غربالگری مخازن نفتی ایران جهت تزریق امتزاجی دی‌اکسیدکربن

اکرم وحیدی*، مریم خسروی، فاطمه کمالی، عماد رعایایی، محمدعلی عمادی

تهران، مدیریت پژوهش و فناوری شرکت ملی نفت ایران، پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز

پیام‌نگار: **vahidi@nioc.rtd.ir**

چکیده

با توجه به افزایش حجم جهانی گازهای گلخانه ای بویژه دی اکسیدکربن، ضرورت ذخیره‌سازی گاز کربنیک در کنار تزریق آن به منظور ازدیاد برداشت اهمیت پیدا کرده است. هدف اصلی از این مطالعه، شناسایی مخازن نفتی مناسب ایران جهت تزریق امتزاجی CO_2 به منظور ازدیاد برداشت می باشد. در راستای این هدف تعدادی از مخازن ایران با استفاده از یک روش غربالگری جدید و سریع بر اساس پارامترهای کلیدی مخزن انتخاب می شوند در مرحله بعد مخازن تایید شده در مرحله غربالگری بر اساس قیاس پارامترهای مخزن کاندید با پارامترهای متناظر مخازن موفق در تزریق امتزاجی CO_2 رتبه بندی می شوند. در نهایت با استفاده از روشهای تحلیلی به ارزیابی و پیش بینی میزان ضریب بازیافت مخزن در اثر تزریق CO_2 پرداخته می‌شود و مخازن مناسب جهت تزریق امتزاجی CO_2 معرفی می شوند. در مرحله نهایی به منظور مقایسه و تایید نتایج، از نرم افزار CO2PROPHET استفاده شده است.

کلمات کلیدی: غربالگری مخازن، رتبه بندی تکنیکی، تزریق امتزاجی CO_2، قیاس پارامترهای کلیدی، پارامترهای متناظر مخازن موفق، پیش بینی ضریب بازیافت

۱- مقدمه

جمع آوری و ذخیره سازی گاز CO_2 در مقیاس بزرگ و صنعتی توسط کشورهای مختلف در سراسر جهان مورد توجه و بررسی می باشد. بیش از ۴۰ سال تجربه در پروژه های CO_2/ EOR این اطمینان را ایجاد کرده است که ذخیره سازی دراز مدت CO_2 در مخازن زیرزمینی و ساختارهای زمین شناختی، با مشخصات و پتانسیل مناسب، عملی و امکان پذیر است [۳]. در سالهای اخیر افزایش غیر طبیعی CO_2 در جو زمین باعث افزایش نگرانی و فشار جوامع بین المللی جهت کاهش و کنترل انتشار CO_2 شده است. با توجه به رتبه سیزدهم ایران در جهان و رتبه اول آن در خاورمیانه در زمینه انتشار گاز CO_2، یافتن پتانسیل‌های تزریق CO_2 در مخازن به منظور ازدیاد برداشت، اهمیت قابل توجهی پیدا کرده است. هدف ازاین تحقیق پیش بینی عملکرد تعدادی از مخازن ایران در اثر تزریق گاز CO_2 و معرفی مخازن مناسب جهت تزریق به منظور ازدیاد برداشت است.بنابراین با ارائه نرم افزاری تحت عنوان CO_2SIM بر اساس یک روش تحلیلی ساده و سریع به غربالگری مخازن پرداخته می شود.

۲- مطالعات امکان سنجی

تحقیقات گسترده ای در رابطه با غربالگری مخازن جهت تزریق امتزاجی CO_2 به منظور ازدیاد برداشت انجام شده است که تنها می تواند به عنوان راهنمای مناسب برای شناسایی اولیه مخزن، کاربرد داشته باشد. امروزه اکثر مدل‌های مورد استفاده در صنعت برای تزریق CO_2، از نوع مدل‌های پیچیده و زمان بر و نیازمند حجم بالایی از داده های ورودی می‌باشند که استفاده از این گونه مدل‌ها برای غربالگری سریع از تعداد زیادی مخزن، توصیه نمی‌شود.

در نرم افزار طراحی شده با توجه به اهمیت غربالگری سریع و تخمین ضریب بازیافت نفت از مخازن در اثر تزریق امتزاجی CO_2، طی مقایسه پارامتری، مخازن غربال می‌شوند و در قیاس با مشخصه‌های مخازن موفق در زمینه تزریق امتزاجی CO_2، درصد احتمال موفقیت آنها محاسبه می‌شود. در نهایت با استفاده از روش‌های تحلیلی، ضریب بازیافت نهایی مخزن در حجم‌های مختلف تزریق تخمین زده می‌شود. این نرم افزار که CO_2SIM نام دارد، با استفاده از اطلاعات قابل دسترسی از بانک اطلاعات مخازن تحت تزریق CO_2 در جهان و با نرم افزار Matlab ارائه شده است.

در CO_2SIM با استفاده از بانک اطلاعات پروژه‌های موفق تزریق CO_2 در دنیا، برای هر یک از مشخصه‌های تکنیکی مخزن، محدوده استانداردی تعریف شده [۵] که در جدول (۱) گزارش شده است.در مرحله غربالگری، ابتدا مشخصات تکنیکی مخزن هدف با حدود استاندارد معرفی شده مقایسه می شود اگر این مشخصات در محدوده قابل قبول قرار گیرد، تزریق CO_2 امکان پذیر خواهد بود.

در قسمت رتبه بندی تکنیکی مخازن[1]، برای هر یک از مشخصه های مخزن یک مقدار بهینه[2] و دو حد بدترین بالا و پایین[3] مشخص شده است.[۵] به منظور استاندارد کردن پارامترهای مخزن، که هر کدام دارای مقدار، مفهوم فیزیکی و واحد های متفاوتی می باشند، متغیر بدون بعد X_ij با تغیرات خطی بین ۱-۰ تعریف شده است. در محاسبه $X_{i,j}$، متغیر $P_{i,j}$ مقدار عددی پارامتر (j) مخزن (i) و $P_{o,j}$ و $P_{w,j}$ به ترتیب مقادیر عددی پارامتر (j) در بهترین و بدترین حالت است [۵].

جدول ۱ـ میزان های استاندارد مشخصه مخزن

پارامتر های مخزن	حد پایین	حد بالا
دما ^{o}F	۸۸	۲۵۰
گرانی (ثقل) نفت خام (API)	۲۷	۴۸
گرانروی (cp)	–	۱۰
درجه اشباع نفت (٪)	۲۵	–
تراوایی (md)	۵	–
فشار (psi)	۰/۹۵ *MMP	حد شکاف

$$X_{i,j} = \frac{\left|P_{i,j} - P_{w,j}\right|}{\left|P_{o,j} - P_{w,j}\right|} \qquad (۱)$$

به دلیل دقت بیشتر تابع نمایی در قیاس با تابع خطی، پارامتر خطی $X_{i,j}$ را تبدیل به متغیر نمایی ($A_{i,j}$) می کنیم که مقدار آن در محدودهٔ ۱۰۰-۱ است.

$$A_{i,j} = 100e^{-4.6X_{i,j}^{\ 2}} \qquad (۲)$$

به منظور مشخص کردن درجه تاثیرگذاری پارامترهای برای (j) بر میزان موفقیت روش تزریق امتزاجی CO_2، برای مشخصه های تکنیکی مخزن وزن W_j، بین ۱-۰، در نظر گرفته می شود. این مقدار بر اساس شیب نمودار بازیافت نفت نسبت به پارامتر مورد نظر در بهترین حالت آن تعیین می شود. [۵]

$$w_j = \frac{\alpha_j}{\sum_k \alpha_k} \qquad (۳)$$

$$\alpha_j = \frac{\dfrac{\left|V_{o,j} - V_{w,j}\right|}{V_{o,j}}}{\dfrac{\left|P_{o,j} - P_{w,j}\right|}{P_{o,j}}} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، $V_{o,j}$ و $V_{w,j}$ میزان متوسط بازیافت نفت متناظر با مقادیر بهترین و بدترین هر پارامتر وk در رابطه (۳) مقادیر مختلف پارامتر (j)

1. Reservoir Technical Ranking
2. Optimum
3. Worst

می باشد. وزن های محاسبه شده برای هر پارامتر در جدول (۲) گزارش شده است. با توجه به روابط (۱) تا (۴) و اعداد بدست آمده برای هر پارامتر، درصد موفقیت روش تزریق امتزاجی CO_2 در مخازن کاندید شده از روابط زیر مشخص می شود که R_i رتبه کسب شده مخزن i، و عددی بین ۱۰۰-۱ خواهد بود.

$$S_i = A_{i,j} w_j \qquad (۵)$$

$$R_i = \frac{100\left[\sum_1^j S_{j,i}\right]^{1/2}}{R_o} \qquad (۶)$$

از دیگر هدفهای این نرم افزار، محاسبه ضریب بازیافت نفت بر اثر تزریق امتزاجی CO_2 است. بر اساس پروژه های انجام شده در آمریکا تزریق امتزاجی دی اکسید کربن باعث افزایش ۷ الی۲۳ درصد ضریب بازیافت نفت می شود. [۲] میزان بازیافت نفت با استفاده از روشهای تحلیلی کلاریدج[1] [۷] و شاو[2] [۴] محاسبه می شود. روش کلاریدج، اصلاح شدهٔ روش پیشنهادی کُووال[3] [۸] با در نظر گرفتن جاروب ناحیه‌ای[4] است و پس از آن، اصلاحات بیشتر در این زمینه توسط شاو با در نظر گرفتن میزان اشباع نفت در مخازن انجام شده است. در محاسبات کُووال برای تخمین ضریب بازیافت نفت فرض شده است که تزریق حلال[5] بلافاصله بعد از بازیافت اولیه انجام شده است و از طرفی فرض بر این است که مخزن از ناحیه آبده تقویت نمی شودکه باعث تخمین بالاتری از میزان تولید نفت می گردد.در این روش، ناهمگونی مخزن با معرفی فاکتور کووال در محاسبات در نظر گرفته می شود که تابعی از ضریب DP[6] و گرانروی موثر سیال است.

کلاریدج با تعدیل روش کووال برای Np[7] فرمول زیر را ارائه کرده است:

$$\left(\frac{N_p - V_{piBT}}{1.0 - N_p}\right) = \left(\frac{1.6}{k^{0.61}}\right)\left(\frac{F_i - V_{piBT}}{1.0 - (F_i)_{BT}}\right)^{\left(\frac{1.28}{K^{0.26}}\right)} \qquad (۷)$$

که در آن:

$$K = HFE = HF\left[0.78 + 0.22\left(\frac{\mu_o}{\mu_s}\right)^{1/4}\right]^4 \qquad (۸)$$

$$\log_{10} H = \left[\frac{V_{DP}}{(1 - V_{DP})^{0.2}}\right] \qquad (۹)$$

$$F = 0.565 \log_{10}\left[Ck_v A \frac{\Delta\rho}{Q\mu_s}\right] + 0.870 \qquad (۱۰)$$

در روش کلاریدج مقدار V_{piBT} از رابطه (۱۴) تعریف می شود [۷]

$$V_{piBT} = \left(\frac{0.9}{M + 1.1}\right)^{0.5} \qquad (۱۱)$$

جدول ۲ـ وزن های تخصیص داده شده به پارامتر

پارامترهای مخزن	میزان بهینه پارامتر [۵]	حد پایین (Worst)[۵]	حد بالا (Worst)[۵]	وزن پارامتر
گرانی (ثقل) نفت خام (API)	۳۷	۲۰	۷۱	۰/۲۴
درجه اشباع نفت	۶۰	۳۰	۹۲	۰/۲
فشار مخزن/ کمترین فشار امتزاج پذیری	۱/۳۰	۰/۰۸۹	۱/۳	۰/۱۹
دما (°F)	۱۶۰	۱۳۰	۲۰۰	۰/۱۴
ضخامت لایه نفتی (ft)	۵۰	۵	۱۸۰	۰/۱۱
تراوایی (md)	۳۰۰	۱۸	۲۵۰۰	۰/۰۷
تخلخل (٪)	۲۰	۹	۳۳	۰/۰۲
شیب مخزن (درجه)	۲۰	۵	۲۰	۰/۰۳

1. Claridge
2. Shaw
3. Koval
4. Areal sweep
5. Solvent
6. Dykstra Parson
7. HCPV of oil produced, vol/vol

شاو و باچو[1] با انجام اصلاحات برای مقدار V_{piBT} رابطه (۱۵) را تعریف کردند [۴]

$$V_{piBT} = E_{ABT} * V_{pvdBT} \quad (۱۲)$$

$$E_{ABT} = 1 + \frac{0.4M}{(1+M)} \quad (۱۳)$$

$$V_{pvdBT} = \frac{1}{K} \quad (۱۴)$$

$$M = \frac{\mu_o}{\mu_g} \quad (۱۵)$$

داده‌های ورودی به برنامه شامل مشخصه‌های سیال و سنگ مخزن مانند شاخص چگالی نفت، میزان اشباع نفت، تراوایی، تخلخل، دما، فشار، عمق و ضریب DP مخزن می باشند. ضریب DP با استفاده از روش توزیع تراوایی در مخزن محاسبهٔ می‌شود که معمولا عددی کمتر از ۰/۹ است. این نرم‌افزار همچنین از قابلیت محاسبه کمترین فشار امتزاج پذیری، [۴] گرانروی CO_2 و نفت با استفاده از روابط تجربی تعریف شده برخوردار است.

خروجی این نرم افزار با فرمت TXT.* ذخیره می‌شودکه حاوی چکیده اطلاعات ورودی و نتایج مطالعات می‌باشد. در پنجره خروجی ابتدا مشخص می‌شود که آیا مخزن هدف برای تزریق امتزاجی CO_2 کاندیدی مناسبی است یا خیر و در سطرهای بعدی درصد موفقیت تخصیص داده شده به مخزن و در نهایت میزان پیش بینی شده ضریب بازیافت نفت در حجم های مختلف تزریق گزارش شده است. نمودارهای خروجی برنامه شامل نمودار دو بعدی، نمودار کلاریدج و پروفیل ضریب بازیافت نفت نسبت به حجم تزریق CO_2 است.

نمودار دو بعدی، موقعیت مخزن کاندید شده را از لحاظ مشخصات تکنیکی در مقایسه با مخازنی که عملکرد موفقیت آمیزی نسبت به تزریق امتزاجی CO_2 داشته اند، نشان می دهد. نمودار کلاریدج، تغییرات بازیافت نفت را به نسبت تحرک[2] در ازای حجم های مختلف تزریق در مخازن همگن نشان می دهد. در این برنامه، ضریب بازیافت نفت مخزن هدف در حجم تخلخل هیدروکربن[3] تزریقی خاص، با مخزن همگن متناظر با آن، با استفاده از نمودار کلاریدج مقایسه می شود.

در ادامه به منظورتایید نتایج حاصل از نرم افزار CO_2SIM، مقایسه ای بین نتایج $CO_2PROPHET$ و CO_2SIM انجام شده است. $CO_2PROPHET$ بر اساس مدل‌های عددی پیچیده و با توانایی بررسی عملکردمخازن نسبت به تزریق امتزاجی CO_2 طراحی شده است.این شبیه ساز به پارامترهایی نظیر نمودارهای تراوایی نسبی و اطلاعات مربوط به مشخصات نفت و گازمخزن، نیاز دارد. [۱] مقایسه بین نتایج دو نرم افزار برای تعداد زیادی از مخازن، تطابق بین نتایج را نشان می‌دهد.

۳- نتایج غربالگری مخازن نفتی ایران

با استفاده از نرم افزار CO_2SIM و مقایسه نتایج حاصل از آن با نتایج نرم افزار $CO_2PROPHET$، غربالگری اولیه تعداد زیادی از مخازن ایران به منظور تزریق امتزاجی CO_2 انجام شده است. اطلاعات برخی از مخازن در جدول (۳) گزارش شده است. پس از وارد کردن پارامترهای مخزن به نرم‌افزار CO_2SIM و مقایسه پارامترهای کلیدی مخزن کاندید شده با میزان استاندارد تعیین شده در برنامه، نتایج نشان می‌دهند. تعدادی از مخازن بدلیل قرار نگرفتن کل پارامترها در ناحیه استاندارد در مرحله اولیه حذف می شوند.

با توجه به نتایج CO_2SIM، مخزن B1K به دلیل آنکه فشار فعلی آن از فشار امتزاج پذیری کمتر است کاندید مناسبی برای تزریق شناخته نشد. تعدادی از مخازن مانند D1N,D2N,S2N بدلیل پایین بودن تراوایی متوسط مخزن و تعدادی از آنها مانند S5H,P1R به دلیل سنگینی نفت مخزن برای تزریق امتزاجی CO2 مناسب شناخته نشدند. شکل (۱) نمودار دو بعدی، خروجیCO_2SIM ، مخزن S5H است که موقعیت نامناسب گرانی نفت این مخزن نسبت به گرانی مخازن موفق در زمینه تزریق امتزاجی CO_2 را نشان می دهد.

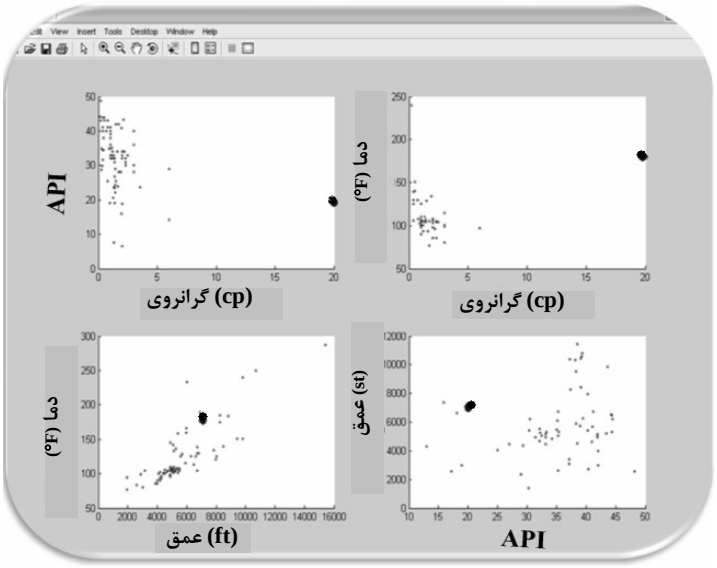
بر اساس نتایج اولیه غربالگری با نرم افزار CO_2SIM، مخازن نفتی S4N و A1Z وK1T نسبت به تزریق امتزاجی CO_2 درصد موفقیتی حدود ۷۷/۵۲ و۷۶/۰۱۸و ۶۱/۹۴ را بخود تخصیص داده اند. میزان ضریب بازیافت نفت در تزریق یک حجم تخلخل هیدروکربنی با استفاده از CO_2SIM, $CO_2PROPHET$ برای مخازن ذکر شده تقریبا نزدیک به هم و به ترتیب، حدود ۴۲ و۳۸و۳۰ درصد برآورد

1. Bachu
2. Mobility Ratio
3 -Hydrocarbon Pore Volume (HCPV)

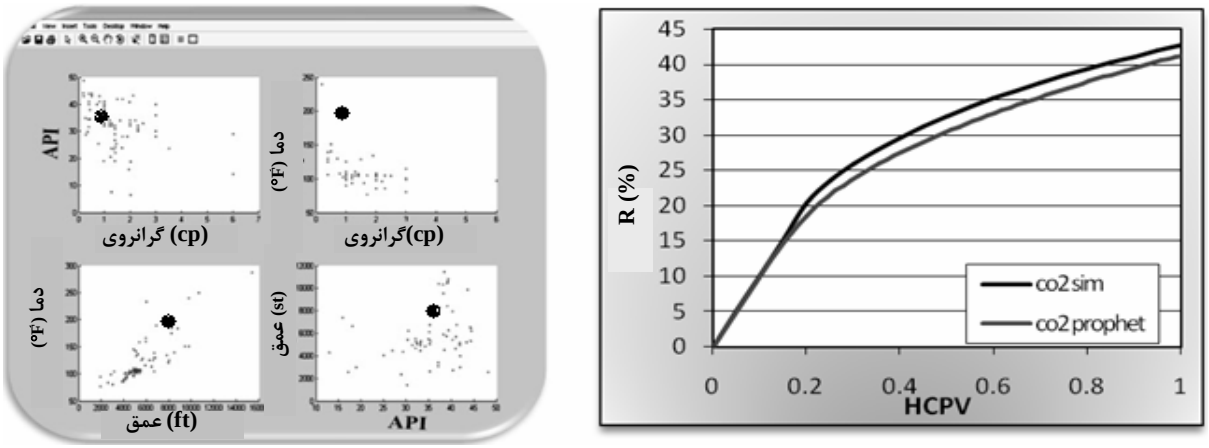
شده است. نمودارهای دو بعدی و پروفیل بازیافت، مقایسه بین خروجی‌های دو نرم‌افزار CO_2SIM و $CO_2PROPHET$، مربوط به این مخازن در شکل (۲) و (۳) و (۴) نشان داده شده اند. مخازن M1N,M2N,S3D,C1K نیز از جمله مخازنی می‌باشندکه نسبت به تزریق امتزاجی CO_2 رتبه مناسبی را به خود تخصیص داده اند. درجه و میزان بازیافت نفت برای هر یک از مخازن ذکر شده در جدول (۴) گزارش شده است.

جدول ۳ـ اطلاعات مخازن نفتی مورد مطالعه

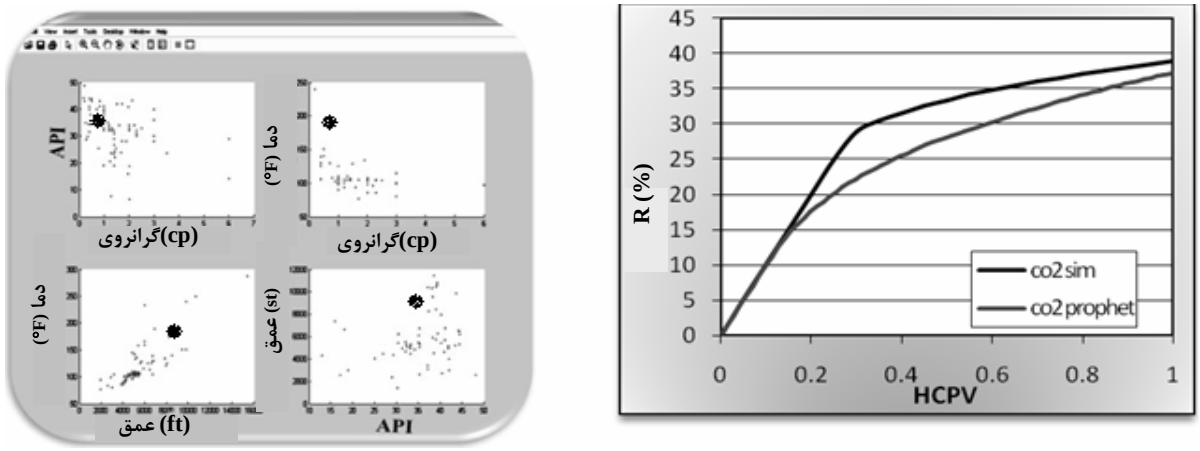
مخزن	A1Z	M1N	M2N	B1K	C1K	D1N	D2N	K1T	P1R	P1W	P2W	S3D	S2N	S4N	S5H
گرانی API	۳۴/۷	۳۲	۲۶	۳۰	۲۹	۳۰/۲	۲۶/۱	۳۶	۱۳	۲۱/۷	۱۹	۴۱/۵	۳۰	۳۶	۱۹/۸
اشباع نفت	۰/۷	۰/۷	۰/۶۵	۰/۶۵		۰/۶۵	۰/۴۵	۰/۸۳	۰/۷۷	۰/۷۵		۰/۶۵	۰/۷۸	۰/۸	۰/۹۴
دما (°F)	۱۸۹	۲۱۵	۲۱۵	۱۶۰	۲۱۵	۱۹۰	۲۳۸	۲۱۲	۲۰۴	۱۶۹/۵	۲۳۸		۱۷۴	۱۹۳	۱۸۰
ضخامت لایه نفتی	۱۶۸	۱۵۵/۱۵	۱۲۲/۸	۱۵۶		۲۶/۲۴	۹۸/۷۴	۸۲/۳۲	۱۵۳/۳	۴۷/۴۲		۶۹/۱۱	۲۶/۷۵	۲۱/۱۲	۴۰/۳۴
تراوایی متوسط (md)	۱۰	۱۲	۱۰	۱۰	۵۰۰	۰/۵	۰/۵	۵	۲۶۹۱/۷	۵۰۰	۱۴	۵	۱/۷	۱۶-۴	۱۰-۱
تخلخل (٪)	۰/۲	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۲	۰/۱۷	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۲۲	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۲۹
فشار فعلی مخزن (psi)	۳۹۰۰	۴۰۰۰	۵۵۰۰	۲۰۰۰	۴۸۴۳	۳۷۹۳	۵۷۶۸	۴۳۳۱	۴۶۴۰	۴۵۸۹	۵۵۶۲	۴۴۷۳	۳۶۹۸	۲۳۹۰	۲۹۰۰



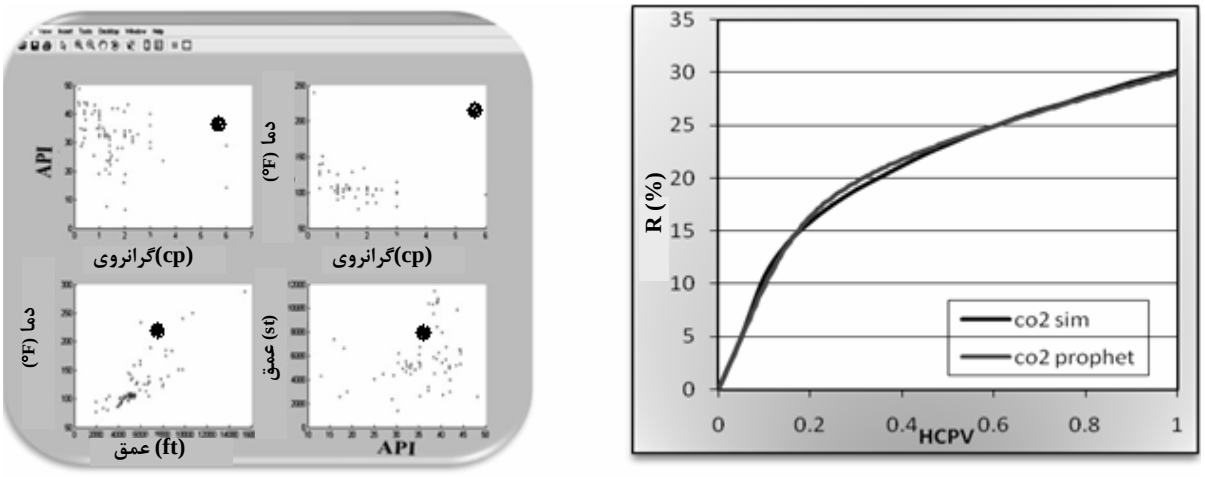
شکل ۱ـ نمودارقیاس دو بعدی پارامترهای مخزن S5H (خروجی CO2SIM)



شکل ۲ـ نمودارقیاس دو بعدی پارامترهای مخزن و پروفیل بازیافت مخزن S4N



شکل ۳ـ نمودارقیاس دو بعدی پارامترهای مخزن و پروفیل بازیافت مخزن A1Z



شکل ۴ـ نمودارقیاس دو بعدی پارامترهای مخزن و پروفیل بازیافت مخزن K1T

جدول ۴ـ رتبه و میزان بازیافت نفت تعدادی از مخازن مورد مطالعه

مخزن	S4N	A1Z	S3D	K1T	M1N	M2N	C1K
رتبه بندی تکنیکی	۷۷/۵۲	۷۶/۰۱۷	۶۳/۷۸	۶۱/۹۴	۵۲	۴۶/۳۲	۴۴/۱۲
بازیافت در نقطه میان شکن	۹/۱۷	۸/۴۹	۷/۸۹	۷/۳۵	۶/۸۳	۵/۵۵	۸/۲
بازیافت در ۰/۵ حجم تزریق	۳۰/۶۹	۲۸/۴	۲۴/۴۹	۲۳/۴۷	۲۲/۳۱	۲۳/۸۷	۲۶/۷۹
بازیافت در ۱ حجم تزریق	۴۱/۲۵	۳۷/۳۱	۳۴/۴۲	۳۰	۲۷/۷	۳۰/۳۰	۳۵/۹۴

در انتها ذکر این نکته ضروری است که رتبه بندی با توجه به مشخصات سیال و سنگ مخزن وتخمین میزان بازیافت نهایی نمی‌تواند تنها فاکتورهای مهم در انتخاب یک کاندیدی مناسب جهت تزریق CO_2 باشد.بلکه در کنار مشخصه‌های تکنیکی مخزن، وجود یک منبع قابل اطمینان و کافی CO_2 با هزینه‌های معقول از ابتدایی ترین نیازهای این پروژه است. عدم توجه به هر یک از این معیارها باعث عدم موفقیت پروژه از نقطه نظر فنی و اقتصادی می شود.

۴- نتایج و پیشنهادات

پس از طراحی نرم افزار CO_2SIM غربالگری سریع و اولیه تعداد زیادی از مخازن ایران انجام و میزان موفقیت هر یک از مخازن هدف، مشخص شده است. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر می باشند:

۱- برای تمامی مخازن انتخاب شده از مخازن ایران، ضریب بازیافت در محدودهٔ ۹/۱۷-۵/۵ درصد در نقطه میان شکنی[1]، ۳۰/۷-۲۲/۳ درصد و۴۱-۲۷ درصد به ازای نیم و یک حجم تخلخل تزریق CO_2 تخمین زده شده است.

۲- با توجه به نتایج حاصل، مخازن A1Z و S4N با در نظر گرفتن مشخصات مربوطه بهترین عملکرد را نسبت به تزریق امتزاجی CO_2 نشان می دهند و می توانند به عنوان مخازن کاندید جهت تزریق CO_2 معرفی شوند.

۳- با توجه به میزان دسترسی و عدم قطعیت در اطلاعات مخازن و محدودیت های مدل های تحلیلی، از نتایج پیش‌بینی شده تنها به عنوان راهنمای اولیه استفاده می شود. بعد از انجام غربالگری اولیه برای انتخاب مخزن هدف، نیاز به مطالعات فنی و آزمایشگاهی کاملتری داریم.

1. Break Through

۵- فهرست علائم

E[2]: گرانروی موثریا نسبت تحرک تعریف شده توسط Koval

F[3]: فاکتور روراندگی گرانی

K: فاکتور Koval

H[4]: فاکتور نا همگونی

E_{ABT}[5]: راندمان جاروب ناحیه ای

μ_o: گرانروی نفت

μ_s: گرانروی CO_2

N_p: نفت تولیدی نسبت به حجم تخلخلی هیدروکربن

V_{DP} : ضریب Dykstra-Parsons

V_{piBT}[6]: حجم تخلخل واقعی حلال تزریقی در نقطه میان شکن

V_{pvdBT}[7]: حجم تخلخل تزریقی اشغالی در نقطه میان شکن

۶- تشکر و قدردانی

از مدیریت پژوهش و فناوری شرکت ملی نفت ایران به خاطر حمایت های مالی و معنوی ایشان تشکر می‌شود. همچنین از همکاری بی‌شائبه مسئولین و کارشناسان محترم شرکت نفت مرکزی و شرکت نفت فلات قاره در گردآوری اطلاعات مخازن کشور سپاسگزاری می‌نماید. در ادامه از مهندس کاوه کریمی و مهندس مجتبی طالبیان به خاطر همراهی صمیمانه ایشان در این مطالعه قدر دانی می‌شود.

2. Effective viscosity or mobility ratio defined by Koval
3. Gravity override factor
4. Heterogeneity factor
5. Areal sweep efficiency at breakthrough per Caudle-Witte correlation
6. Actual pore volumes of solvent injected at breakthrough
7. Invaded pore volumes injected at breakthrough

مراجع

[1] CO_2 Prophet manual

[2] E.J. Manrique, V.E. Muci, M.E. Gurfinkel, "EOR Field Experiences in Carbonate Reservoirs in the United States" SPE paper 100063, presented at the 2006 SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery held in Tulsa, Oklahoma, U.S.A., 22–26 April (2006).

[3] Eduardo Manrique, Mehdi Izadi, Curtis Kitchen, Norwest-Questa Engineering and Vladimir Alvarado, "Effective EOR Decision Strategies with Limited Data: Field Cases Demonstration", SPE paper 113269, presented at the 2008 SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium held in Tulsa, Oklahoma, U.S.A., 19–23 April (2008).

[4] J. Shaw, S. Bachu, "Screening, Evaluation, and Ranking of Oil Reservoirs Suitable for CO2-Flood EOR and Carbon Dioxide Sequestration" Journal of Canadian petr. Techn. Volume 41, No. 9, September (2002).

[5] O.Rivas, S. Embid and F.Bolivar, "Ranking Reservoirs for Carbon Dioxide Flooding Processes", SPE paper 23641, (1994).

[6] Richard Henson, Adrian Todd and Patrick Corbett, "Geologically Based Screening Criteria for Improved Oil Recovery Projects", SPE paper 75148, presented at the SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium held in Tulsa, Oklahoma U.S.A., 13–17 April (2002).

[7] E, L. Claridge, Shell, "Prediction of Recovery in Unstable Miscible Flooding", SPE paper 2930, April, (1972).

[8] E.J.Koval, "A Method for Predicting the Performance of Unstable Miscible Displacement in Hetrogeneous Media", SPE paper 450, June (1963).