

## بررسی و مدل‌سازی اثر خواص سنگ بر کارایی تزریق $\text{CO}_2$ و $\text{N}_2$

محمد صادق مؤمنی<sup>۱</sup>، ناصر تیموری خانه سری<sup>۲\*</sup>

۱- یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج، گروه مهندسی نفت

۲- اهواز، دانشگاه صنعت نفت، بخش مهندسی گاز

پیام نگار: nasser.teymourei@gmail.com

### چکیده

در این تحقیق از یک مدل ایده آل تزریق  $\text{CO}_2$  و  $\text{N}_2$  برای بررسی تأثیر خواص سنگ (خواصی مانند تراوایی، تخلخل، اندازه بلوک‌ها و خواص دیگر) روی تولید و افت فشار مخزن استفاده شده است. مدل با استفاده از نرم‌افزار اکلیپس ۳۰۰ شبیه‌سازی شده است، که شامل ۳ چاه تولیدی و یک چاه تزریقی می‌باشد. در تحقیق حاضر سه سناریو مطرح گردید که عبارتند از، تغییر تراوایی، تغییر تخلخل و تغییر اندازه بلوک‌ها. با توجه به اینکه برای تزریق  $\text{N}_2$  نتایج بهتری بدست آمد فقط نتایج آن گزارش می‌گردد، گرچه نمودارها شامل هر دو گاز می‌باشد، ولی بیشترین افت فشار را تراوایی ۱۰ میلی داریسی دارد که مقدار آن psia (۳۹۸۶/۰۲۸۳) است و کمترین افت فشار مربوط به تراوایی ۱۰۰۰ میلی داریسی می‌باشد که مقدار آن psia (۴۱۲۳/۶۴۶) مشاهده شد. با افزایش تخلخل، نرخ تولید افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش اندازه بلوک‌ها نرخ تولید بیشتر و افت فشار کمتر می‌شود. در این تحقیق حداقل فشار امتزاجی (MMP) به کمک شبکه عصبی مصنوعی محاسبه شد.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی تزریق  $\text{CO}_2$ ،  $\text{N}_2$ ، تخمین MMP با شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، اثر خواص سنگ

### ۱- مقدمه

$\text{CO}_2$  وجود دارد. اولین مکانیسم مهار فیزیکی یا تله هیدرودینامیکی  $\text{CO}_2$  به عنوان یک گاز یا سیال فوق بحرانی زیر پوشش سنگ می‌باشد. مکانیسم بعدی انحلال مستقیم  $\text{CO}_2$  در آب و فازهای گازی است. به این مکانیسم گاهی تله انحلالی هم می‌گویند [۳]. آخرین مکانیسم، این است که  $\text{CO}_2$  می‌تواند به صورت مستقیم یا غیر مستقیم با مواد معدنی و مواد آلی مخزن واکنش دهد و به فاز جامد تبدیل شود [۴]. این فرایند ممکن است نسبتاً آهسته باشد. یاسونامی (۲۰۰۸) نوعی شبیه‌سازی عددی روی تزریق  $\text{CO}_2$  و تولید  $\text{CH}_4$  انجام داده و نشان داد نرخ تولید در تراوایی ۱ میلی داریسی ۱۲ برابر بزرگتر از ۰/۲ میلی داریسی در ۵۰ روز می‌باشد. در این پروژه اثر خواص سنگ روی تزریق  $\text{CO}_2$  با نرم‌افزار اکلیپس بررسی شد. خواصی مانند تراوایی، تخلخل و اندازه بلوک‌ها [۵].

بدون تردید گازهای گلخانه‌ای مولکولهای وحشتناک و زیان آوری هستند. امروزه این موضوع پذیرفته شده است که انتشار گازهای گلخانه‌ای که از سوختن سوخت‌های فسیلی حاصل می‌شوند، موجب بالا رفتن دمای سطح کره زمین می‌گردد. مطالعه ذخیره‌سازی  $\text{CO}_2$  تقریباً از یک دهه قبل آغاز شده است [۱]. علی‌رغم اینکه هنوز ناحیه عظیمی مورد مطالعه قرار نگرفته است. شرایط عملیاتی مطلوب برای بازیابی نفت بالاتر و ذخیره‌سازی  $\text{CO}_2$  بیشتر به طور کلی یکسان نیست. از زمان آغاز به کار تزریق  $\text{CO}_2$  برای ازدیاد برداشت (EOR) در سال ۱۹۷۰، مهندسان مخزن تلاش قابل توجهی در جهت کاهش حجم  $\text{CO}_2$  مورد نیاز برای بازیافت یک بشکه نفت انجام داده اند [۲]. سه مکانیسم اصلی برای ذخیره‌سازی

## ۲- خصوصیات مخزن

### ۱-۲- خواص استاتیکی (تعادلی) مخزن (سنگ مخزن)

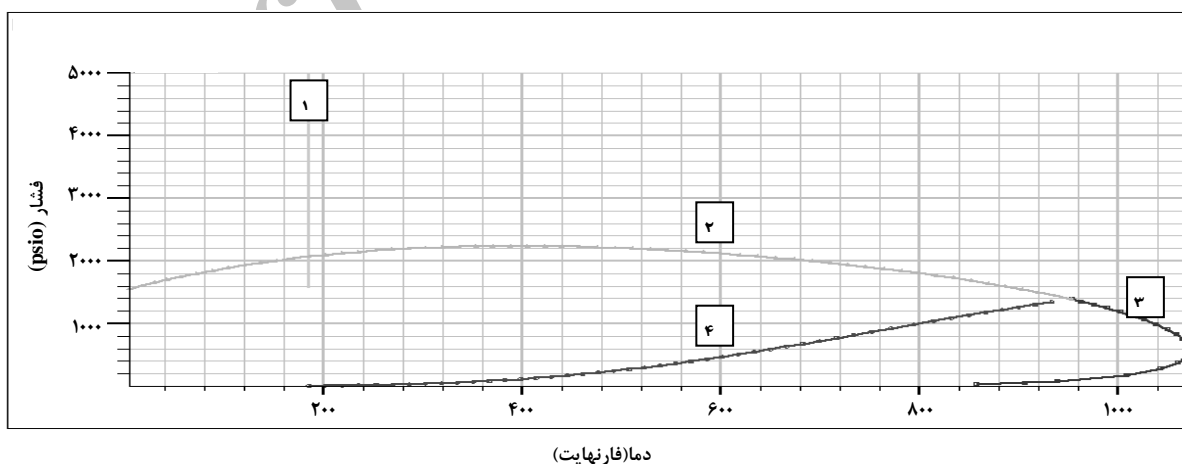
این مدل دارای ۷۱۶۱ (۳۱×۲۱×۱۱) بلوک است. فشار اولیه مخزن ۵۰۰۰ psi و عمق مبنا ۷۰۵۵ ft و دما ۱۵۰ F است. سطح تماس (آب- نفت) و نفت گاز به ترتیب ۷۱۱۰ ft و ۷۰۰۰ ft می‌باشد. فشار نقطهٔ حباب (۲۰۷۱/۸۶۰) PSi و سایر خصوصیات فیزیکی در جدول (۱) آمده است. در این آزمایش مقدار حداقل فشار امتزاجی به کمک شبکه عصبی (۳۱۴۹/۹۰۷) تخمین زده شد. [۶]

جدول ۲- تراوایی نسبی سیالات مخزن

$P_{cog}$	$K_{rog}$	$K_{rg}$	$S_{gas}$
۰	۰/۹۰۰	۰	۰
۰	۰/۵۵۵	۰	۰/۰۵
۰	۰/۳۷۱	۰	۰/۱۰
۰	۰/۲۱۲	۰	۰/۱۲
۰	۰/۱۰۴	۰/۰۰۲	۰/۱۸
۰	۰/۰۴۰	۰/۰۰۵	۰/۲۵
۰	۰/۰۱۱	۰/۰۱۳	۰/۳۰
۰	۰/۰۰۱	۰/۰۳۶	۰/۳۳
۰	۰	۰/۰۶۰	۰/۳۶
۰	۰	۰/۹۰۰	۰/۸۰

جدول ۱- خصوصیات استاتیکی مخزن

۳۱	تعداد سلول‌ها در جهت x
۲۱	تعداد سلول‌ها در جهت y
۱۱	تعداد سلول‌ها در جهت z
۱۰۰	$D_x(ft)$
۱۰۰	$D_y(ft)$
۱۰	$D_z(ft)$
۰/۱	تخلخل
۵۰	تراوایی در جهت x
۱۰	تراوایی در جهت z و y
۷ سال	زمان شبیه‌سازی

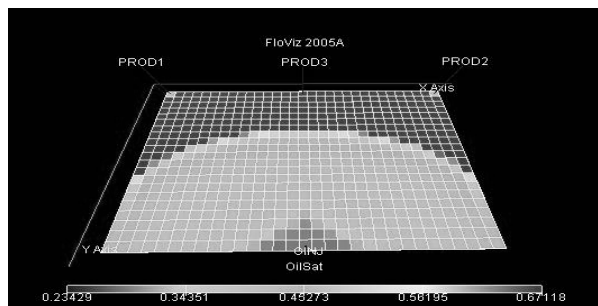


نمودار ۱- پوشش فازی مخزن

خطوط از بالا به پایین به ترتیب نشان‌دهنده:

۱. خط عمودی  $DI_1$
۲. منحنی بالایی تا دمای ۹۰۰ درجه فارنهایت خط حباب
۳. ادامه منحنی بعد از دمای ۹۰۰ درجه خط شبنم
۴. آخرین منحنی، خط جزء بخار ثابت است.

تراوایی ۱۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ میلی داری بررسی شد. در سناریوی دوم تغییر تخلخل مورد بررسی قرار گرفت که شامل تخلخل ۰/۱۰، ۰/۱۵ و ۰/۲۵ می‌باشد. سناریوی سوم تغییر اندازه بلوک‌هاست.



شکل ۱- نمایی از مدل سه بعدی مخزن و موقعیت چاه‌های تولیدی و تزریقی

### ۳-۱ سناریوی اول

سناریوی اول تغییر تراوایی است که شامل تراوایی ۱۰، ۱۰۰، ۱۰۰۰ می‌باشد. در زیر شکل‌های (۲) و (۳) (فشار میدانی و کل تولید نفت) بیانگر تغییرات می‌باشند. جدول (۴) مقادیر را در پایان شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

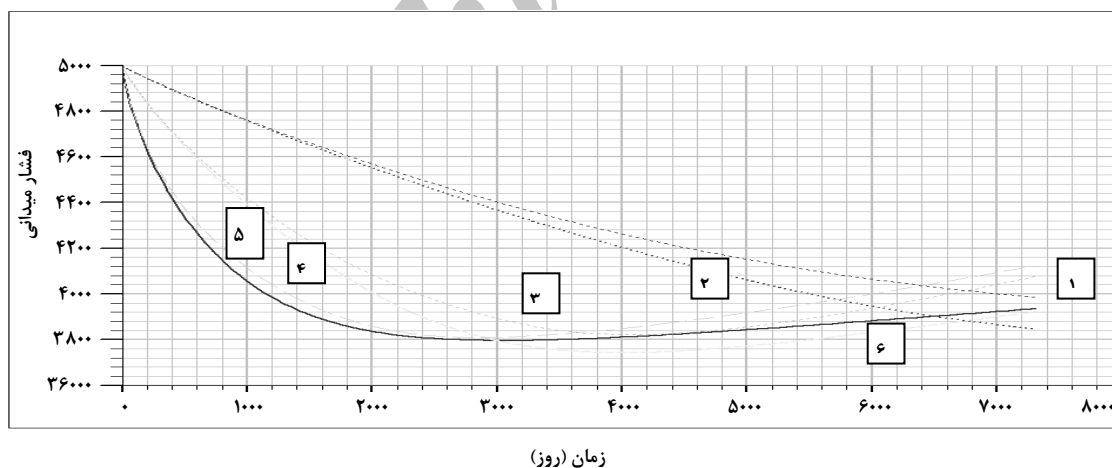
### جدول ۳- تراوایی نسبی سیالات مخزن

$S_{wat}$	$k_{rw}$	$k_{row}$	$P_{cow}$
۰/۱۸	۰	۰/۹۰۰	۵۰
۰/۲۰	۰	۰/۸۰۸	۴۳
۰/۳۲	۰/۰۰۱	۰/۴۱۲	۲۲
۰/۴۲	۰/۰۸۲	۰/۲۶	۱۱
۰/۵۰	۰/۱۶۵	۰/۰۶۸	۵/۸
۰/۵۹	۰/۲۴۹	۰/۰۱۵	۲/۳۶
۰/۶۸	۰/۳۸۰	۰/۰۰۲	۱/۴۱۲
۰/۷۳	۰/۴۸۲	۰	۱/۰۹
۰/۸۲	۰/۸۲۰	۰	۰/۸
۱	۱	۰	۰

در این تحقیق مخزن مورد مطالعه دارای ۳ چاه تولیدی و یک چاه تزریقی می‌باشد و تزریق از ابتدای تولید مخزن صورت گرفت. فشار تزریق و نرخ آن به ترتیب ۶۰۰۰ Psi و ۱۲۰۰۰ Mscf می‌باشد.

### ۳-۲ کار (انجام شده - سناریوها)

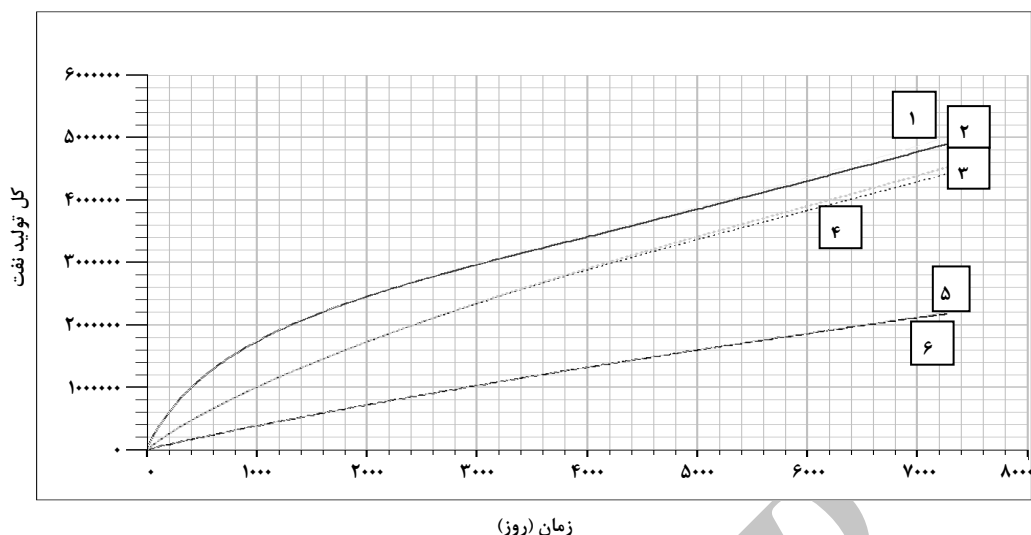
در سناریوی اول تغییر تراوایی مورد بررسی قرار گرفت که به ترتیب



شکل ۲- فشار میدانی سناریوی اول با تغییر تراوایی

خطوط از بالا به پایین به ترتیب نشان دهنده:

۱. تراوایی ۱۰ میلی داری گاز نیتروژن
۲. تراوایی ۱۰ میلی داری گاز دی اکسید کربن
۳. تراوایی ۱۰۰۰ میلی داری گاز نیتروژن
۴. تراوایی ۱۰۰ میلی داری گاز نیتروژن
۵. تراوایی ۱۰۰۰ میلی داری گاز دی اکسید کربن
۶. تراوایی ۱۰۰ میلی داری گاز دی اکسید کربن



شکل ۳- کل تولید نفت سناریوی اول با تغییر تراوایی

خطوط از بالا به پایین به ترتیب نشان‌دهنده:

۱. تراوایی ۱۰۰۰ میلی داری گاز نیتروژن
۲. تراوایی ۱۰۰۰ میلی داری گازی اکسید کربن
۳. تراوایی ۱۰۰ میلی داری گاز نیتروژن
۴. تراوایی ۱۰۰ میلی داری گاز دی اکسید کربن
۵. تراوایی ۱۰ میلی داری گاز نیتروژن
۶. تراوایی ۱۰ میلی داری گازی اکسید کربن

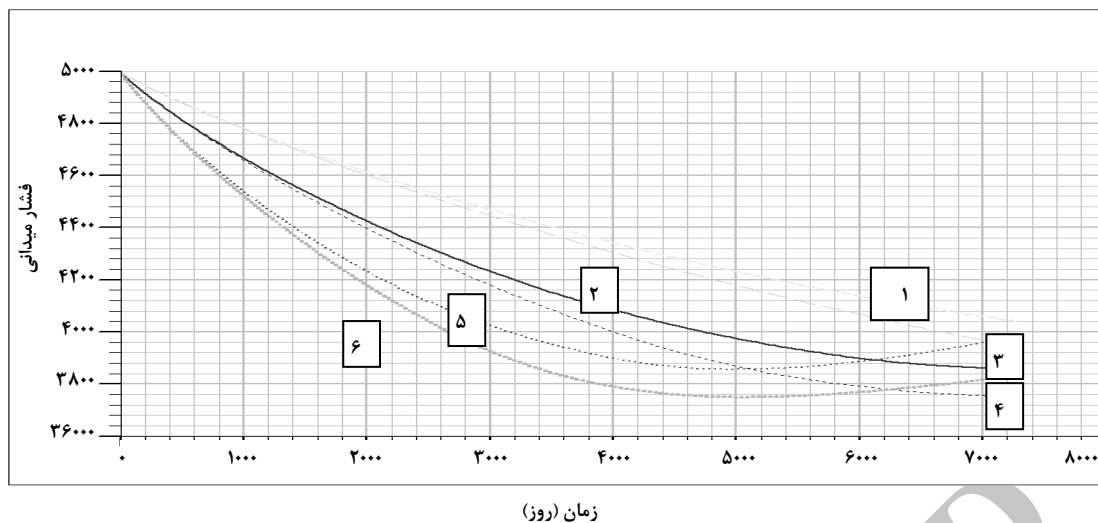
### ۲-۳ سناریوی دوم

سناریوی دوم تغییر در تخلخل است که در آن تخلخل‌های ۰/۱۰، ۰/۱۵، ۰/۲۵ مورد بررسی قرار گرفت سایر شرایط ثابت است. در زیر، شکل‌های (۴) و (۵) (فشار میدانی و کل تولید نفت) بیانگر تغییرات می‌باشند. جدول (۵) مقادیر در پایان شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد.

همانطور که در نمودار نرخ فشار (فشار میدانی) مشاهده می‌شود بیشترین افت فشار را تراوایی ۱۰ میلی داری دارد که مقدار آن psi (۳۹۸۶/۰۲۸۳) است و کمترین افت فشار مربوط به تراوایی ۱۰۰۰ میلی داری می‌باشد که مقدار آن (۴۱۲۳/۴۶۴) است. در نمودار کل تولید نفت (کل تولید نفت) بیشترین تولید مربوط به تراوایی ۱۰۰۰ میلی داری و کمترین، مربوط به ۱۰ میلی داری می‌باشد. با توجه به نمودار، بیشترین تولید را در تزریق  $N_2$  داشتیم.

جدول ۴- مقادیر فشار میدانی، کل تولید نفت سناریوی اول تغییر تراوایی

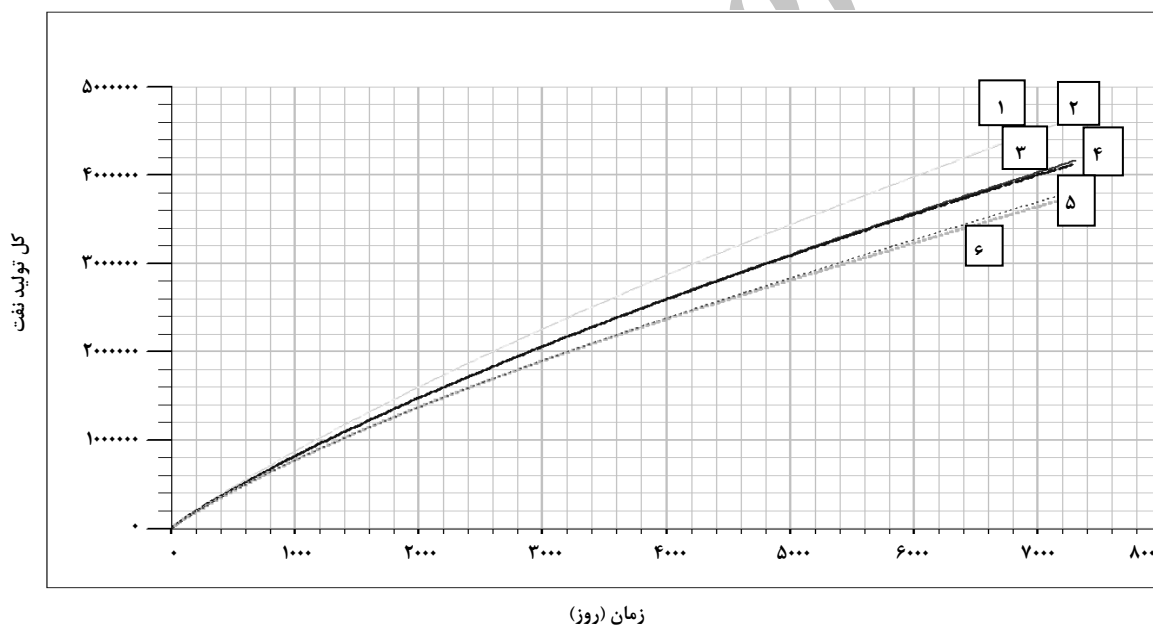
تراوایی (میلی داری) ( $N_2$ )	فشار میدانی (psia)	کل تولید نفت (STB)
۱۰	۳۹۸۶/۰۲۸۳	۲۲۰۶۸۸۳/۳
۱۰۰	۴۰۷۶/۲۵۹۵	۴۵۴۰۷۵۰/۵
۱۰۰۰	۴۱۲۳/۴۶۴	۵۰۲۵۰۱۹



شکل ۴- فشار میدانی سناریوی دوم تغییر تخلخل

خطوط از بالا به پایین به ترتیب نشان دهنده:

۱. تخلخل ۲۵ درصد گاز نیتروژن
۲. تخلخل ۲۵ درصد گاز دی اکسید کربن
۳. تخلخل ۱۵ درصد گاز نیتروژن
۴. تخلخل ۱۵ درصد گاز دی اکسید کربن
۵. تخلخل ۱۰ درصد گاز نیتروژن
۶. تخلخل ۱۰ درصد گاز دی اکسید کربن



شکل ۵- کل تولید نفت سناریوی دوم تغییر تخلخل

خطوط از بالا به پایین به ترتیب نشان دهنده:

۱. تخلخل ۲۵ درصد گاز نیتروژن
۲. تخلخل ۲۵ درصد گاز دی اکسید کربن
۳. تخلخل ۱۵ درصد گاز نیتروژن
۴. تخلخل ۱۵ درصد گاز دی اکسید کربن
۵. تخلخل ۱۰ درصد گاز نیتروژن
۶. تخلخل ۱۰ درصد گاز دی اکسید کربن

CO<sub>2</sub> بدست می‌آید. روند تغییر در خواص سنگ به شدت به مورد در حال مطالعه بستگی دارد زیرا مربوط به توزیع حفره ها، ترکیب آب نمک و همچنین شرایط ترمودینامیکی می‌باشد. فرایند ته‌نشینی می‌تواند روی تراوایی تاثیرگذار باشد خصوصاً وقتی که تغییر کوچکی در تخلخل مشاهده گردد. [۷]

### ۳-۳ سناریوی سوم

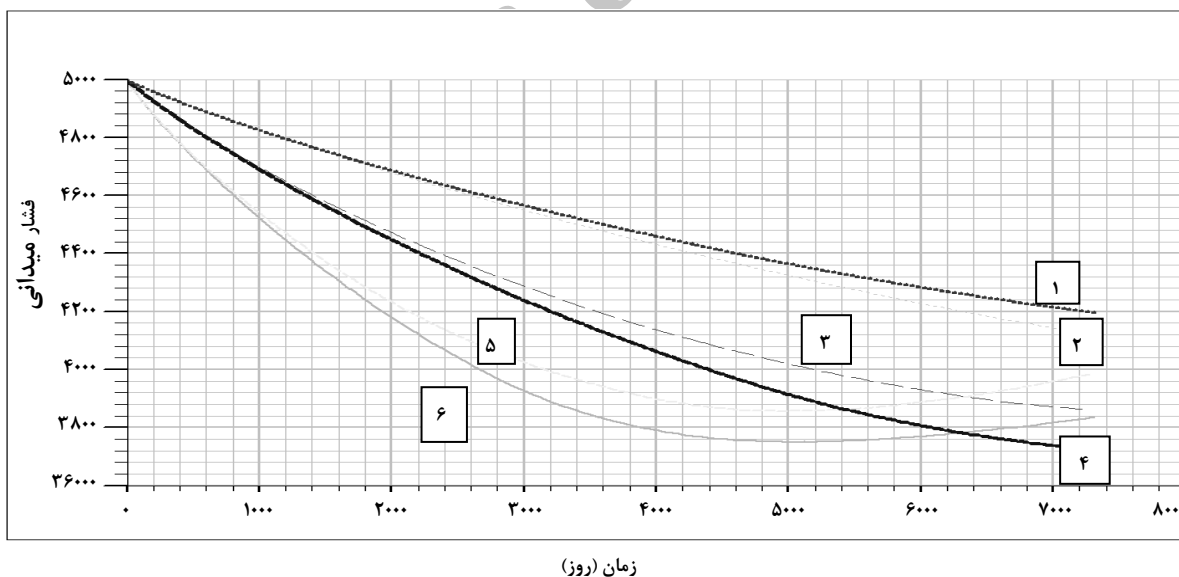
سناریوی سوم تغییر در خصوص اندازه بلوک‌هاست. در این سناریو سه اندازه ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ مورد بررسی قرار گرفت سایر شرایط ثابت است. در زیر، شکل‌های (۶) و (۷) (فشار میدانی و کل تولید نفت) بیانگر تغییرات می‌باشند. در جدول (۶) مقادیر در پایان شبیه‌سازی درج شده‌اند.

جدول ۵- مقادیر فشار میدانی، کل تولید نفت سناریوی

دوم تغییر تخلخل

تخلخل N <sub>2</sub>	فشار میدانی (psia)	کل تولید نفت (STB)
۰/۱۰	۳۹۸۶/۷۶۴۲	۳۸۲۶۳۸۰
۰/۱۵	۳۸۵۸/۳۰۹۶	4166691.8
۰/۲۵	۴۰۳۸/۱۳۵۷	4659483

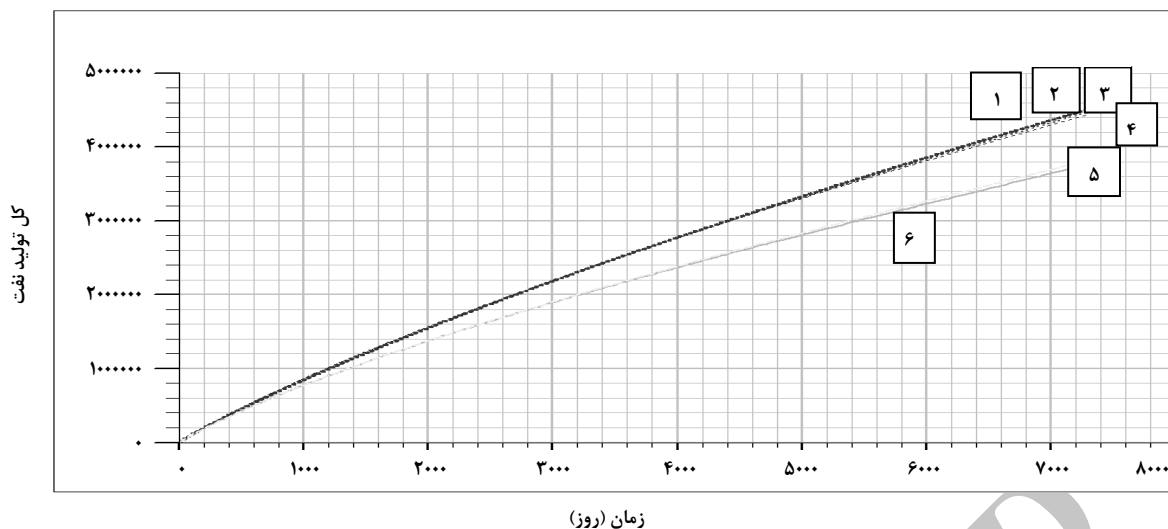
بیشترین تولید مربوط به تخلخل ۲۵ درصد و تزریق N<sub>2</sub> می‌باشد. همچنین کمترین افت فشار را تزریق N<sub>2</sub> با تخلخل ۲۵ درصد دارد. کمترین تولید را تخلخل ۱۰ درصد همراه با تزریق CO<sub>2</sub> دارد که شیب افت فشار آن از همه تندتر است. آیزک و همکاران (۲۰۰۶). انحلال برخی مواد معدنی موجب کاهش تراوایی و برخی دیگر موجب افزایش می‌گردد. مثلاً انحلال کلسیت منجر به افزایش تراوایی و تخلخل می‌شود. بهبود تراوایی یا کاهش تراوایی از تزریق



شکل ۶- فشار میدانی تغییر اندازه بلوک‌ها

خطوط از بالا به پایین به ترتیب نشان‌دهنده:

۱. اندازه بلوک ۵۰۰ گاز نیتروژن
۲. اندازه بلوک ۵۰۰ گاز دی اکسیدکربن
۳. اندازه بلوک ۴۰۰ گاز نیتروژن
۴. اندازه بلوک ۴۰۰ گاز دی اکسیدکربن
۵. اندازه بلوک ۳۰۰ گاز نیتروژن
۶. اندازه بلوک ۳۰۰ گاز دی اکسیدکربن



شکل ۷- کل تولید نفت تغییر اندازه بلوکها

خطوط از بالا به پایین به ترتیب نشان دهنده:

۱. اندازه بلوک ۵۰۰ گاز نیتروژن
۲. اندازه بلوک ۵۰۰ گاز دی اکسید کربن
۳. اندازه بلوک ۴۰۰ گاز نیتروژن
۴. اندازه بلوک ۴۰۰ گاز دی اکسید کربن
۵. اندازه بلوک ۳۰۰ گاز نیتروژن
۶. اندازه بلوک ۳۰۰ گاز دی اکسید کربن

جدول ۶- مقادیر فشار میدانی، کل تولید نفت سناریوی سوم تغییر در اندازه بلوکها

اندازه بلوک ها N <sub>2</sub>	فشار میدانی (psia)	کل تولید نفت (STB)
۳۰۰	۳۹۸۶/۷۶۴۲	۳۸۲۶۳۸۰
۴۰۰	۳۸۵۹/۹۶۲۶	۴۴۷۵۸۲۴/۵
۵۰۰	۴۱۹۵/۸۴۷۷	۴۵۱۱۴۷۷/۵

با توجه به نمودارها بیشترین تولید و کمترین افت فشار را تزریق N<sub>2</sub> با بلوک اندازه ۵۰۰ و کمترین تولید و بیشترین شیب افت فشار را نیز تزریق دی اکسید کربن با اندازه ۳۰۰ دارد.

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

۱. بیشترین افت فشار را تراوایی ۱۰ میلی داری دارد که مقدار آن psi (۳۹۸۶/۰۲۸۳) است و کمترین افت فشار مربوط به تراوایی ۱۰۰۰ میلی داری می باشد که مقدار آن psi (۴۱۲۳/۶۴۶) است. در نمودار کل تولید نفت (کل تولید نفت) بیشترین تولید مربوط به تراوایی ۱۰۰۰ میلی داری، و کمترین، مربوط به ۱۰

میلی داری می باشد. یاسونامی (۲۰۰۸) شبیه سازی عددی روی تزریق CO<sub>2</sub> و تولید CH<sub>4</sub> را انجام و نشان داد نرخ تولید در تراوایی ۱ میلی داری ۱۲ برابر بزرگتر از ۰/۲ میلی داری در ۵۰ روز می باشد [۵].

۲. بیشترین تولید مربوط به تخلخل ۲۵ درصد و تزریق N<sub>2</sub> می باشد. همچنین کمترین افت فشار را تزریق N<sub>2</sub> با تخلخل ۲۵ درصد دارد. کمترین تولید را تخلخل ۱۰ درصد همراه با تزریق CO<sub>2</sub> دارد که شیب افت فشار آن از همه تندتر است.

۳. بیشترین تولید و کمترین افت فشار را تزریق N<sub>2</sub> با اندازه بلوک ۵۰۰ دارد که مقدار تولید آن ۴۵۱۱۴۷۷/۵ بشکه است. کمترین تولید و بیشترین شیب افت فشار را نیز تزریق دی اکسید کربن با سایز ۳۰۰ دارد.

۴. استفاده از CO<sub>2</sub> در تزریق به این دلیل که یک گاز گلخانه ای می باشد مفید تر از N<sub>2</sub> است.

#### ۵- تشکر و قدردانی

از شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب به خاطر همکاری های مؤثرشان در جهت انجام این پروژه تشکر و قدردانی می شود.

- [1] Bradshaw, J., G. Allinson, BE Bradshaw, V. Nguyen, AJ Rigg, L. Spencer, and P. Wilson, "Australia's  $\text{CO}_2$  geological storage potential and matching of emission sources to potential sinks". Energy, 29(9-10): p. 1623-1631(2004).
- [2] Kavscek, A., "Screening criteria for  $\text{CO}_2$  storage in oil reservoirs". Petroleum Science and Technology, 20 (7-8): p. 841-866 (2002).
- [3] Reichle, D., J. Houghton, and S. Benson, "Working paper on carbon sequestration science and technology". Office of Science, Office of Fossil Energy, US Department of Energy, doe. gov, (1999).
- [4] Bachu, S., W. Gunter, and E. Perkins, "Aquifer disposal of  $\text{CO}_2$  hydrodynamic and mineral trapping". Energy conversion and Management, 35(4): p. 269-279 (1994).
- [5] Yasunami, T. "Numerical Temperature Prediction System in Injection Tubing." In SPE Annual Technical Conference and Exhibition, (2008).
- [6] Mohammad sadegh momeni , A.k., "Prediction of the MMP of gases using neural networks". The 7th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2011), (2011).
- [7] Izgec, O., B. Demiral, H. Bertin, and S. Akin. "Experimental and Numerical Modeling of Direct Injection of  $\text{CO}_2$  into Carbonate Formations." In SPE Annual Technical Conference and Exhibition,(2006).

Archive of SID