استفاده از روش کاهش دما و جستجوی فشار مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای این منظور با استفاده از یک سامانه آزمایشگاهی فشار بالا آزمایش‌ها در دما و فشارهای مختلف انجام شود. برای محاسبه دما و فشار تعادلی تشکیل هیدرات در حضور متانول به آب تزریقی به راکتور مطابق با شرایط آزمایش به ترتیب ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰ و ۲۵ متانول اضافه می‌کنیم و دوباره آزمایش را تکرار می‌کنیم. این آزمایش‌ها در دو فشارهای مختلف مربوط به گاز خروجی از برج متان‌زدا انجام شده است. نتایج نشان داد که نقاط تعادلی بدست آمده همخوانی مناسبی با داده‌های واقعی مجتمع دارند. همچنین روش کتر برای پیش‌بینی نقاط تعادلی در برابر نتایج آزمایشگاهی دارای خطا می‌باشد. روش مطیعی از همخوانی بالاتری نسبت به روش کوبایوشی دارا بود. ظرفیت ذخیره سازی گاز پالایشگاه پارس جنوبی با بالا رفتن فشار افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: بازدارنده‌های ترمودینامیکی، هیدرات گازی، پالایشگاه، پارس جنوبی، نقطه شبنم

۱- مقدمه

ذخایر گاز ثبت شده جهان تا ابتدای سال ۲۰۱۴ میلادی برابر ۱۷۷/۳۶ تریلیون متر مکعب برآورد شده است که ۲۷/۸ تریلیون متر مکعب از این ذخایر در کشور ما واقع شده و ایران با داشتن ۱۵/۷ درصد از گاز جهان بعد از کشور روسیه (۲۶/۷) در مقام دوم قرار دارد.

گاز طبیعی و نفت خام به طور طبیعی در مخازن زیرزمینی در تماس با آب می‌باشند. مولکول‌های آب به خاطر داشتن پیوندهای هیدروژنی قوی با وجود آوردن حفره‌هایی تشکیل ساختار شبه شبکه‌ای می‌دهند. این ساختار که به عنوان شبکه هیدرات خالی شناخته می‌شود ناپایدار است. در شبکه کریستالی آن‌ها مولکول‌های گاز (مهمان) با قطرهای مولکولی کوچکتر از قطر حفره‌ها، درون قفس‌هایی که به وسیله مولکول‌های آب (میزبان) و به واسطه پیوندهای هیدروژنی بین آن‌ها ایجاد شده محبوس شده و به دلیل برهمکنش به وجود آمده بین مولکول‌های مهمان و میزبان ساختار ایجاد شده پایدار می‌گردد و این ماده کریستالی تشکیل شده شبیه یخ به عنوان هیدرات گازی شناخته می‌شود [۱].

هیدرات‌های گازی یا کریستال‌های هیدرات ترکیبی برفک گونه از آب و گاز می‌باشند که در ابتدا ممکن است با یخ یا برفک معمولی اشتباه گرفته شود و فرمول عمومی آن‌ها بصورت $M.n H_2O$ می‌باشد که M شامل مولکول تشکیل دهنده هیدرات می‌باشد. این ترکیبات که در دماهای پایین و فشارهای نسبتاً بالا تشکیل می‌شوند از خانواده کلاتریت‌ها^۱ هستند. کلاتریت‌ها از ترکیب تعدادی مولکول میزبان و یک یا چند مولکول مهمان تشکیل می‌شوند. پایداری این ترکیبات به حضور هر دو جزء وابستگی کامل دارد و مولکول‌ها میزبان با تشکیل حفره‌هایی مولکول‌های مهمان را در خود جای می‌دهند. در پدیده تشکیل هیدرات‌های گازی مولکول‌های آب که نقش مولکول‌های میزبان را بازی می‌کنند با تشکیل پیوند هیدروژنی با یکدیگر فضاهای توخالی را به وجود می‌آورند که در دما و فشارهای خاص مولکول‌های مهمان که از نظر ابعاد مناسب این حفره‌ها و فضاهای توخالی هستند، می‌توانند درون این حفره‌ها قرار گیرند و کریستال هیدرات را به وجود آورند. گازهای بسیاری وجود دارند که می‌توانند نقش مولکول‌های مهمان را بازی کنند، از آن جمله می‌توان به گازهای متان^۲، اتان^۳، پروپان^۴، دی‌اکسید کربن، سولفید هیدروژن^۵ و غیره اشاره کرد.

ذکر این نکته ضروری است که، در این نوع کریستال‌ها هیچ نوع پیوند شیمیایی بین مولکول‌های آب و مولکول‌ها گاز که درون حفره‌ها قرار می‌گیرند به وجود نمی‌آید و پایداری کریستال هیدرات وابسته به پیوند هیدروژنی بین مولکول‌های آب (مولکول‌ها میزبان) و نیروهای واندروالس که بین مولکول‌ها میزبان- مهمان به وجود می‌آید، است. نتایج تحقیقات انجام شده تا سال ۱۹۵۰ مشخص کرده است که برای تشکیل هیدرات سه شرط لازم است:

آب به صورت فاز مایع یا یخ

وجود مولکول‌های گازی کوچک نظیر متان، اتان، پروپان و آرگون

فشارهای بالا و دماهای پایین

کریستال‌های هیدرات زمانی برای نخستین بار در مقیاس صنعتی مورد توجه قرار گرفتند که عامل انسداد و گرفتگی خطوط انتقال گاز طبیعی معرفی شدند.

سلامت و همکاران (۱۳۹۰) در پژوهشی اثر افزودن بازدارنده‌های سینتیکی با غلظت‌های مختلف برروی زمان القای تشکیل هیدرات‌های گازی سولفید هیدروژن در یک راکتور با قابلیت تنظیم دمای خودکار مورد بررسی دادند. با توجه به اینکه کاهش دما برج‌های سرد واحد تبادل دو دمایی H_2S-H_2O در تولید آب سنگین باعث افزایش ضریب جداسازی دو تریوم و در نتیجه افزایش بازدهی فرایند می‌شود لذا استفاده از افزودنی‌هایی که زمان تاخیر تشکیل هیدرات را افزایش می‌دهند کمک شایانی در جهت کاهش دمای بخش سرد خواهد کرد در آزمایش‌ها انجام شده با استفاده از بازدارنده‌ی سینتیکی ال تیروزین^۶ و پلی وینیلدن پیرولیدین^۷ با افزایش زمان تاخیر غلظت بهینه این مواد جهت عبور ماده فرآیندی از برج‌های سرد بدون تشکیل هیدرات تعیین شده است [۲].

طباطبایی نژاد و خداپناه (۱۳۹۰) در تحقیقی بررسی اثر تشکیل رسوب واکس برروی هیدرات را مورد بررسی قرار دادند. هدف توسعه یک مدل ترمودینامیکی با قابلیت پیش بینی هم زمان تعادل فازهای واکس و هیدرات همچنین بررسی تاثیر تشکیل رسوب واکس برروی هیدرات می‌باشد مدل ترمودینامیکی ارائه شده برای واکس برمبنای تئوری محلول‌های جامد می‌باشد که به طور موفقیت آمیزی با مدل هیدرات ترکیب شده و برای پیش بینی هم زمان پنج فاز مایع هیدروکربن - مایع آب - بخار واکس و هیدرات به کاررفته است به منظور بررسی تاثیر تشکیل واکس بر روی هیدرات نمونه‌های نفتی مختلف مورد

^۱ - Clathrate

^۲ - CH_4

^۳ - C_2H_6

^۴ - C_3H_8

^۵ - H_2S

^۶ - L-Tyrosine

^۷ - PVP

استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که تشکیل رسوب واکس می تواند ترمودینامیک و همچنین سینتیک تشکیل هیدرات را تحت تاثیر قرار دهد از نقطه نظر ترمودینامیکی تشکیل واکس باعث حذف بعضی از ترکیبات هیدروکربنی سنگین شده و بنابراین با انتقال مرز فازی هیدرات از اجزای سبک ناحیه آزاد هیدرات را کاهش می دهد [۳].

بردول و همکاران (۱۳۹۴) در یک پژوهش پیش بینی دمای تشکیل هیدرات متان در حضور بهبود دهنده ۱ و ۳ دیاکسولان با استفاده از الگوریتم GP و PSO را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش شرایط تشکیل هیدرات متان در حضور ۱ و ۳-دی اکسولان پیش بینی شده است. آنتالپی تشکیل توسط یک رابطه تجربی ساده که تابعی از فشار و غلظت بهبود دهنده با استفاده از الگوریتم پهنه سازی توده ذرات^۱ و برنامه ریزی ژنتیک^۲ ارائه شده است. محدوده فشار در میان هفت غلظت متفاوت بین ۲/۰۶ و ۱۴/۰۵ مگاپاسکال می باشد. میانگین خطای مطلق دمای تشکیل هیدرات ۰/۲۶ کلوین است که نشان دهنده توانایی بالای این رابطه برای پیش بینی دمای تشکیل هیدرات متان در حضور ۱ و ۳-دی اکسولان است [۴].

اسلون (۲۰۰۹) در مقاله ای شرایط تعادل سه فازی (هیدرات - مایع - بخار) برای سیستم کلرو دی فلورو متان - آب در محدوده دمایی ۲۷۸ تا ۲۸۹ کلوین و فشار ۲ تا ۸ بار به صورت تجربی تعیین کردند. در ادامه به مدل سازی ترمودینامیکی شرایط تشکیل برای پیش بینی فشار تعادلی هیدرات کلرو دی فلورو متان (با نام تجاری R22) پرداختند. به این منظور از دو معادله حالت RSK و VPT استفاده شد. نتایج به دست آمده از مدل خطایی در حدود ۳٪ با داده های آزمایشگاهی به دست آمده هم پوشانی داشته و تطابق مناسبی میان نتایج تجربی و محاسباتی وجود دارد [۵].

۲- روش تحقیق

واحد ۱۰۵ یک واحد مرکاپتان زدایی و تنظیم نقطه شبنم^۳ می باشد خوراکی که در واحد ۱۰۴ آماده شده است آبی کمتر از ۰/۳ mole% دارد این مقدار برای اطمینان از عدم تشکیل یخ و هیدرات در مناطق سرد واحد ۱۰۵ است. اندازه گیری آب در خوراک ورودی نشان می دهد که بعضاً مقدار آب کمتر از مقدار مشخص شده است ولی با این وجود انسدادی در مسیر گاز خوراک در ورودی مبدل کلد باکس و جریان خروجی از کلد باکس و بالای برج دی متانایزر به صورت دوره ای مشاهده می شود. جریان دوم گاز پس از ورود مجدد به مبدل کلد باکس، تا دمای ۸۶- سانتی گراد سرد شده و به عنوان مایع رفلکس از بالا وارد برج دی متانایزر می شود تا بازیابی اتان و محصولات سنگین بهتر انجام شود. برج دی متانایزر دارای ۳۱ سینی می باشد و در فشار عملیاتی ۳۰ بار کار می کند تا بتواند به طور مؤثری متان را از دیگر ترکیبات سنگین جدا کند. دمای بالای برج حدود ۸۶- سانتی گراد و پایین برج ۶۰ درجه سانتی گراد است مایعات ته برج به منظور جداسازی اتان توسط پمپ های 105-P- 101A/B به برج دی اتانایزر فرستاده می شود.

گاز خروجی از بالای برج دی متان (گاز فروشی^۴) جهت صادرات به واحد ۱۰۶ فرستاده می شود ولی قبل از آن وارد مبدل کلد باکس شده تا دمای افزایش یابد سپس وارد قسمت کمپرسور دستگاه توربوکسپندر شده فشار آن افزایش یافته و به واحد ۱۰۶ ارسال می شود.

- نقاط مورد نمونه گیری

- گاز ورودی به مبدل کلد باکس
- گاز خروجی از برج دی متانایزر

1 - PSO

2 - GP

3 - Dew Point and mercaptans removal

4 - Sale gas

(۱) گاز ورودی به مبدل کلد باکس

این گاز، گاز خروجی از واحد Dehydration یا همان واحد ۱۰۴ می باشد که ورودی به واحد ۱۰۵ می باشد گازی که در واحد ۱۰۴ خشک شده است و آماده ورود به واحد ۱۰۵ و در نهایت برج دی متان می باشد.

(۲) گاز خروجی از برج

که این گاز در اصل گاز فروش یا همان Export gas پالایشگاه می باشد، که عموماً شامل هیدروکربن‌های سبک (C_1 & C_2) است که همانطور که در فصول قبل ذکر شد، یکی از مکان‌هایی که مستعد تشکیل هیدرات است، این نقطه می باشد.

Test set # 1

Unit: Dew pointing & mercaptans removal Unit 105

Temperature of laboratory: 22 °C

Sampling bomb: stainless steel bomb

Train 1	Vapor
Feed	$1.5 \frac{mg}{lit}$

Test set # 2

Unit: Dew pointing & mercaptans removal Unit 105

Temperature of laboratory: 22 °C

Sampling bomb: stainless steel bomb

Train 2	Vapor
Feed	$3.5 \frac{mg}{lit}$
Top of Dematanizer	$3.4 \frac{mg}{lit}$

Test set # 3

Unit: Dew pointing & mercaptans removal Unit 105

Temperature of laboratory: 22 °C

Sampling bomb: stainless steel bomb

Train 2	Vapor
Feed	$0.5 \frac{mg}{lit}$
Top of Dematanizer	$4.6 \frac{mg}{lit}$

در این تحقیق با توجه مشکلات بیشتر در ردیف اول گازی پالایشگاه از نمونه این ردیف گازی استفاده شده است. با توجه به اینکه آزمایش‌ها مربوط به تعیین شرایط تشکیل هیدرات توسط یک دستگاه خاص انجام شده است به معرفی دستگاه پرداخته خواهد شد. در ضمن ابتدا موادی که در این سری آزمایش‌ها استفاده خواهد شد را معرفی خواهیم کرد.

- مواد

موادی که در آزمایش‌ها به کار رفته شامل دو قسمت می باشد:

- گاز پالایشگاه گاز پارس جنوبی
- آب دیونیزه

- سیلندر گاز پالایشگاه

سیلندر گاز ۲ لیتری با ترکیب درصد جدول زیر از گاز پالایشگاه نمونه گیری شده است:

جدول (۱): مواد ورودی به آزمایش

Analysis	Unit	
N ₂	mol%	3.736177
CO ₂	mol%	0.688712
Methane	mol%	90.942186
Ethane	mol%	4.297314
Propane	mol%	0.324344
i-butane	mol%	0.007253
n-butane	mol%	0.004014
i-pentane	mol%	0.000000
n-pentane	mol%	0.000000
C ₆ ⁺	mol%	0.000000
GHV	Kcal/Nm ³	9439.1
Total Sulphur	mg/SCM	10.5
HC Dewpoint	(°C) at 55 bar	<-30
Water Dewpoint	(°C) at 55 bar	-70
Water Content	mg/SCM	6.3
H ₂ S	mg/SCM	1.3
RSH	mg/SCM	8.0
Deionized water	ml	150

- شرح دستگاه تشکیل هیدرات

شرایط عملیاتی دستگاه فشار بالا و دمای پایین و جنس تمامی قطعات از کربن استیل است که با اتصال سنسورهای دما و فشار به کامپیوتر داده ها در بازه های زمانی یک ثانیه پردازش و ثبت می شوند. سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده

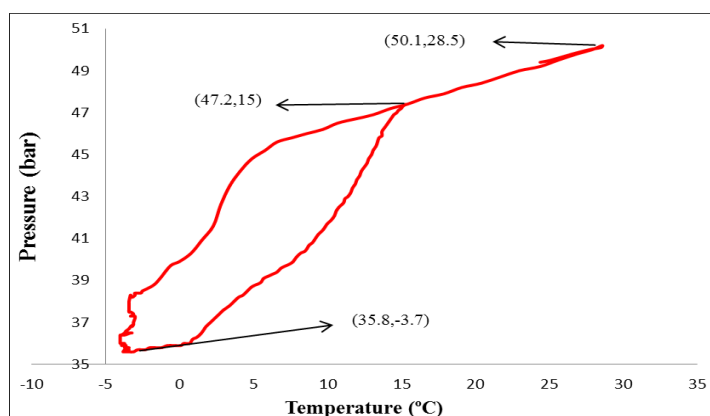
در این دستگاه بصورت دقیق و قابل تنظیم اختلاط خوبی بین فازهای آب و گاز برقرار می‌شود. برای انجام آزمایش‌ها از یک محفظه دو جداره استفاده می‌شود. جدار داخلی این محفظه مجهز به چهار عدد کالر (1/2"ASTM A105 CLASS 3000) با شیرهای سوزنی فشار بالا است که این شیرها جهت تزریق آب و گاز و همچنین تخلیه آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در جداره پوسته خارجی نیز چند منفذ برای ورود و خروج سیال مبرد تعبیه شده است. سیال مبرد توسط یک حمام مجهز به کنترل کننده قوی دما در دمای پایین ثابت می‌ماند. راکتور تشکیل هیدرات به همراه تمامی اتصالات و لوله‌های انتقال سیال مبرد به خوبی عایق شده‌اند. برای اختلاط کامل میان آب و گاز از سیستم همزن با یک الکتروموتور استفاده می‌شود.

- شرح آزمایش

ابتدا راکتور تشکیل هیدرات را با آب دیونیزه شستشو داده و سپس اجازه می‌دهیم تا کامل خشک و آب تخلیه می‌شود. جهت تخلیه هوای داخل راکتور از یک طرف نمونه گاز مورد آزمایش را وارد کرده واز مسیر دیگر تخلیه کامل هوای داخل راکتور انجام می‌گیرد سپس ۱۵۰ میلی لیتر آب دریا را با سرنگ دقیق ۵۰ سی‌سی در سه مرحله وارد راکتور تشکیل هیدرات می‌کنیم. مبدل حرارتی را روشن کرده و همزدن را آغاز می‌کنیم و صبر می‌کنیم تا دمای راکتور به دمای اولیه برسد. با استفاده از سیلندر گاز، راکتور تشکیل هیدرات را تا فشار مورد نظر برای انجام آزمایش از گاز مورد نظر پر می‌کنیم. و حال شیر سوزنی تزریق گاز را می‌بندیم اتصالات بین سیلندر و راکتور را جدا می‌کنیم. هنگامی که دمای راکتور ثابت شد نرم افزار ثبت و جمع‌آوری داده‌ها را فعال کرده و داده‌های دما و فشار سیستم بطور خودکار ثبت می‌شود. و به آرامی دمای سیرکولاتور را پایین می‌آوریم لازم به ذکر است که کل مسیر چرخش سیال مبرد به دور راکتور کامل عایق است اما باز هم هدر روی انرژی مشاهده می‌شود و دما سیرکولاتور و راکتور هیچگاه یکسان نمی‌شود. لحظه تشکیل هیدرات و ادامه فرآیند از طریق تغییرات دما و فشار راکتور مشاهده می‌شود. در هنگام تشکیل هیدرات به دلیل گرمازا بودن فرآیند دمای راکتور اندکی افزایش می‌یابد و همچنین به دلیل مصرف گاز جهت تولید هیدرات فشار راکتور بطور پیوسته کاهش می‌یابد. بعد از تشکیل هیدرات فشار راکتور بطور پیوسته کاهش می‌یابد و دمای سیستم تقریباً ثابت می‌ماند. بعد از آنکه تغییرات فشار داخل راکتور با زمان بسیار ناچیز شد (0/1 bar/hr)، فرض می‌شود که تشکیل هیدرات پایان یافته است. و با بالا بردن دمای سیرکولاتور به آرامی دمای سیستم را بالا می‌بریم تا در یک نقطه منحنی (سرمایش و گرمایش) یا (جذب و دفع) همدیگر را قطع کنند که آن را نقطه تعادلی هیدرات گویند. و با پر کردن راکتور در فشارهای دیگری نقاط تعادلی دیگر بدست می‌آید. برای محاسبه دما و فشار تعادلی تشکیل هیدرات در حضور متانول به آب تزریقی به راکتور مطابق با شرایط آزمایش به ترتیب ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰ و ۲۵ متانول اضافه می‌کنیم و دوباره آزمایش را تکرار می‌کنیم. این آزمایش‌ها در دو فشارهای مختلف مربوط به گاز خروجی از دی متانایزر انجام شده است.

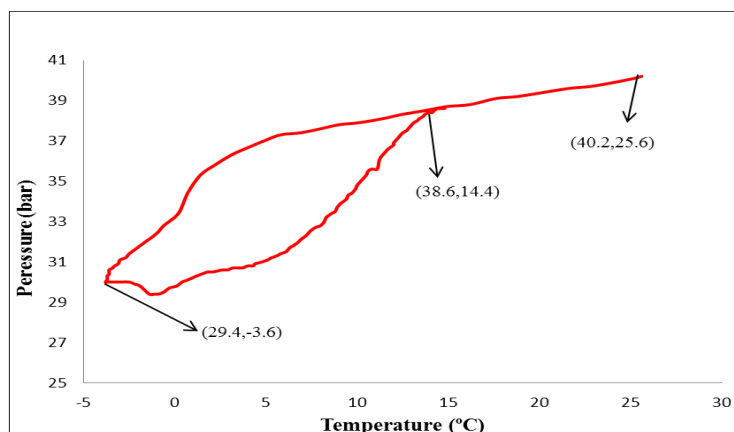
۳- نتایج و بحث

در آزمایش اول گاز با فشار وارد سیلندر مربوط به تشکیل هیدرات شد، این آزمایش بدون حضور متانول حدود ۹ ساعت به طول انجامید و در حدود ۱۸۶ نقطه در این ۹ ساعت ثبت گردید. که در نهایت در فشار ۴۷/۲ بار و دمای ۱۴/۷ درجه سانتی‌گراد نقطه تعادلی ثبت گردید.



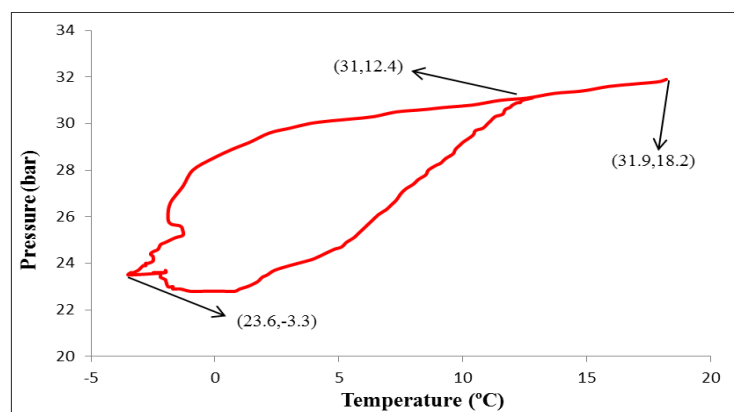
شکل (۲): آزمایش تعادلی بدون حضور متانول

در آزمایش دوم گاز با فشار ۴۰/۲ بار و در حضور ۵ درصدی متانول وارد سیلندر مربوط به تشکیل هیدرات شد، در این آزمایش حدود ۱۸۶ نقطه ثبت گردید. که در نهایت در فشار ۳۸/۶ بار و دمای ۱۴/۴ درجه سانتی گراد نقطه تعادلی ثبت گردید.



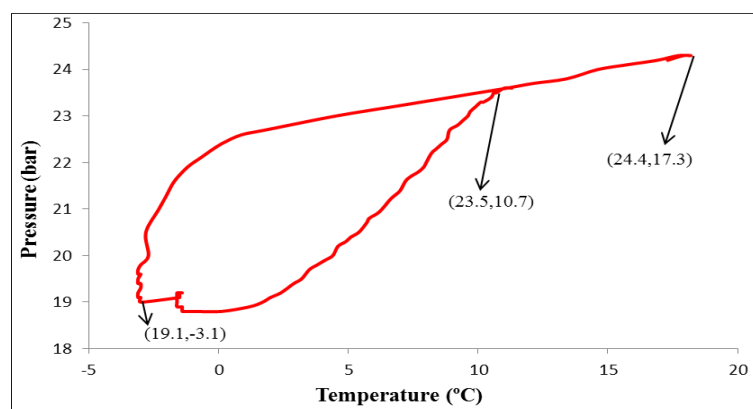
شکل (۳): آزمایش تعادلی در حضور ۵ درصدی متانول

در آزمایش سوم گاز با فشار ۳۱/۱ بار و در حضور ۱۰ درصدی متانول وارد سیلندر مربوط به تشکیل هیدرات شد، در این آزمایش حدود ۱۲۸ نقطه ثبت گردید. که در نهایت در فشار ۳۱/۱۲ بار و دمای ۱۲/۴ درجه سانتی گراد نقطه تعادلی ثبت گردید.



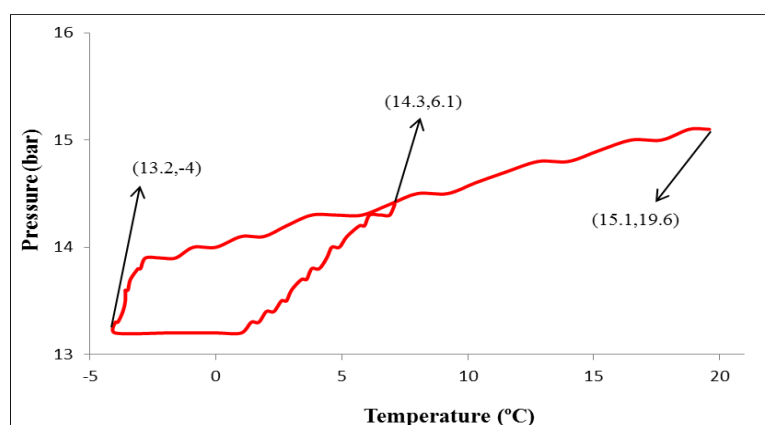
شکل (۴): آزمایش تعادلی در حضور ۱۰ درصدی متانول

در آزمایش چهارم گاز با فشار ۲۴/۴ بار در حضور ۱۵ درصدی متانول وارد سیلندر مربوط به تشکیل هیدرات شد، در این آزمایش حدود ۱۴۰ نقطه ثبت گردید. که در نهایت در فشار ۲۳/۵ بار و دمای ۱۰/۷ درجه سانتی‌گراد نقطه تعادلی ثبت گردید.



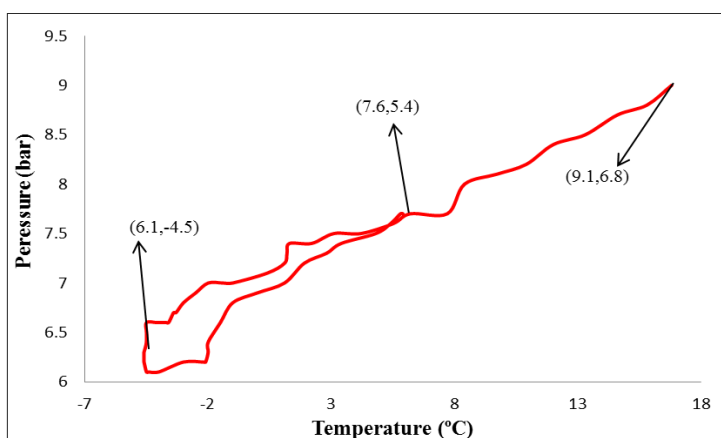
شکل (۵): آزمایش تعادلی در حضور ۱۵ درصدی متانول

در آزمایش پنجم گاز با فشار ۱۵/۱ در حضور ۲۰ درصدی متانول بار وارد سیلندر مربوط به تشکیل هیدرات شد، در این آزمایش حدود ۷۷ نقطه ثبت گردید. که در نهایت در فشار ۱۴/۳ بار و دمای ۶/۱ درجه سانتی‌گراد نقطه تعادلی ثبت گردید.



شکل (۶): آزمایش تعادلی در حضور ۲۰ درصدی متانول

در آزمایش ششم گاز با فشار ۹/۱ در حضور ۲۵ درصدی متانول بار وارد سیلندر مربوط به تشکیل هیدرات شد، در این آزمایش حدود ۵۸ نقطه ثبت گردید. که در نهایت در فشار ۷/۶ بار و دمای ۵/۴ درجه سانتی‌گراد نقطه تعادلی ثبت گردید.

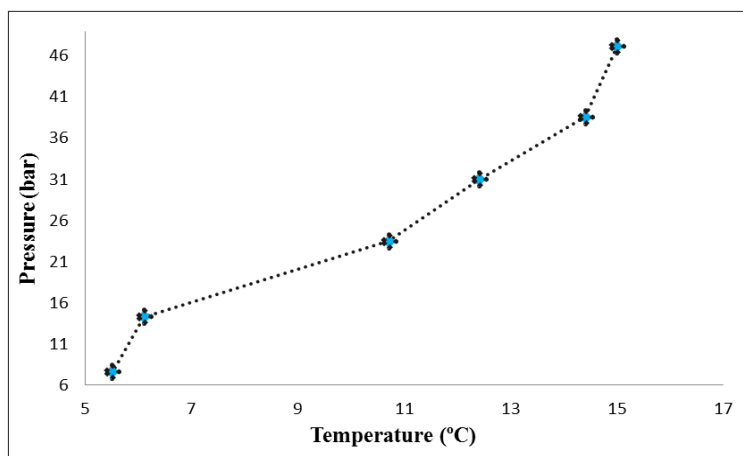


شکل (۷): آزمایش تعادلی در حضور ۲۵ درصدی متانول

نقاط دما- فشار تعادلی هیدرات گاز پالایشگاه ششم ورودی کلد باکس در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): نقاط دما- فشار تعادلی هیدرات گاز پالایشگاه ششم ورودی کلد باکس

شماره آزمایش	درصد متانول	شروع آزمایش		نقطه تعادلی تشکیل هیدرات	
		T(°C)	P(bar)	T(°C)	P(bar)
۱	بدون حضور متانول	۲۸/۵	۵۰/۱	۱۵	۴۷/۲
۲	٪۵	۲۵/۶	۴۰/۲	۱۴/۴	۳۸/۶
۳	٪۱۰	۱۸/۲	۳۱/۹	۱۲/۴	۳۱
۴	٪۱۵	۱۷/۳	۲۴/۴	۱۰/۷	۲۳/۵
۵	٪۲۰	۱۹/۶	۱۵/۱	۶/۱	۱۴/۳
۶	٪۲۵	۶/۸	۹/۱	۵/۴	۷/۶



شکل (۸): نمودار تعادلی دما - فشار گاز پالایشگاه ششم ورودی کلد باکس

نمودار فوق مربوط به نمودار کلی برای دما و فشارهای تشکیل هیدرات برای مجتمع گاز می باشد که در این شکل می توان دما و فشار های مختلف را با هم مقایسه نمود.

در این قسمت جهت محاسبه حجم گاز ذخیره شده در هیدرات با توجه به اینکه حجم کل راکتور ۶۰۰ CC می‌باشد و و ابتدا ۱۵۰ CC آب دیونیزه به مخزن اضافه شده و حجم اشغال شده توسط گاز ۴۵۰ CC می‌باشد. برای محاسبه حجم گاز ذخیره شده در هیدرات تعداد مول (n) گاز را در شرایط واقعی شروع آزمایش و پایان تشکیل هیدرات (شروع تجزیه) با استفاده از معادله پنگ رابینسون^۱ و نرم افزار Hysys ابتدا ضریب تراکم پذیری (Z) را در فشار و دما آزمایش و آنالیز گاز محاسبه کرده و سپس با استفاده از معادله $PV=ZNRT$ در شرایط واقعی مقدار n را در دو ثابت محاسبه کرده [۶] سپس Δn را به دست آورده می‌شود، جدول (۳).

جدول (۳): محاسبات گاز ذخیره شده در شبکه هیدرات

آزمایش	نقطه شروع آزمایش				نقطه پایان تشکیل هیدرات				شرایط استاندارد (۱ atm و ۲۹۸/۱۵ K)		
	T (°K)	P (Kpa)	Z	N (Kmol)	T (°K)	P (Kpa)	Z	n (Kmol)	Δn (K mol)	Z	حجم گاز ذخیره
۱	۳۰۱/۶۵	۵۰۱۰	۰/۰۸۷۵	۰/۰۱۰۱۶	۲۶۹/۴۵	۳۵۷۹/۹۹	۰/۰۸۷۶	۰/۰۸۱۰	۰/۰۱۰۲	۰/۰۸۷۶	۱۴۸/۶۷۱
۲	۲۹۸/۷۵	۴۰۲۰	۰/۰۹۱۲۸	۰/۰۰۷۹۸	۲۶۹/۵۵	۳۰۰۰	۰/۰۹۰۵۵	۰/۰۰۶۶۵	۰/۰۱۳۳	۰/۰۸۷۶	۱۳۷/۳۳۳
۳	۲۹۱/۳۵	۳۱۹۰	۰/۰۹۳۳۲	۰/۰۰۶۴۲	۲۶۹/۷۵	۲۴۶۰	۰/۰۹۲۵۴	۰/۰۰۵۱۲	۰/۰۱۰۳	۰/۰۸۷۶	۱۳۳/۳۳۳
۴	۲۹۰/۴۵	۲۴۴۰	۰/۰۹۳۹۸	۰/۰۰۴۸۴	۲۷۰/۰۵	۱۹۱۰	۰/۰۹۳۹۵	۰/۰۰۴۰۷	۰/۰۰۰۸	۰/۰۸۷۶	۸۰
۵	۲۹۲/۷۵	۱۵۱۰	۰/۰۹۵۳۷	۰/۰۰۳۳۵	۲۶۹/۷۵	۶۴۰	۰/۰۹۸۹۲	۰/۰۰۲۴۵	۰/۰۰۰۷	۰/۰۸۷۶	۷۹/۳۲
۶	۲۷۹/۹۵	۹۱۰	۰/۰۹۷۴۱	۰/۰۰۱۸۱	۲۶۸/۶۵	۶۱۰	۰/۰۹۸۰۲	۰/۰۰۱۲۵	۰/۰۰۰۶	۰/۰۸۷۶	۷۸/۶۶۷

با ترکیب درصد زیر که در ابتدای فصل نیز به آن اشاره شد با توجه به محدوده فشار کاری این پایان نامه از روش کتز در فشار ۳۱ بار (آزمایش شماره ۳) تخمین دمای تشکیل هیدرات بیان شده است، جدول (۴). ابتدا دمای تشکیل هیدرات را ۲۸۰ درجه کلوین فرض می‌کنیم و در این دما پارامتر y_i/K_{vs} را محاسبه می‌کنیم [۷] که که مجموع این پارامتر برابر یک نشد و حدس دما را ادامه می‌دهیم تا اینکه در دمای ۲۷۵ کلوین مجموع پارامتر فوق نزدیکتر به عدد یک می‌باشد و این دما، دمای تشکیل هیدرات با استفاده از روش کتز می‌باشد، که اختلاف زیادی با دمای تشکیل هیدرات در حالت واقعی و شرایط آزمایشگاه دارد.

^۱ - Peng-Robinson

جدول (۴): محاسبه دمای تشکیل هیدرات با استفاده از روش کتز

ردیف	component	y_i	مقدار K_{vsi} برای فرض ۱ 280 K	Y_i/K_{vsi}	مقدار K_{vsi} برای فرض ۲ 283K	Y_i/K_{vsi}	مقدار K_{vsi} برای فرض ۳ 275K	Y_i/K_{vsi}
1	N ₂	3.736177	∞	∞	∞	∞	∞	∞
2	Co ₂	0.688712	∞	∞	∞	∞	∞	∞
3	Methane	90.942186	1.7	0.535	1.6	0.57	1.2	0.75
4	Ethane	4.297314	0.21	0.2	0.47	0.091	∞	∞
5	Propane	0.324344	0.031	0.1	0.061	0.052	0.015	0.21
6	i-butane	0.007253	0.011	0.007	0.024	0.003	0.0041	0.01
7	n-butane	0.004014	∞	∞	∞	∞	0.018	0.002
کل	-	-	-	0.842	-	0.716	-	0.972

دلیل اصلی تفاوت میان دماهای بدست آمده روش کتز و حالت آزمایشگاه این است که در روش کتز از اثر نیتروژن، دی اکسید کربن و اتان صرف نظر شده است در صورتی که این مواد هم در تشکیل هیدرات نقش دارند.

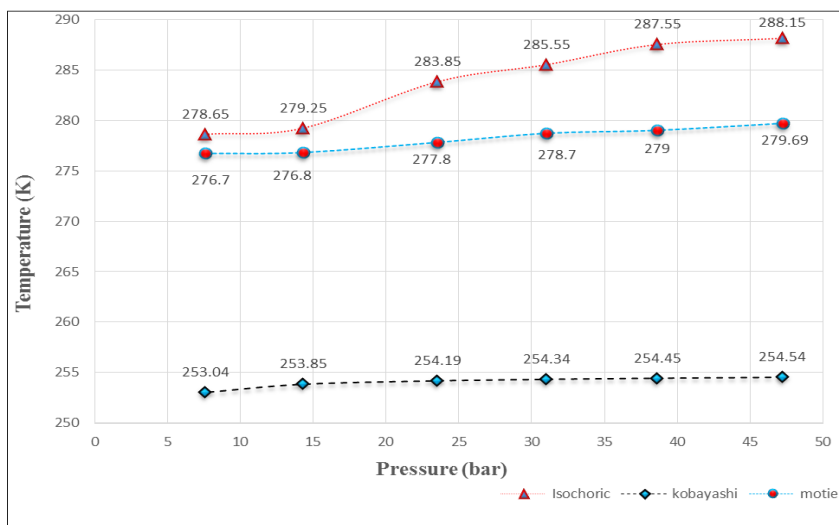
جدول (۵): داده های مربوط به مقایسه روش کتز و حجم ثابت برای آزمایش ۳

شماره آزمایش	P(Bar)	Isochoric	Katz
		T(K)	T(K)
۳	۳۱	۲۸۵/۵۵	۲۷۵

در جدول (۶) مقایسه مربوط به نتایج روش های محاسباتی و آزمایشگاه آمده است و همانطور که مشخص است، تفاوت زیادی بین اعداد بدست آمده وجود دارد که این به دلیل ملاحظات است که در روش های محاسباتی وجود دارد.

جدول (۶): مقایسه روش های محاسباتی و حجم ثابت

مقایسه روش های محاسباتی و روش آزمایشگاهی				
شماره آزمایش	P(bar)	حجم ثابت	کوبایوشی	مطیعی
		T(K)	T(K)	T(K)
۱	۴۷/۲	۲۸۸/۱۵	۲۵۴/۵۴	۲۷۹/۶۹
۲	۳۸/۶	۲۸۷/۵۵	۲۵۴/۴۵	۲۷۹
۳	۳۱	۲۸۵/۵۵	۲۵۴/۳۴	۲۷۸/۷
۴	۲۳/۵	۲۸۳/۸۵	۲۵۴/۱۹	۲۷۷/۸
۵	۱۴/۳	۲۷۹/۲۵	۲۵۳/۸۵	۲۷۶/۸
۶	۷/۶	۲۷۸/۶۵	۲۵۳/۰۴	۲۷۶/۷



شکل (۹): داده های روش های محاسباتی و حجم ثابت

همانطور که در نمودار فوق مشاهده می‌کنید برای نمونه گاز مورد بررسی در این تحقیق روش محاسباتی مطیعی از دقت بالاتری برخوردار است [۸].

نتیجه‌گیری

از یک طرف به دلیل وجود منابع عظیم گاز طبیعی در کشور و مشکلات و هزینه های بالای انتقال گاز، نیاز به یافتن روشی مناسب جهت انتقال آن به شدت احساس می‌شود. در سال های اخیر به خاطر ظرفیت بالای هیدرات ها در جذب گاز و پایداری آن ها در دماهای زیر صفر درجه سانتی گراد انتقال گاز از طریق هیدرات به جای انتقال آن ها به صورت گاز مایع یا فشرده شده مورد مطالعه قرار گرفته است. در مقوله انتقال گاز طبیعی به کمک هیدرات بحث تشکیل و تجزیه هیدرات و شرایط آن ها مورد بررسی قرار می‌گیرد، تا بتوان گازهایی که به صورت هیدرات در مخازن ذخیره جمع آوری شده اند را در بازار مصرف مورد بهره‌برداری قرار داد. از طرف دیگر رفع پدیده هیدرات در گاز بالاخص در مجتمع‌های پالایشگاهی (گازوگاز مایع) نیاز به داشتن اطلاعات دقیق از شرایط ترمودینامیکی گاز و اثر مواد باز دارنده بر تشکیل هیدرات بوده است. در پژوهش حاضر استفاده از بازدارنده‌های ترمودینامیکی برای جلوگیری از تشکیل پدیده هیدرات گازی در پالایشگاه ششم پارس جنوبی بطور آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

- داده های تعادلی برای نمونه گاز پالایشگاه پارس جنوبی بدست آمد.
- نقاط تعادلی بدست آمده همخوانی مناسبی با داده های واقعی مجتمع دارند.
- روش کتر برای پیش بینی نقاط تعادلی در برابر نتایج آزمایشگاهی دارای خطا می باشد.
- روش مطیعی از همخوانی بالاتری نسبت به روش کوبایوشی دارا بود.
- موقع گرم کردن دما را آرام بالا برد در غیر اینصورت خطای زیادی مشاهده می شود.
- ظرفیت ذخیره سازی گاز پالایشگاه پارس جنوبی با بالا رفتن فشار افزایش می یابد.

منابع

- [۲] سلامت، یوسف؛ عبدالرضا مقدسی؛ حسین قدسی و محمد ایل بیگی. (۱۳۹۰). بررسی آزمایشگاهی اثر افزودن بازدارنده های سینتیکی بر زمان تاخیر تشکیل هیدرات گازی سولفید هیدروژن، اولین همایش ملی هیدرات گازی ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، انجمن مهندسی شیمی ایران، صفحه ۷-۱.
- [۳] طباطبایی نژاد، سیدعلیرضا و الناز خداپناه. (۱۳۹۰). بررسی اثر تشکیل رسوب واکس بر روی هیدرات، اولین همایش ملی هیدرات گازی ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، انجمن مهندسی شیمی ایران، صفحه ۹-۱.
- [۴] بردول، رقیه؛ جعفر جوانمردی و علی اکبر روستا. (۱۳۹۴). پیشبینی دمای تشکیل هیدرات متان در حضور بهبود دهنده ۱ و ۳- دیاکسولان با استفاده از الگوریتم GP و PSO، چهارمین همایش علمی مهندسی فرآیند، تهران، شرکت هم اندیشان انرژی کیمیا، ۸-۲.
- [1] E.D. Sloan. (1998). *Clathrate Hydrates of Natural Gases*, Second ed, Mrcel, New York, P. 33.
- [5] E. Dendy Sloan. (2009). *Molecular Hydrogen Storage in Novel Binary Clathrate Hydrates*. Colorado School of Mines, P. 44.
- [6] Ripmeester JA, Ratcliffe CI. (1999). *129Xe NMR studies of clathrate hydrate: new guest for structure II and structure H*, J Phys Chem;94: P.6
- [7] D.L. Katz. (1945). *Prediction of condition for hydrate formation in natural gases*. Trans. AIME, P. 160.
- [8] R. Kobayashi, K.V. Song and E.D. Sloan. (1987). *Phase Behavior of Water/Hydrocarbon Systems. quoted in Bradley, H.B., Petroleum Engineers Handbook, and Richardson: Society of Petroleum Engineers, P. 55.*

مطالعه آزمایشگاهی بررسی بهبود بازیافت نفت با استفاده از سورفکتانت کاتیونی و پلیمر با فرآیند سیلاب زنی^۱

ربابه پرواز، اسدالله ملک زاده^۲

گروه مهندسی نفت، واحد گچساران، دانشگاه آزاد اسلامی، گچساران، ایران.

چکیده

در این پژوهش بررسی بهبود بازیافت نفت با استفاده از سورفکتانت کاتیونی و پلیمر با فرآیند سیلاب زنی بطور آزمایشگاهی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. لذا در این کار از سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید (CTAB) و پلیمر زانتان گام در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ ppm استفاده شده است. همچنین ضریب تخلخل در کل آزمایش‌ها ۳۰٪ در نظر گرفته شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که تزریق سورفکتانت کاتیونی و پلیمر زانتان گام کشش سطحی بین نفت و سنگ بستر را کاهش داده و باعث جدا شدن نفت از سنگ مخزن شد که برداشت نفت از مخزن را بهبود بخشیده است. بیشترین درصد بازیافت نفت برای حالت تزریق سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید با غلظت ۱۵۰ ppm با مقدار ۶۰/۸۸٪ بدست آمد.

کلمات کلیدی: سورفکتانت، پلیمر، بازیافت نفت، سیلاب‌زنی، مخازن نفتی.

۱- مقدمه

عمر بیشتر مخازن نفتی دنیا به نیمه دوم خود رسیده است، به همین دلیل میزان برداشت نفت از آن‌ها به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته، به همین دلیل شرکت‌های نفتی از روش‌های ازدیادبرداشت با استفاده از فناوری‌های نوین برای بهره‌وری بیشتر در برداشت از ذخایر نفتی استفاده می‌کنند. روش برداشت ثانویه از برداشت مقداری بیشتر از نفت از مخزن با روش‌های مرسوم تزریق آب یا گاز امتزاج ناپذیر به درون مخزن حکایت می‌کند. معمولاً فرایند برداشت ثانویه انتخابی در ادامه برداشت اولیه اجرا می‌شود، ولی این روش را می‌توان هم زمان با روش برداشت اولیه نیز اعمال کرد. شاید بتوان سیلاب زنی را معمول‌ترین روش برداشت ثانویه نفت نامید. توجه داشته باشید که قبل از اجرای یک پروژه برداشت ثانویه باید به وضوح اثبات شود که فرایندهای برداشت طبیعی در آن مخزن برای برداشت نفت ناکافی اند و گر نه این خطر هست که هزینه نسبتاً زیاد پروژه برداشت ثانویه به هدر رود. با توجه به اینکه منابع نفتی که به راحتی قابل دسترسی هستند رو به کاهش بوده، از طرفی تقاضا برای نفت در حال افزایش است. لذا روش‌های پیچیده‌تری برای بهبود تکنیک‌های تعیین مشخصات مخزن و فرآیندهایی که منجر به ازدیاد برداشت می‌شوند مورد نیاز است، با توجه به اینکه افزایش تنها مقدار کمی در ضریب ازدیاد برداشت منجر به میلیاردها دلار سود اضافی خواهد شد. انگیزه بسیار بالایی برای توسعه تکنیک‌ها و روش‌های نوین مکان‌یابی و تعیین مشخصات دقیق نفت باقیمانده در این مخازن به وجود آمده است [۱]. در سیلاب‌زنی معمول، آب، به عنوان سیال پیشران از میان کانال‌های به وجود آمده در اثر نسبت تحرک‌پذیری نامطلوب به سمت چاه تولیدی حرکت کرده و از کنار مقدار زیادی از نفت مخزن عبور

^۱- این مقاله مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد می باشد.

^۲- نویسنده مسئول: asad.malekzadeh@gmail.com

کرده و آن‌ها را پوشش نمی‌دهد، در نتیجه برداشت نفت کاهش می‌یابد. سیلاب‌زنی مواد فعال سطحی یا دیگر مواد شیمیایی به علت هزینه بالای مواد تزریقی، پتانسیل خوردگی آن‌ها، تلفات مواد تزریقی در طی حرکت درون مخزن محدود شده‌اند، هنگامی که این مواد تزریقی در گلوگاه‌های حفره‌ها گیر بیفتند، کنترل تحرک پذیری از دست خارج می‌شود، نفوذپذیری مطلق کاهش یافته و برداشت نفت کم می‌شود و تلفات مربوط به مواد افزایش می‌یابد [۲].

در سال ۱۳۸۹، عالم‌زاده و وثوقی، بکارگیری نانوذرات سیلیس (SiO_2) در مرحله سیلاب‌زنی آبی و نحوه تأثیر آن روی تغییرات ترشوندگی مخازن و میزان برداشت نفت را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش از نانوذرات سیلیکا با ابعاد ۱۴ نانومتر استفاده شد. با استفاده از این نانوذره می‌توان ترشوندگی سطوح سنگ‌های کربناته در مخازن را تغییر داده و از حالت نفت‌دوست یا مختلط به آب‌دوست تبدیل کرد. بدین منظور تغییرات آب‌دوستی با استفاده از روش زاویه تماس روی مغزه‌های شنی و کربناته ارزیابی شده است. همچنین این کار روی مغزه‌های اشباع شده با آب‌نمک و نفت که آب‌نمک و نانوذره با دو غلظت مختلف به آن‌ها تزریق شده است نیز صورت گرفته است. با مقایسه نتایج زاویه تماس مشاهده شد که با افزایش غلظت، زاویه تماس کوچک شده که این امر به معنای افزایش آب‌دوستی و به موجب آن افزایش خاصیت ترشوندگی مغزه می‌باشد. در مرحله بعد تأثیر افزایش غلظت نانوذره سیلیس مورد آزمایش قرار گرفت که در این مرحله با استفاده از داده‌های بدست آمده میزان برداشت نفت در حالت بدون استفاده از نانوذره و در حالت استفاده از نانوذره با درصد وزنی‌های ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۵ مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه نتایج بدست آمده مشخص شد که وجود نانوذره میزان بازیافت نفت را افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش درصد وزنی نانوذره تا ۰/۱ درصد میزان بازیافت نفت بیشتر خواهد شد ولی در حالت تزریق نانوذره با درصد وزنی ۰/۵ تأثیر چندانی در میزان برداشت نفت مشاهده نخواهد شد [۳].

در سال ۲۰۰۵ الو- سلی یک مطالعه آزمایشگاهی از سیلاب‌زنی همزمان الکل، کاهش دهنده کشش سطحی و پلیمر را انجام داد و توانست ۲۰٪ نفت باقی مانده را استخراج کند. با این کار، پس از تزریق آب در حالت ثانویه بازیافت نفت به مقدار ۴۵٪ و تزریق مواد کاهش دهنده کشش سطحی به همراه پلیمر در مرحله ثالثیه بازیابی نهایی نفت به مقدار ۶۵٪ افزایش یافت [۴].

در سال ۲۰۰۶، حمودا و گوماری آزمایش‌هایی بر روی مغزه‌های دولومیتی نفت‌دوست انجام دادند و برای این کار محلول‌هایی حاوی سورفکتانت را بکار گرفتند. آن‌ها با اندازه‌گیری شاخص ترشوندگی توانایی این مواد را در بهبود ترشوندگی سنگ به سمت نفت دوست کمتر مورد بررسی قرار دادند [۵].

در سال ۲۰۰۷، اسکروچی و همکاران نانوذرات تک جداره کربن، نانولوله‌های کربنی چند جداره و سیلیکا در فرآیند ازدیاد برداشت نفت استفاده کردند. استفاده از مواد فوق به واسطه این که از قوی‌ترین مواد فعال کننده سطحی هستند، می‌تواند در این زمینه بسیار مفید واقع شود. این مواد با نفت واکنش داده و خواص آن را تعدیل کرده و باعث حرکت بهتر نفت در مخزن می‌شوند. در این زمینه لوئیس ویلامیزار و همکارانش اثر pH و افزودن نمک و سورفکتانت بر نانوذرات مذکور را نیز مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصله نشان داد که pH و نمک اثر قابل توجهی بر عملکرد فرآیند ندارند در صورتی که افزودن سورفکتانت به دلیل کاهش کشش سطحی نفت و آب، نفت و سنگ می‌تواند میزان برداشت نفت را به مقدار قابل توجهی افزایش دهد [۶].

در سال ۲۰۰۹، استفان ایگلر و همکاران اثر بخشی چهار نوع سورفکتانت را در بهبود بازیافت نفت بررسی کردند و این آزمایش‌ها با استفاده از جریان سیالات درون مغزه ماسه سنگی انجام گرفت. آن‌ها در محیط‌های متخلخل اشباع از نفت، مقدار نفت باقی‌مانده از فرآیند سیلاب‌زنی را به وسیله تزریق پلیمر و تزریق سورفکتانت اندازه‌گیری کرده و افزایش بازیافت نفت را در مقابل زمان محاسبه نمودند. پس از تلاش‌ها و تحقیقات گسترده‌ای که با استفاده از تست‌های مختلف از جمله اندازه‌گیری تنش بین‌سطحی IFT و رفتار جذب در خاک رس انجام شد نشان داد که اثر بخشی غلظت کم ۱- نفتانول و ۱- بوتانول حل شده در آلکیل پلی گلیسوساید منجر به افزایش قابل توجه بازیافت نفت به میزان ۴۰٪ و کاهش چشم‌گیر IFT شد [۷].

در سال ۲۰۱۰، تورمود اسکوج و همکاران در طی یک بررسی مفصل، مقایسه‌ای بین حرکت نفت در مخزن توسط نانوذرات سیلیکا و نانوذرات CDG^۱ داشتند. نتایج حاصل از تحقیقات ایشان نشان داد که در صورت استفاده از نانوذرات سیلیکا در غلظت‌های پایین، افزایش قابل توجهی در میزان برداشت نفت نخواهد داشت ولی در صورتی که از نانوذره مذکور در غلظت ۶۰۰ ppm استفاده شود، میزان برداشت نفت به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. استفاده از نانوذره CDG در هر غلظتی به مقدار قابل توجهی باعث ازدیاد برداشت نفت خواهد شد [۸].

کریمی و همکاران در سال ۲۰۱۲ اثر نانوسیال زیرکونیم اکسید^۲ (ZrO₂) بر روی ترشوندگی مخازن کربناته شکافدار به عنوان یکی از عوامل اصلی در ازدیاد برداشت نفت مورد مطالعه قرار دادند. بر این اساس چندین نانوسیال متشکل از نانوذرات ZrO₂ و مخلوط سورفکتانت‌های غیریونی ساخته شد. اثر نانوسیال بر ترشوندگی سنگ کربناته به کمک تست اندازه‌گیری زاویه تماس و تست آشام خود به خودی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که نانوسیال تهیه شده می‌تواند به طور قابل توجهی باعث تغییر ترشوندگی سنگ از وضعیت به شدت نفت‌دوست به وضعیت به شدت آب‌دوست شود. به منظور مشخصه‌یابی سنگ‌ها از تحلیل میکروسکوپ روبش الکترونی (SEM)^۳ استفاده شد. نتایج نشان دهنده تاثیر این نانوسیال‌ها و جذب نانوذرات بر روی سطح سنگ بود. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که تغییر ترشوندگی توسط جذب و رشد نانوذرات ZrO₂ بر روی سطح سنگ یک فرآیند بسیار آهسته می‌باشد که نیاز به یک دوره زمانی دو روزه دارد [۹].

مغزی و همکاران در سال ۲۰۱۴ اثر نانو ذرات سیلیکا بر روی کارایی محلول پلیمر پلی آکریل آمید و نمک در فرایند سیلاب‌زنی برای بازیافت نفت سنگین مورد آزمایش قرار دادند. سیلاب‌زنی بر روی یک میکرو مدل شیشه‌ای اشباع از نفت و با شوری^۴های مختلفی از محلول پلیمر بدست آمده، انجام شد. همچنین هر آزمایش مجدداً با همان میزان شوری ولی با حضور نانوذرات سیلیکا تکرار گردید. آزمایش‌ها نشان دادند که با افزایش میزان شوری محلول پلیمر، بازیابی نفت کاهش خواهد یافت. اما حضور نانوذرات سیلیکا در هر آزمایش می‌تواند افت بازیابی را کمتر نماید. همچنین ویسکوزیته محلول پلیمر با یک غلظت از نمک، کمتر از ویسکوزیته همین محلول پلیمر در حضور نانوذرات سیلیکا می‌باشد [۱۰].

۲- روش تحقیق

– مواد مورد استفاده در این پژوهش

(۱) نفت خام

از نفت خام میدان نفتی بی‌بی‌حکیمه برای استفاده در این آزمایش‌ها، نمونه‌گیری به عمل آمد. اطلاعات فیزیکی و شیمیایی آن از شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب بدست آمد. در جدول‌های (۱) و (۲) به ترتیب ویژگی‌های نفت مصرفی و درصد اجزاء نفت خام ذکر شده است.

جدول (۱): ویژگی‌های نفت مورد استفاده در آزمایش‌ها.

دانسیتته نفت (API)	گرانروی نفت (cp)	دمای مخزن (°F)	فشار مخزن (psi)
۲۶/۸	۲۲/۳	۲۳۵	۶۳۳۴

جدول (۲): درصد اجزاء نفت خام.

ترکیبات	C _۱	C _۲	C _۳	iC _۴	nC _۴	iC _۵	nC _۵	C _۶	C _{۷+}	H _۲ S	CO
درصد مولی	۱۸/۷	۴/۱۳	۴/۳۷	۱/۰۶	۲/۴۵	۲/۶۹۸	۳/۵۳	۵/۱۹	۴۹/۵۱	۴/۰۱۸	۴/۳۴۴

^۲- Colloidal dispersion gels

^۳- Zirconium oxide

^۴- Scanning electron microscope

۱- Salinity

۲) آب دریا

از آب خلیج فارس (بندر گناوه) به عنوان حلال سورفکتانت و پلیمر و انجام فرآیند سیلاب‌زنی استفاده شد.

۳) سورفکتانت

در این پژوهش از سورفکتانت هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید (CTAB) شرکت مرک آلمان در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ ppm استفاده شده است که برخی از ویژگی‌های آن در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳): برخی از ویژگی‌های سورفکتانت‌های بکار رفته در این پژوهش

شکل ظاهری	جامد
فرمول مولکولی	$C_{19}H_{42}BrN$
رنگ	سفید
جرم مولکولی (gr/mol)	۳۶۴/۴۶
دانسیته (gr/cc) در ۲۵ درجه سانتی گراد	1.02 ± 0.02
ماهیت یونی	سورفکتانت کاتیونی

۴) پلیمر

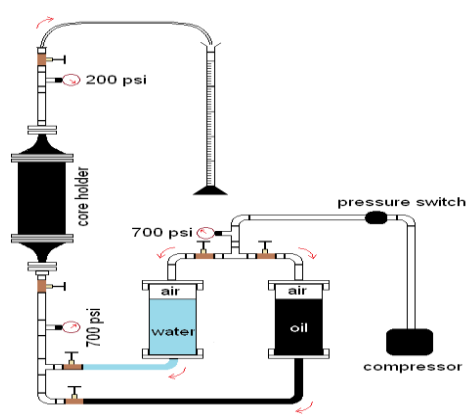
در این پژوهش از پلیمر زانتان گام خریداری شده از شرکت گام تک تبریز در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ ppm استفاده شده است که برخی از ویژگی‌های پلیمر زانتان گام در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴): ویژگی‌های پلیمر زانتان گام

فرمول ساختاری	$C_{35}H_{49}O_{29}$
شکل ظاهری	پودر
رنگ	کرم روشن
دانسیته (gr/cc) در ۲۵ درجه سانتی گراد	1.02 ± 0.02
PH در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد	۶ - ۸
ویسکوزیته در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد (cp)	۱۳ - ۳۵

- بررسی فرآیند تزریق سورفکتانت و پلیمر بر فرآیند سیلاب‌زنی

به منظور انجام آزمایش‌های مورد نظر در فرآیند برداشت نفت از مخازن، دستگاهی طراحی و ساخته شد که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): دستگاه برای فرآیند سیلاب زنی آبی

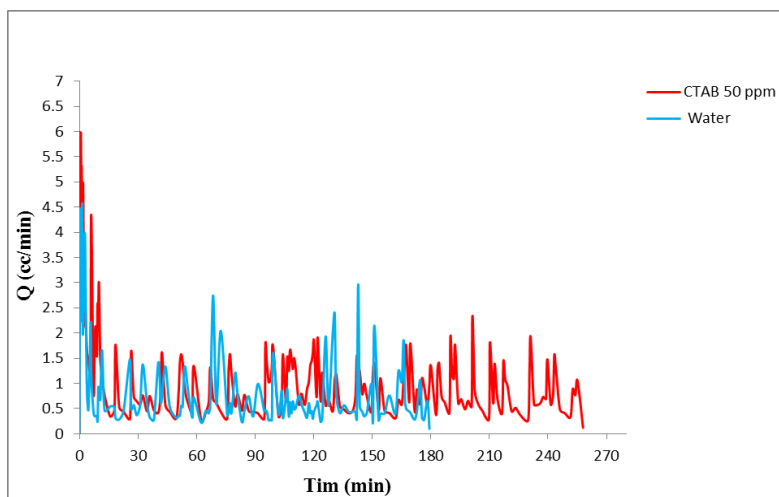
انجام آزمایش تزریق سورفکتانت و پلیمر

اولین مرحله پر کردن core-holder از ذرات سیلیس است که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و اگر با دقت لازم انجام نشود تخلخل مورد نظر بدست نخواهد آمد. پس از این مرحله core-holder با نفت اشباع شده و پس از آن، core-holder آماده تزریق سورفکتانت شده که برای این منظور سورفکتانت کاتیونی و پلیمر به آب اضافه شده و مخزن آب که مخلوطی از آب و سورفکتانت است با این مواد پر شده و به core-holder اشباع از نفت تزریق می‌شود. کلیه آزمایش‌های تزریق در فشار ۱۵bar انجام خواهد شد. با روشن شدن کمپرسور فشار مخزن آب به ۱۵ بار رسیده و عملیات تزریق سورفکتانت انجام خواهد شد. با وارد شدن فشار به مخزن آب، مخلوط آب و سورفکتانت از پایین مخزن حرکت کرده و با عبور از مسیر بین core-holder و مخزن آب، از پایین وارد core-holder شده و با عبور از فضای بین ذرات سیلیس، نفت موجود در فضای بین ذرات را شسته و همراه خود به سمت بالا جابجا می‌کند. به مرور زمان نفت به بالای مخزن رسیده و کم کم از بالای core-holder خارج می‌گردد. نفتی که از بالای مخزن خارج می‌شود با استفاده از بورت اندازه گیری شده و زمان متناظر با آن ثبت شد که این کار تا زمانی که از بالای core-holder آب خارج می‌شود ادامه خواهد یافت. پس از آن از قسمت‌های مختلف داخل core-holder نمونه‌ای از دانه‌های سیلیس گرفته شده و برای انجام تست ATR آماده خواهد شد تا مورد بررسی قرار گیرد.

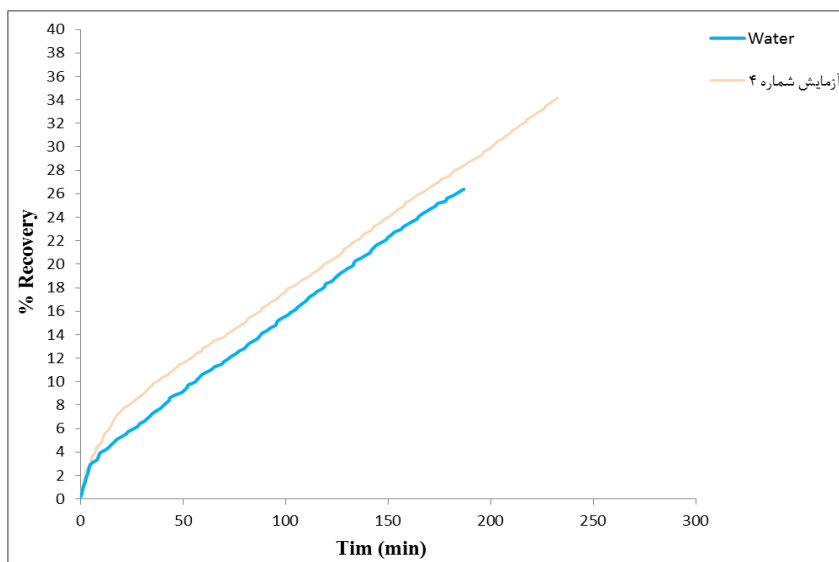
۳- نتایج و بحث

۲-۴-۲- اثر تزریق سورفکتانت کاتیونی (CTAB) بر میزان بازیافت نفت

نمودارهای (۱) و (۲) دبی و درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای تزریق آب و سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید با غلظت ۵۰ppm را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزودن سورفکتانت کاتیونی به آب دریا و تزریق به مخزن ازدیاد برداشت نفت نسبت به زمان نسبت به آب دریا و روند افزایشی دارد. لذا در این شرایط برداشت نفت برای تزریق سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید ۱۳۰ سی سی بوده و زمان پایان آزمایش و ایجاد پدیده رسوخ ۲۵۵/۶۹ دقیقه بوده می‌باشد. همچنین درصد بازیافت نفت نیز در این حالت ۳۳/۳۹ درصد بوده است. که برای تزریق آب دریا درصد بازیافت نفت ۲۳ درصد می‌باشد و همچنین تخلخل ۳۰ درصد می‌باشد.

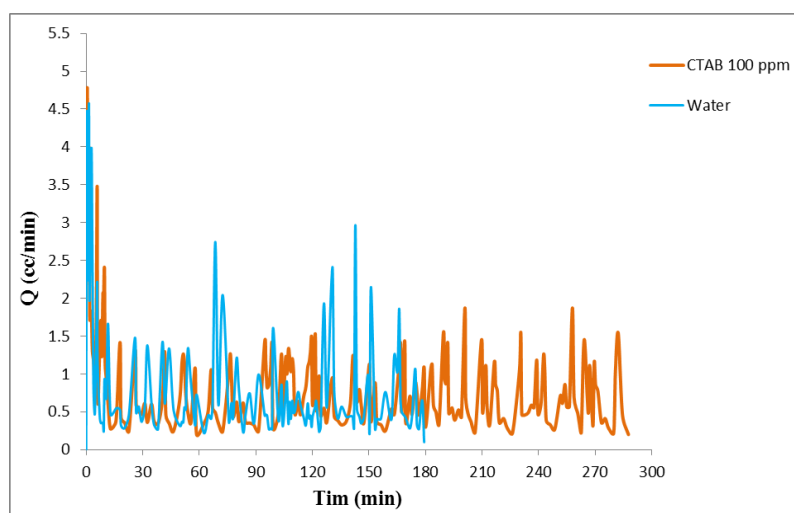


نمودار (۱): دبی بر حسب زمان برای تزریق آب و سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید با غلظت ۵۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪

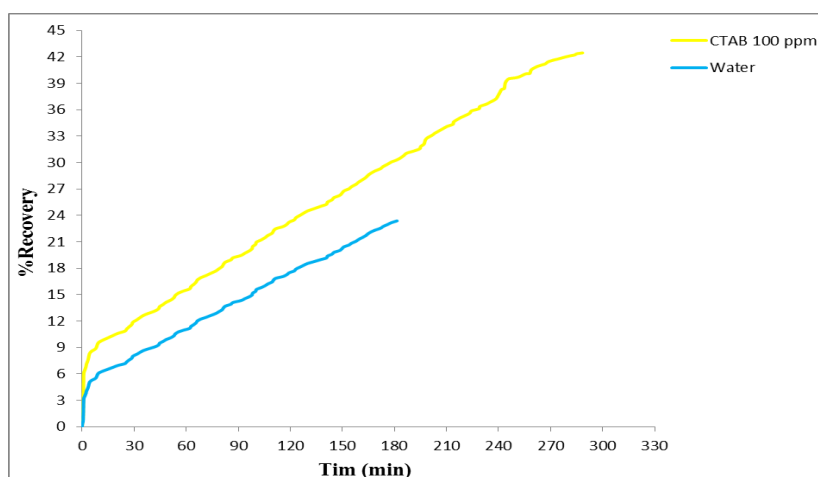


نمودار (۲): درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای تزریق آب و سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید با غلظت ۵۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪

نمودار (۳) و (۴) دبی و درصد بازیافت نفت بر حسب زمان و بازیافت نفت برای حالت تزریق آب و تزریق سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید با غلظت ۱۰۰ ppm را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت سورفکتانت میزان برداشت و پدیده رسوخ نسبت به آزمایش شماره قبل بیشتر شده است که می‌توان این پدیده را مربوط به کاهش کشش سطحی بین نفت و سنگ مخزن در اثر اعمال تزریق سورفکتانت کاتیونی همراه با آب دریا دانست. میزان برداشت نفت در این حالت ۱۶۵ سی‌سی و زمان پایان آزمایش و ایجاد پدیده رسوخ ۲۸۸/۳۸ دقیقه بوده است. درصد بازیافت نفت نیز در این شرایط ۴۲/۴۵ درصد بوده است. درصد بازیافت نفت برای تزریق آب دریا همانند سایر آزمایش‌های انجام شده ۲۳ درصد و تخلخل نیز ۳۰ درصد می‌باشد.

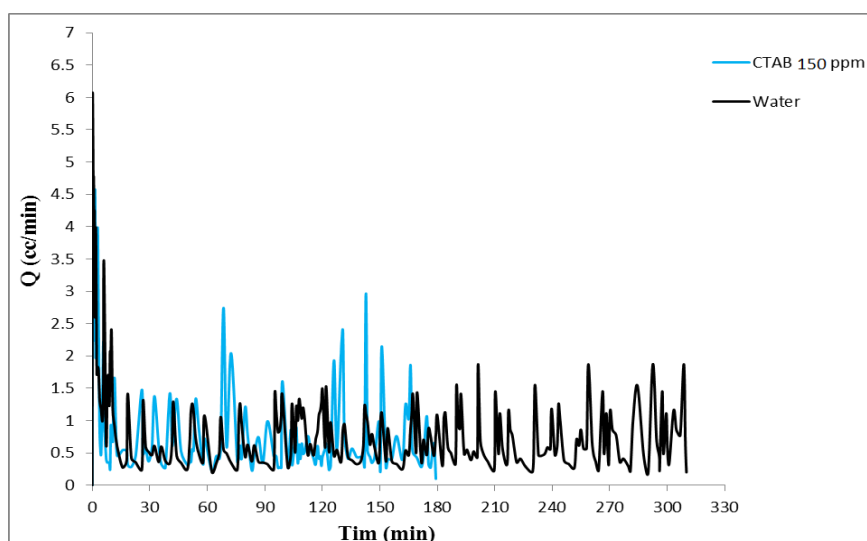


نمودار (۳): دبی بر حسب زمان برای تزریق آب و سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید با غلظت ۱۰۰ و درصد تخلخل ۳۰٪

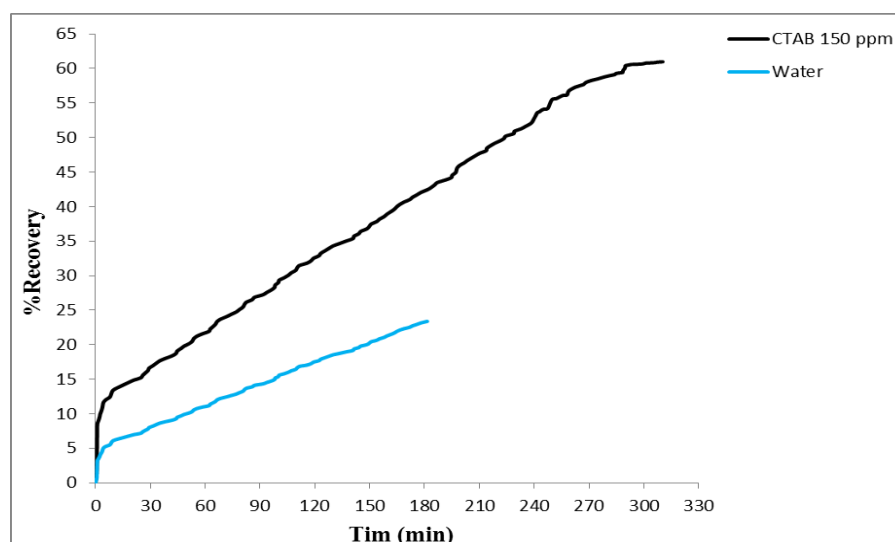


نمودار (۴): درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای تزریق آب و سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید با غلظت ۱۰۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪

نمودار (۵) و (۶) دبی و درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای حالت تزریق آب و تزریق سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید با غلظت ۱۵۰ ppm را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش غلظت سورفکتانت کاتیونی میزان برداشت نفت با گذشت زمان روند افزایشی دارد. لذا درصد بازیافت نفت در این آزمایش نسبت به آزمایش های قبلی افزایش چشم گیری دارد. میزان برداشت نفت در این حالت ۲۳۷ سی سی بوده و زمان پایان آزمایش و ایجاد پدیده رسوخ ۳۰۶/۶۱ دقیقه بوده است. درصد بازیافت نفت نیز در این شرایط ۶۰/۸۸ درصد می باشد. درصد بازیافت نفت برای تزریق آب دریا همانند سایر آزمایش های انجام شده ۲۳ درصد و تخلخل نیز ۳۰ درصد می باشد.



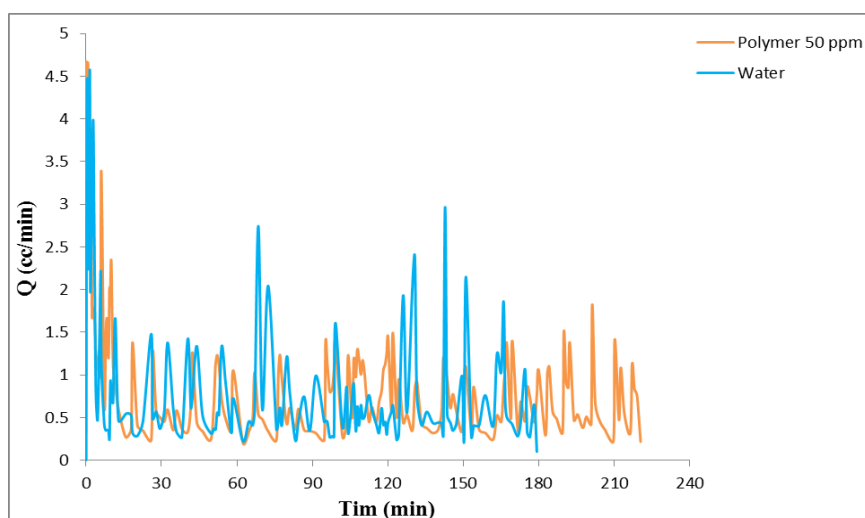
نمودار (۵): دبی بر حسب زمان برای تزریق آب و سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم بر مایند با غلظت ۱۵۰ و درصد تخلخل ۳۰٪



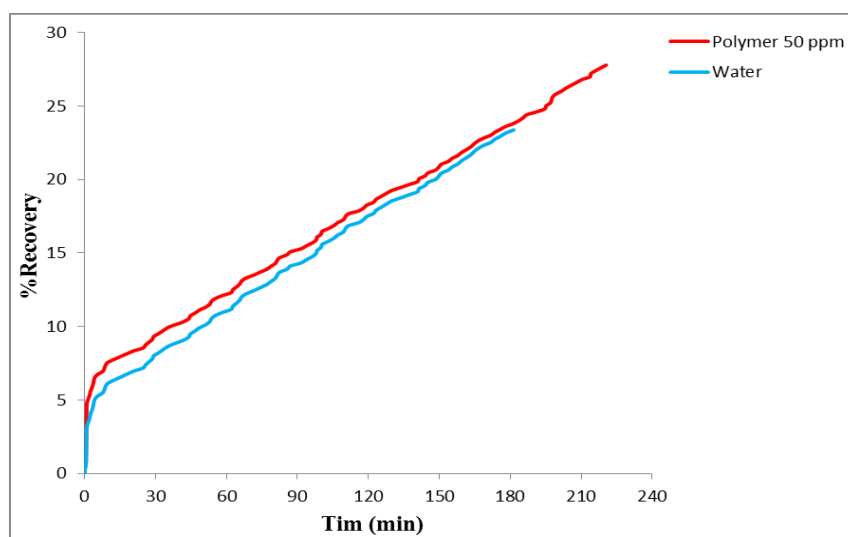
نمودار (۶): درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای تزریق آب و سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم بر مایند با غلظت ۱۵۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪

– اثر تزریق پلیمر بر میزان بازیافت نفت

نمودار (۷) و (۸) دبی و درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای حالت تزریق آب و تزریق پلیمر زانتان گام با غلظت ۵۰ ppm را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزودن پلیمر زانتان گام به آب دریا و تزریق به مخزن نفتی میزان برداشت نفت و درصد بازیافت نفت نسبت به آب دریا افزایش می‌یابد. میزان برداشت نفت در این شرایط ۱۰۷/۵ سی سی بوده و زمان پایان آزمایش و ایجاد پدیده رسوخ ۲۱۸/۱۸ دقیقه بوده است. درصد بازیافت نفت نیز در این حالت ۲۷/۵۹ درصد بوده است. درصد بازیافت نفت برای تزریق آب دریا همانند سایر آزمایش‌های انجام شده ۲۳ درصد و تخلخل نیز ۳۰ درصد می‌باشد.

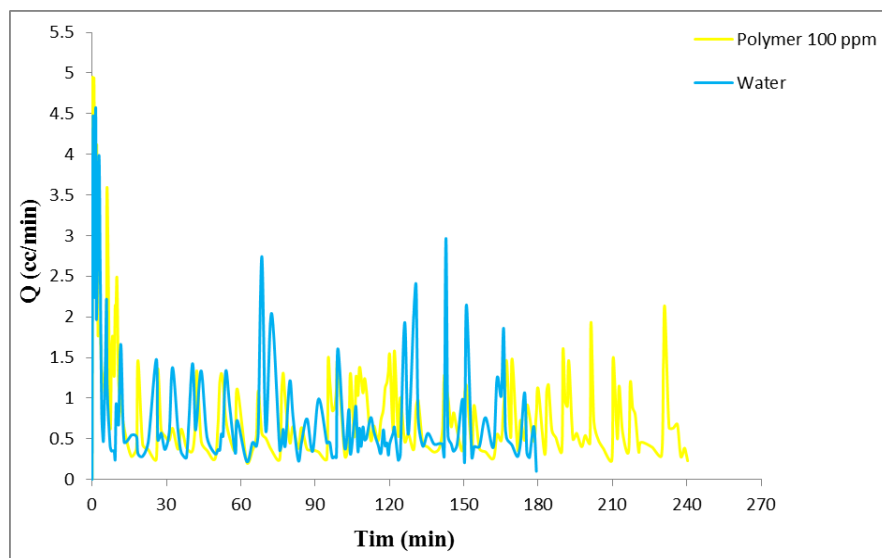


نمودار (۷): دبی بر حسب زمان برای تزریق آب و پلیمر زانتان گام با غلظت ۵۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪

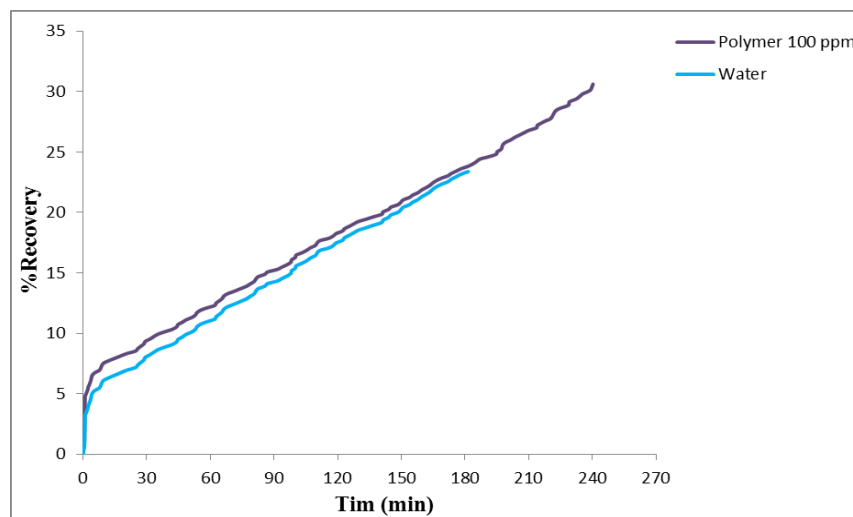


نمودار (۸): درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای تزریق آب پلیمر زانتان گام با غلظت ۵۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪

نمودار (۹) و (۱۰) دبی و درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای حالت تزریق آب و تزریق پلیمر زانتان گام با غلظت ۱۰۰ ppm را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش غلظت پلیمر زانتان گام میزان برداشت نفت نسبت به آزمایش های قبل افزایش می یابد. میزان برداشت نفت در این شرایط ۱۱۷ سی سی بوده و زمان پایان آزمایش و ایجاد پدیده رسوخ ۲۳۹/۲۳ دقیقه بوده است. درصد بازیافت نفت نیز در این شرایط ۳۰/۱۵ درصد بوده است. درصد بازیافت نفت برای تزریق آب دریا همانند سایر آزمایش های انجام شده ۲۳ درصد و تخلخل نیز ۳۰ درصد می باشد.

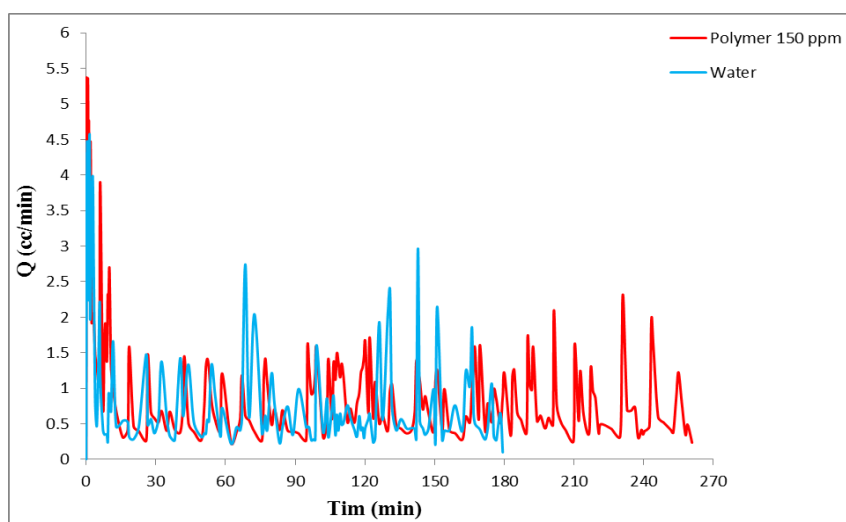


نمودار (۹): دبی بر حسب زمان برای تزریق آب و پلیمر زانتان گام با غلظت ۱۰۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪

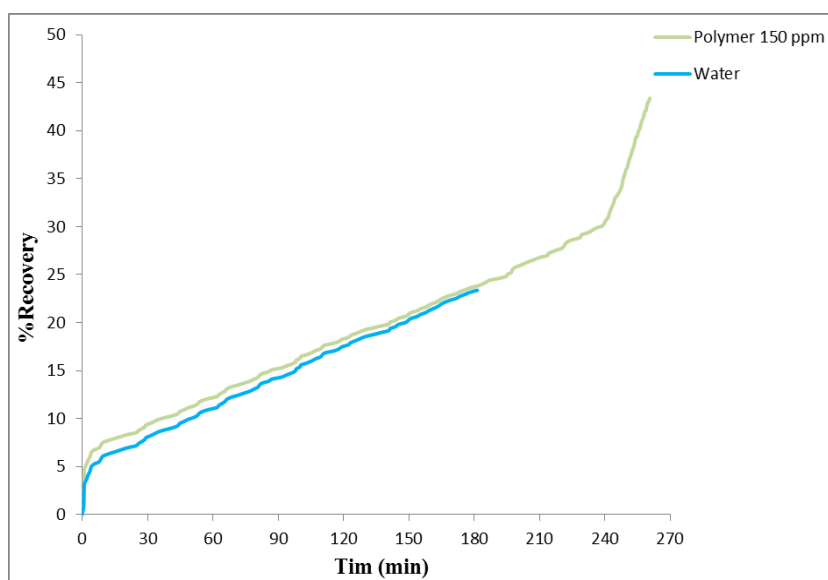


نمودار (۱۰): درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای تزریق آب پلیمر زانتان گام با غلظت ۱۰۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪

نمودار (۱۱) و (۱۲) دبی و درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای حالت تزریق آب و تزریق پلیمر زانتان گام با غلظت ۱۵۰ ppm را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت پلیمر نسبت به حالت قبل میزان برداشت نفت افزایش می‌یابد که می‌توان این افزایش را در نتیجه کاهش کشش سطحی نفت و سنگ مخزن با افزودن پلیمر به آب دریا و تزریق به مخزن نفتی دانست. میزان برداشت نفت برای این آزمایش ۱۶۶ سی سی بوده و زمان پایان آزمایش و ایجاد پدیده رسوخ ۲۵۹/۳۴ دقیقه بوده است. درصد بازیافت نفت نیز در این شرایط ۴۲/۵۷ درصد بوده است. درصد بازیافت نفت برای تزریق آب دریا همانند سایر آزمایش‌های انجام شده ۲۳ درصد و تخلخل نیز ۳۰ درصد می‌باشد.



نمودار (۱۱): دبی بر حسب زمان برای تزریق آب و پلیمر زانتان گام با غلظت ۱۰۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪



نمودار (۱۲): درصد بازیافت نفت بر حسب زمان برای تزریق آب پلیمر زانتان گام با غلظت ۱۰۰ ppm و درصد تخلخل ۳۰٪

جدول (۵) مقایسه داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده برای تزریق سورفکتانت آنیونی، کاتیونی و پلیمر را نشان می‌دهد. که با تجزیه و تحلیل نتایج و مقایسه داده‌های بدست آمده از آزمایش‌ها درصد بازیافت نفت بصورت زیر می‌باشد:

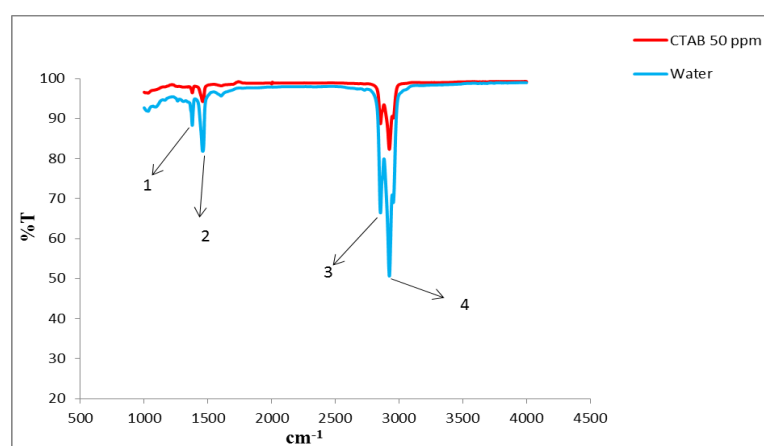
تزریق سورفکتانت کاتیونی < تزریق سورفکتانت آنیونی < تزریق پلیمر < تزریق آب دریا

جدول (۵): مقایسه داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده برای تزریق آب، سورفکتانت کاتیونی و پلیمر

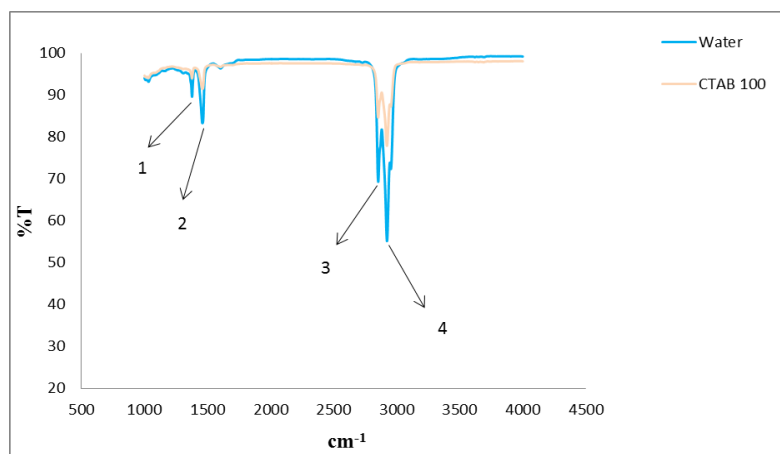
آزمایش	حجم مخزن (cm ³)	تخلخل (%)	رسوخ (دقیقه)	برداشت (سی سی)	باز یافت (درصد)
تزریق آب	۱۲۹۹/۰۵۶	٪۳۰	۱۷۸/۱۵	۹۰	۲۳
تزریق سورفکتانت کاتیونی با غلظت ۵۰ ppm	۱۲۹۹/۰۵۶	٪۳۰	۲۵۵/۶۲	۱۳۰	۳۳/۳۹
تزریق سورفکتانت کاتیونی با غلظت ۱۰۰ ppm	۱۲۹۹/۰۵۶	٪۳۰	۲۸۸/۳۸	۱۶۵	۴۲/۴۵
تزریق سورفکتانت کاتیونی با غلظت ۱۵۰ ppm	۱۲۹۹/۰۵۶	٪۳۰	۳۰۶/۶۱	۲۳۷	۶۰/۸۸
تزریق پلیمر با غلظت ۵۰ ppm	۱۲۹۹/۰۵۶	٪۳۰	۲۱۸/۱۸	۱۰۷/۵	۲۷/۵۹
تزریق پلیمر با غلظت ۱۰۰ ppm	۱۲۹۹/۰۵۶	٪۳۰	۲۳۹/۲۳	۱۱۷	۳۰/۱۵
تزریق پلیمر با غلظت ۱۵۰ ppm	۱۲۹۹/۰۵۶	٪۳۰	۲۵۹/۳۴	۱۶۶	۴۲/۵۷

– بررسی طیف‌های بدست آمده از آنالیز ATR

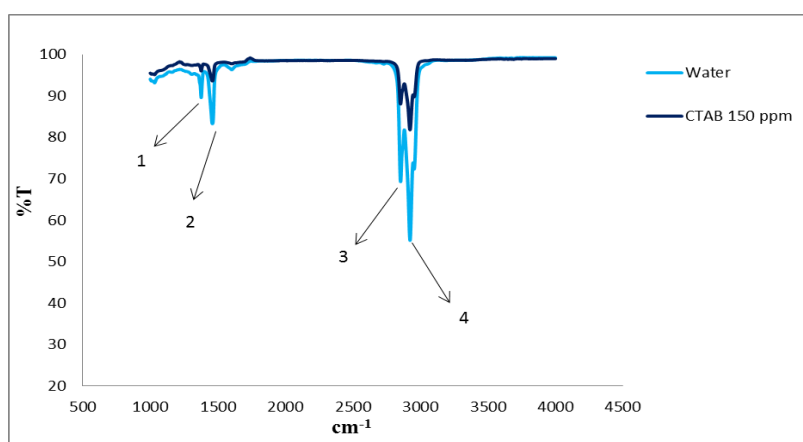
شکل‌های (۳) تا (۸) آنالیز ATR برای تزریق آب، سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید و پلیمر زانتان گام با غلظت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود پیک‌های با شماره‌های ۱ و ۲ در کل شکل‌های ذکر شده مربوط به تست ATR بیانگر ترکیبات قطبی نفت و پیک‌های ۳ و ۴ مربوط به ترکیبات غیرقطبی نفت می‌باشند. با دقت در شکل و مقایسه‌ی غلظت‌های سورفکتانت کاتیونی و پلیمر در هر آزمایش نسبت به تست تزریق آب می‌توان نتیجه گرفت با افزودن سورفکتانت و پلیمر به آب، پیک‌های موجود در نمودار ATR کاهش می‌یابد زیرا میزان ترکیبات قطبی و غیر قطبی نفت در آزمایش با ضریب برداشت بیشتر، به میزان بیشتری کاهش یافته است. سورفکتانت و پلیمر با وارد شدن به مخزن به دلیل کاهش کشش سطحی می‌توانند موجب جذب سطحی ترکیبات قطبی و غیرقطبی نفت مثل آسفالتین و پارافین شوند و نقش موثری در جهت کاهش و حذف این ترکیبات از نفت داشته باشند؛ که کاهش پیک‌های موجود در شکل ATR نیز به منزله‌ی کاهش میزان این ترکیبات از نفت می‌باشد. همچنین سورفکتانت‌ها موجود در فرآیند سیالیزنی به دلیل دارا بودن خاصیت قطبی توانایی حل کردن و شستشوی ترکیبات قطبی نفت خام و کاهش میزان این ترکیبات از نفت را داراست. حذف ترکیبات مذکور که از جمله ترکیبات سنگین موجود در نفت خام به حساب می‌آیند موجب کاهش گرانیوی نفت و انتقال روانتر آن درون مخزن و در نتیجه افزایش برداشت نفت می‌شود.



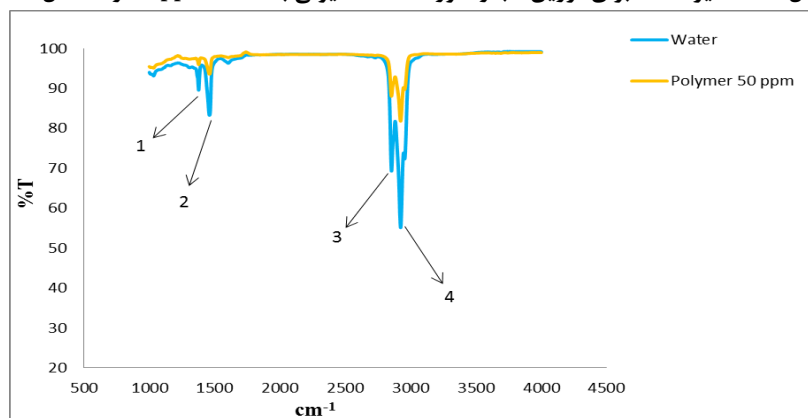
شکل (۳): آنالیز ATR برای تزریق آب و سورفکتانت کاتیونی با غلظت ۵۰ ppm و تخلخل ٪۳۰



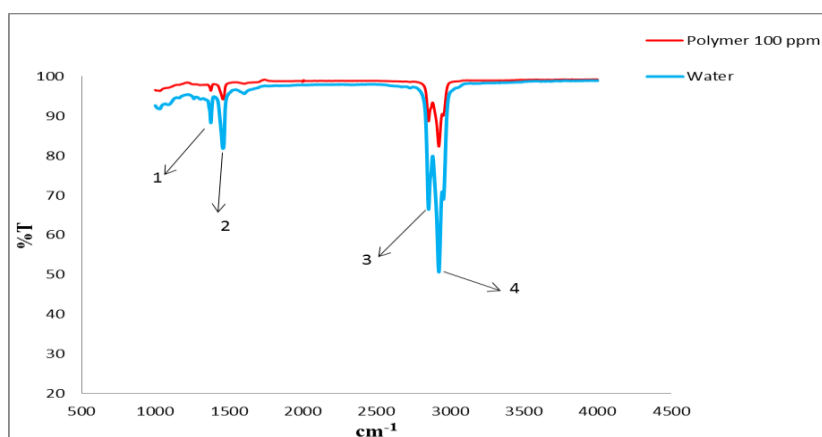
شکل (۴): آنالیز ATR برای تزریق آب و سورفکتانت کاتیونی با غلظت ۱۰۰ppm و تخلخل ۳۰٪



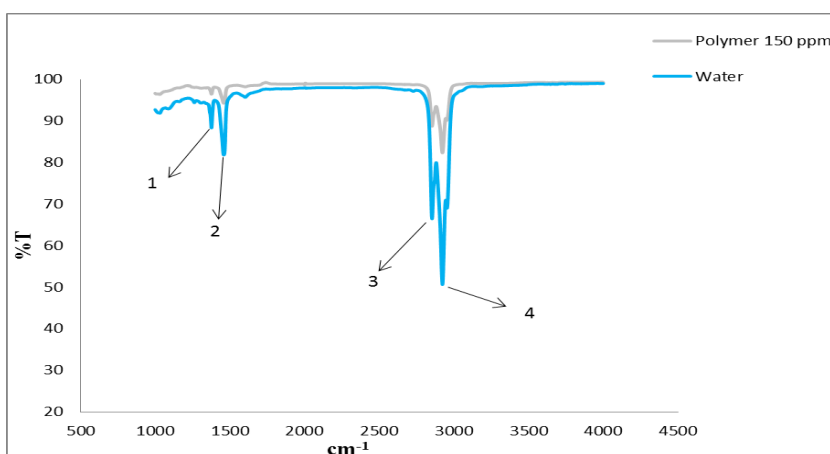
شکل (۵): آنالیز ATR برای تزریق آب و سورفکتانت کاتیونی با غلظت ۱۵۰ppm و تخلخل ۳۰٪



شکل (۶): آنالیز ATR برای تزریق آب و پلیمر با غلظت ۵۰ppm و تخلخل ۳۰٪



شکل (۷): آنالیز ATR برای تزریق آب و پلیمر با غلظت ۱۰۰ppm و تخلخل ۳۰٪



شکل (۸): آنالیز ATR برای تزریق آب و پلیمر با غلظت ۱۵۰ppm و تخلخل ۴۰٪

۴- نتیجه‌گیری

- اندازه‌گیری برداشت نفت در حالت تزریق آب، سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید و پلیمر زانتان گام نشان داد که با افزایش غلظت میزان بازیافت نفت می‌شود.

- با انجام فرآیند سیلاب‌زنی و تزریق آب، سورفکتانت کاتیونی و پلیمر درصد بازیافت نفت برای سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید نسبت به آب دریا و پلیمر زانتان گام روند افزایشی بیشتری دارد.

- بیشترین میزان برداشت نفت و درصد بازیافت نفت در شرایطی که سورفکتانت کاتیونی هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید با غلظت ۱۵۰ ppm بدست می‌آید. در این شرایط میزان برداشت نفت ۲۳۷ سی‌سی و درصد بازیافت نفت ۶۰/۸۸٪ می‌باشد.

- در غلظت‌های متفاوت سورفکتانت کاتیونی و پلیمر میزان بازیافت نفت از مخزن افزایش یافته که تأثیر این مورد بر نمودار ATR کاهش طول پیک‌های قطبی و غیرقطبی نفت می‌باشد. علت کاهش طول پیک‌ها نیز، کاهش و حذف ترکیبات قطبی و غیرقطبی موجود در نفت مثل آسفالتین‌ها و پارافین‌ها می‌باشد. آب همراه با سورفکتانت‌ها و پلیمر، ترکیبات قطبی نفت خام را شستشو داده و میزان این ترکیبات را در نفت به مقدار بسیار کمی می‌رساند که کاهش طول پیک‌های قطبی نیز به همین دلیل است.

مراجع

- [۱] اسماعیلی، ع، (۱۳۸۶)، ازدیاد برداشت از مخازن نفت، نشریه/اکتشاف و تولید شماره ۱۰، صفحه ۱۲-۲.
- [۲] خراط، ر، اسدالهی، م، نعمائی، م، (۱۳۸۷)، ازدیاد برداشت نفت، نهردانش، صفحه ۴۷-۲۱.
- [۳] عالمزاده، ای، وثوقی، م، (۱۳۸۹)، استفاده از نانو ذرات SiO_2 در مرحله سیلابزنی آبی و نحوه تاثیر آن روی تغییرات ترشوندگی مخازن و میزان برداشت نفت، دانشگاه صنعتی شریف، صفحه ۱۱۲-۹۵.
- [4] O. Selli. (2005). An Experimental Study of Viscous Surfactant Flooding for Enhanced Oil Recovery. *Master Thesis, Trondheim*, pp. 18-29.
- [5] A.A. Hamouda. K.A. Gomari. (2006). Influence of temperature on wettability alteration of carbonate reservoirs. *Paper SPE 99848 April*, pp.22-26.
- [6] M. Escrochi. M, Nabipour. S.S, Ayatollahi. A. Bemani. R, Maamari. M, Wadhahi. F, Boukadi. (2007).The Influence of Mineral Transformation on the Thermally Induced Wettability Alterations, *presented in the Oil sands and heavy oil technologies conference, Canada*, pp.18-20.
- [7] S. Iglaure. T. Barth. A.M. Blokhus. A. Skauge. (2009). The effect of crude oil acid fractions on wettability as studied by interfacial tension and contact angles. *J. Pet. Sci. Eng.* 30, 91- 103.
- [8] T. skauge. S, Hetland. K, spildo. (2010). Nano- Sized particles, *Oklahoma, USA SPE129933*, pp. 24-28 .
- [9] A. Karimi. Z. Fakhroueian. A. Bahramian. N. Pour Khiabani. J. Babae Darabad. R, Azin. S, Arya. (2012), Wettability Alteration in Carbonates using Zirconium Oxide Nanofluids: EOR Implications, *Energy & Fuel Article*, Vol. 26, No. 2, pp. 1028-1036.
- [10] Maghzi. R, Kharrat. A, Mohebbi. M.H. Ghazanfari.(2014). The impact of silica nanoparticles on the performance of polymer solution in presence of salts in polymer flooding for heavy oil recovery, *Fuel*, 123, pp.123-132.

تأثیر استفاده از ترکیب نانو سیلیس و متاکائولن در بتن حاوی لاستیک ریزدانه دانه بازیافتی بر خصوصیات مکانیکی بتن

نوید چلنگران، محمد مهدی جباری

مطالعه آزمایشگاهی اثر امولسیون کننده و نانوذرات بر تولید نفت از مخازن نفتی شکاف دار

عبدالحمید انصاری، اکبر ثابت

کاربرد روش المان مجزا در مکانیسم شکست دیسک های شبه سنگی حفره دار و بررسی مقاومت کششی آنها

حسن سرفراز، محمد فاروق حسینی، آرمین راست بود

مطالعه آزمایشگاهی استفاده از بازدارنده های ترمودینامیکی برای جلوگیری از تشکیل پدیده هیدرات گازی در پالایشگاه ششم پارس جنوبی

عبدالحمید انصاری، محمد کشتکار

مطالعه آزمایشگاهی بررسی بهبود بازیافت نفت با استفاده از سورفکتانت کاتیونی و پلیمر با فرآیند سیلاب زنی

ربابه پرواز، اسدالله ملک زاده

پژوهش های نوین
فناوری های نوین

۰۲۱ ۳۳۳ ۲۰ ۲۴۸۷ ۰۲۱ ۴۳۸۵۷۱ ۲۴
۰۲۶ ۳۲۷۲ ۴۷۸۷ ۰۲۶ ۳۲۷۴۷۱۵۸
تهران: افسریه، ۱۵ متری چهارم، کوچه ۳۸، پلاک ۲۸، واحد ۲
کرج: چهارراه هفت تیر، خیابان لاله ۱، پلاک ۱۴، طبقه همکف