

بررسی نفوذپذیری وابسته به تنش در مخازن شکافدار با استفاده از روش عددی المان مجزاء

بهنام قبادی، حمیدرضا نجاتی* و کامران گشتاسبی

گروه مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۱۴

تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۱۰

چکیده

موضوع حساسیت نفوذپذیری نسبت به تنش در مخازن نفتی و گازی یک موضوع بسیار مهم و حیاتی می‌باشد، به طوری که تولید از یک مخزن ارتباط تنگاتنگی با ضریب حساسیت تنش آن دارد. در واقع این پدیده بدین صورت است که کاهش فشار مخازن در حالی که تنش روباره دارای مقدار ثابتی است، باعث افزایش تنش موثر و در نتیجه کاهش نفوذپذیری خواهد شد. چنانچه ارتباط دقیق بین کاهش نفوذپذیری با کاهش فشار مخازن به خوبی شناخته شود، می‌توان استخراج هیدروکربور از مخازن را اقتصادی‌تر نمود. در این مقاله با استفاده از روش عددی المان مجزاء یک کد عددی توسط نرم‌افزار UDEC توسعه داده شده است. در کد عددی توسعه داده شده تاثیر ضریب حساسیت بر روی پارامترهایی همانند میدان تولید چاه و ضریب پوسته در اطراف یک مخزن با جریان شعاعی بررسی شده است. برای بررسی تاثیر تنش بر روی نفوذپذیری شکاف‌های موجود در یک مخزن رابطه بین تنش و نفوذپذیری به صورت نمایی فرض شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش ضریب تراکم‌پذیری شکاف‌ها، ضریب پوسته مخزن دچار افزایش و میزان تولید از چاه دچار کاهش می‌شود.

کلمات کلیدی: نفوذپذیری وابسته به تنش، نرخ تولید، ضریب پوسته، روش عددی المان مجزاء، نرم‌افزار UDEC.

مقدمه

موثر و در نتیجه کاهش نفوذپذیری خواهد شد. کاهش نفوذپذیری تاثیرات قابل توجهی بر روی تولید چاه‌ها و توسعه مخازن خواهد داشت. موضوع حساسیت نفوذپذیری نسبت به تنش هم در مخازن شکافدار و هم در مخازن غیر شکافدار رخ می‌دهد که در مخازن نامستحکم توسط یک ماتریکس با تخلخل و نفوذپذیری بالا و در مخازن مستحکم توسط ماتریکس دارای تخلخل و نفوذپذیری پایین مشخص می‌شود.

موضوع حساسیت نفوذپذیری نسبت به تنش یک موضوع بسیار مهم برای حفاظت از مخازن نفت و گاز و بهره‌برداری از آنها می‌باشد. این موضوع اولین بار توسط فت و داویس در سال ۱۹۵۲ ارائه شده است [۱]. در واقع این پدیده بدین صورت است که کاهش فشار مخزن در حالی که تنش روباره آن دارای مقدار ثابتی است، باعث افزایش تنش

تنش را در مخازن مدل‌سازی کردند. برای بررسی این که چگونه نفوذپذیری نسبی به‌طور ژئومکانیکی ممکن است بر روی نرخ جریان تاثیر بگذارد یک شبیه‌سازی کوپل ژئومکانیکی چند مرحله‌ای انجام گرفت. شبیه‌سازی آنها شامل یک جدول نفوذپذیری نسبی برای هر گره موجود در بلوک بود که در هر گام زمانی به روز می‌شد. نتایج مطالعات شبیه‌سازی حاکی از یک اختلاف فاحش در فاکتور بازیابی سیال برای هنگامی که تاثیرات ژئومکانیکی بر روی تابع نفوذپذیری نسبی در شبیه‌سازی‌های در نظر گرفته می‌شد به نسبت حالتی که فقط تغییرات تخلخل و نفوذپذیری مطلق دخیل بودند، داشت [۶]. همود و همکاران چگونگی تحریک^۲ حجم ناشی از تاثیر برش را بر روی نمودارهای نفوذپذیری نسبی نفت/ آب مورد بررسی قرار دادند [۷]. الداکوسکی نیز چندین آزمایش را با تنش‌های مختلف بر روی نمونه‌های ماسه‌سنگی برای مطالعه نفوذپذیری موثر انجام دادند، آنها مشاهده کردند که نفوذپذیری موثر آب با کاهش فشار محصور کننده افزایش پیدا می‌کند [۸].

لی و همکاران در سال ۲۰۰۷ رابطه بین نفوذپذیری و تنش موثر را در مخازن نفتی تایت^۳ مطالعه نمودند. در مطالعه آنها به‌طور ویژه یک روش کمی برای توصیف ارتباط بین نفوذپذیری و تنش موثر توسعه داده شد. روش آنها بر مبنای تنش برجای موثر اصلی مخزن به جای کاهش تنش موثر در طی تولید از مخزن توسعه داده شده است. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان داد که ارتباط بین نفوذپذیری ذاتی و تنش موثر به‌طور کلی از یک رابطه چند جمله‌ای درجه دوم پیروی می‌کند، که به واسطه آن می‌توان فهمید که تنش موثر چه تاثیری بر روی نفوذپذیری خواهد گذاشت [۹].

مخازن ماسه‌ای غیرمتراکم، مخازن شیلی و مخازن کربناته مثال‌هایی از مخازن حساس به تنش می‌باشند. مخازن با نفوذپذیری پایین در محیط‌های شکاف‌دار نسبت به تنش بیشتر حساس می‌باشند. این حساسیت ممکن است باعث بروز مشکلات زیادی برای بهره‌برداری از مخزن همانند احتیاج به عملیات‌هایی همچون تزریق سیال به داخل مخزن برای بازیابی سیال باقی‌مانده از آن باشد و یا باعث تسریع روند آسیب به مخزن گردد. به‌طور کلی بررسی تاثیر تنش بر روی نفوذپذیری در طول مراحل مختلف عمر یک مخزن از جمله ارزیابی، بهره‌وری و مدیریت آن لازم و ضروری می‌باشد [۲ و ۳].

برای بررسی حساسیت نفوذپذیری نسبت به تنش کارهای تحقیقاتی متنوعی هم به‌صورت آزمایشگاهی و هم به‌صورت تحلیلی و عددی انجام شده است. ژائو و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از شبیه‌سازی چندین شکاف موازی در مخازن با نفوذپذیری پایین، یک مدل مقیاسی را ارائه داده‌اند. در مدل مقیاسی تاثیر پارامترهای اندازه نمونه، مقیاس جریان زیرزمینی، دانسیته شکستگی‌ها، احتمال رخداد شکستگی‌ها و تنش‌های برجا لحاظ شده است [۴].

لی و همکاران نیز یک مدل جدید را برای پیش‌بینی نفوذپذیری وابسته به تنش و نفوذپذیری نسبی در محیط‌های میکرومتخلخل با نفوذپذیری پایین بر مبنای تئوری فراکتال توسعه دادند. در مدل پیشنهادی آنها پیش‌بینی اشباع آب کم نشدنی^۱، تخلخل نرمالیزه شده و نسبت بین krw/krg دارای روندی مشابه با روند داده‌های آزمایشگاهی موجود بود.

بر مبنای مدل آنها تخلخل و نفوذپذیری نرمالیزه شده با افزایش تنش موثر کاهش پیدا می‌کنند و نتایج پیش‌بینی شده تطابق خوبی را با تجربیات گذشته دارا بود [۵]. اجابوهانمی و همکاران با استفاده از نرم‌افزار FLAC 3D کوپل نفوذپذیری وابسته به

1. Irreducible Water Saturation
2. Induce
3. Tight

جریان سیال در محیط‌های ناپیوسته

جریان سیال در شکاف‌های سنگی منفرد به‌وسیله معادلات نایر-استوکس کنترل می‌شود. در واقع فرم کلی معادلات آن می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود [۱۴].

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = F - \frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{u}{\rho} \nabla^2 u \quad (1)$$

که در آن $u = (u_x, u_y, u_z)$ بردار سرعت، F بردار نیروی حجمی در واحد جرم، P دانسیته، μ ویسکوزیته و فشار سیال می‌باشد. معادلات نایر-استوکس در بردارنده اصول بقاء مومنتوم خطی همراه با یک رابطه ساختاری خطی بین تانسور تنش با نرخ تغییر شکل می‌باشند. در سمت چپ رابطه ۱، قسمت اول بیانگر شتاب ذرات سیال و قسمت دوم نمایانگر شتاب افقی (شتابی) که ذرات ممکن است حتی در حوضه جریان حالت پایا به موجب حرکت از یک مکان به مکان دیگر با سرعت متفاوت داشته باشند) می‌باشد. همچنین جملات سمت راست معادله مذکور به‌ترتیب بیانگر نیروی حجمی به‌کار رفته، گرادیان فشار و نیروهای ویسکوزیته می‌باشند. در حالت جریان پایا، معادلات نایر-استوکس می‌تواند به‌صورت زیر خلاصه شود.

$$u \nabla^2 u - \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla p \quad (2)$$

معادله ۲ برای سه مولفه مجهول سرعت و یک مولفه فشار سه معادله را ارائه می‌نماید. معادله چهارم براساس اصل بقای جرم فراهم می‌شود که برای سیالات تراکم‌ناپذیر معادله پایستگی حجم است و به فرم زیر بیان می‌شود.

$$\text{div} u = \nabla u = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (3)$$

ساده‌ترین مدل مفهومی از یک شکستگی برای اهداف هیدرولوژیکی، این است که از دو صفحه صاف، موازی و دارای بازشدگی یکنواخت h استفاده شود.

جولی و همکاران یک شبکه شکاف‌دار سه بعدی DFN را برای آزمایش یک چاه برای دو حالت:

۱- تاثیر شکاف‌های بحرانی تحت تنش^۱ (نسبت تنش برشی به عمودی شکاف بزرگ‌تر از ۰/۶ باشد) بر جریان هیدروکربن‌ها در مخازن شکاف‌دار و
۲- تاثیر تنش نرمال بر قابلیت گذردهی سیال مدل‌سازی کردند. در مدل‌سازی آنها حساسیت جریان نسبت به تنش برای هر دو حالت مذکور در شبکه شکاف‌داری بررسی شده است [۱۰].

قبادی و همکاران با روش عددی المان مجزاء یک کد عددی توسط نرم‌افزار UDEC^۲ برای بررسی کوپل هیدرومکانیکی درزه‌های منفرد تحت برش با مدل درزه‌داری بارتن-باندیس توسعه دادند و نشان دادند که متناسب با افزایش جابه‌جایی برشی، مقدار بازشدگی هیدرولیکی درزه‌ها و نرخ جریان در آنها افزایش می‌یابد [۱۱]. تائو و همکاران با استفاده از روش کوپل کامل پروالاستیک ناپیوستگی-جابه‌جایی^۳ یک مخزن با دو دسته شکاف ۶۰ و ۱۲۰° را در دو حالت تنش‌های همسانگرد و ناهمسانگرد طی زمان بررسی نمودند، حالت تنش ناهمسانگرد طوری انتخاب شده است که شکاف‌ها در حالت بحرانی قرار گیرند. آنها نتیجه گرفتند که شکاف‌ها در حالت تنش همسانگرد در طی تولید مخزن فقط تحت تنش نرمال قرار دارند و نفوذپذیری آنها با زمان دچار کاهش خواهد شد ولی نفوذپذیری شکاف‌های قرار گرفته در حالت تنش ناهمسانگرد با افزایش زمان دچار افزایش می‌شود [۱۲ و ۱۳].

بیشتر پژوهش‌های موجود در مورد نفوذپذیری وابسته به تنش در محیط‌های پیوسته انجام شده است و برای محیط‌های شکاف‌دار پژوهش‌های اندکی در این زمینه انجام گرفته است. در این پژوهش ما تاثیر تنش برروی نفوذپذیری مخازن شکاف‌دار را به‌وسیله روش عددی المان مجزاء مورد بررسی قرار داده‌ایم.

1. Critically stressed fractures

2. Universal Distinct Element Code

3. Fully Coupled Displacement Discontinuity (DD) Method

روابط تجربی نفوذپذیری وابسته به تنش

هنگامی که از یک مخزن شکافدار تولید انجام می‌گیرد، فشار منفذی مخزن و بازشدگی شکافها دچار کاهش می‌شوند که در نهایت این عوامل باعث کاهش در نفوذپذیری شکافها می‌شوند. برای بررسی حساسیت تنش نسبت به نفوذپذیری در ادبیات موضوع روابط متفاوتی توسط افراد مختلف ارائه گردیده است. در جدول ۱ تعدادی از روابط تجربی ارائه شده توسط محققان مختلف برای وابستگی نفوذپذیری نسبت به تنش ارائه شده است. چنانچه کاهش تولید ایجاد شده در اثر حساسیت تنش را ضریب پوسته بنامیم. در حالت جریان پایا (به شرط ثابت بودن دیگر پارامترها) اگر نرخ جریان را برای وضعیت‌های با در نظر گرفتن حساسیت تنش و بدون در نظر گرفتن حساسیت تنش محاسبه کنیم. دال بر این که نرخ جریان برای شرایط ایده‌آل q_{id} و برای شرایط حساس به تنش به صورت q باشد، ضریب پوسته (s) به وسیله رابطه (۸) محاسبه می‌شود [۳۰]:

$$\frac{q}{q_{id}} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + s} \quad (8)$$

رابطه ۸ ضریب پوسته را به عنوان تابعی از شرایط عملیاتی و خواص مکانیکی محیط معرفی می‌کند. بنابراین این روش به ما اجازه خواهد داد که کاهش تولید در طی زمان را پیش‌بینی کنیم و تاثیر این پدیده را در شبیه‌سازی مخازن به کار ببریم.

مدل‌سازی عددی

امروزه روش‌های عددی مختلفی برای تحلیل جریان سیال در محیط‌های ژئومکانیکی مختلف اعم از محیط‌های متخلخل و شکافدار توسعه داده شده است. یکی از روش‌ها، روش عددی المان مجزا در قالب نرم‌افزار UDEC برای تحلیل محیط‌های ناپیوسته می‌باشد.

برای این هندسه، معادلات ناویر-استوکس را می‌توان به منظور دست‌یابی به پروفایل سرعت که بین دو دیواره سهمی شکل می‌باشد، به‌طور دقیق حل نمود. اگر محور x در جهت گرادیان فشار باشد، محور y شامل عمود بر گرادیان فشار در داخل صفحه شکستگی است و محور z عمود بر صفحه شکست می‌باشد که دیواره شکاف در $z = \pm h/2$ قرار داده شده است. در داخل یک شکاف و در مرز بین سیال عبوری و سنگ بکر سرعت سیال با سرعت سنگ بکر برابر می‌باشد، از آنجایی که سنگ دارای سرعت صفر می‌باشد، لذا مولفه‌های سرعت نرمال (u_z) و سرعت مماسی (u_y) قابل چشم‌پوشی هستند و می‌توان آنها را نادیده گرفت. راه حل زیر روشی برای حل معادلات (۱ و ۲) است [۱۴].

$$u_x = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left[\left(\frac{h}{2}\right)^2 - z^2 \right], u_y = 0, u_z = 0 \quad (4)$$

با استفاده از قانون داریسی شار حجمی کلی (m^3/s) از طریق یک سطح مقطع عرضی توده سنگ، برابر با حاصل ضرب سرعت سیال در مساحت مقطع عبوری سیال می‌باشد. با در نظر گرفتن عرض واحد ($y=1$) در جهت عمود بر شکاف، و این که جریان در محیط فقط از طریق شکافها صورت می‌گیرد، رابطه داریسی به صورت زیر ساده‌سازی می‌شود.

$$Q = V \cdot A \quad A = w \cdot y \quad y=1 \rightarrow Q = V \cdot w \quad (5)$$

$$Q_x = W \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} u_x dz = -\frac{w}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[\left(\frac{h}{2}\right)^2 - z^2 \right] dz = -\frac{wh^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (6)$$

در تحلیل‌های جریان سیال رابطه ۶ قانون مکعبی نامیده می‌شود، نتیجه به دست آمده از قانون مکعبی برای شکاف‌های با دیواره یکنواخت صادق می‌باشد. w پهنای شکاف در جهت y (عمود بر گرادیان فشار) می‌باشد. همچنین برای یک شبکه شکاف‌داری با تعداد n شکاف موازی مقدار نرخ جریان از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$Q_x = n \frac{wh^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (7)$$

جدول ۱ روابط تجربی مرتبط با تاثیر تنش بر نفوذپذیری.

منبع	رابطه به دست آمده	توضیحات
[۱۵]	$k_f = k_{fi} e^{-3(C_f) (p_i - \bar{p})}$	k_{fi} نفوذپذیری شکاف در فشار اولیه مخزن، و k_f نفوذپذیری شکاف در فشار متوسط فعلی مخزن، (C_f) ضریب تراکم‌پذیری شکاف
[۱۶]	$a = a_{inf} + (a_0 - a_{inf}) e^{\frac{-4.6052k_n d}{\sigma_{cc}}}$	a_0 و a_{inf} به ترتیب بازشدگی اولیه و باقی مانده شکاف، k_n سختی نرمال شکاف، σ_{cc} تنش فشاری عمل کننده بر روی سطح شکاف
[۱۷]	$C_{ef} = \frac{1 - (k_f / k_{fi})^{1/3}}{\Delta P}$	k_{fi} نفوذپذیری شکاف در فشار اولیه مخزن و k_f نفوذپذیری شکاف در فشار متوسط فعلی مخزن، ΔP اختلاف فشار مخزن، C_{ef} ضریب تراکم‌پذیری شکاف.
[۱۸]	$k^n = k_0 + k_n \frac{e^2}{s} (\sigma - \sigma_0)$	k_0 نفوذپذیری اولیه ناپیوستگی در تنش نرمال اولیه (σ_0) و s فاصله داری ناپیوستگی‌ها
[۱۹]	$T_f = \beta \sigma_n^{-\alpha}$	T_f قابلیت گذردهی ناپیوستگی، σ_n تنش نرمال. β ($\frac{m^2}{s}$) برابر مقدار T_f ($\frac{m^2}{s}$) در تنش نرمال معادل یک mPa است. مقادیر α و β با سیکل‌های بارگذاری متوالی و همچنین با افزایش اندازه نمونه کاهش می‌یابند.
[۲۰]	$k^n = (G \log \sigma_c + H)$	G و H ثابت‌های رابطه. $0.3 < n < 0.5$
[۲۱]	$\sqrt{\frac{k}{k_0}} = C - M \ln \sigma_n$	مدل نیم شکاف اصلاح شده ^۱ ، از نتایج آزمایش‌ها بر روی شکاف‌های اسلیت به دست آمده است. C و M ثابت‌های رابطه و σ_n تنش نرمال است.
[۲۲]	$k_f = \beta \sigma_n^{-\alpha}$	برای شکستگی‌های طبیعی یا القایی در گرانیته گنایسی به دست آمده است، k_f هدایت هیدرولیکی ناپیوستگی، β برابر مقدار k_f ($\frac{m}{s}$) در تنش نرمال معادل یک mPa است.
[۲۳]	$k = \frac{e_0^2 (1 - \frac{v}{v_0})^2}{12}$	e_0 بازشدگی هیدرولیکی در تنش صفر، v_0 بر بست شکاف وقتی بازشدگی هیدرولیکی صفر می‌شود و v تغییر شکل قائم شکاف می‌باشد.
[۲۴]	$K = K_0 [1 - 2(\frac{h}{a_0} \ln \frac{\sigma}{\sigma_0})^{0.5}]^3 [\frac{1-b(\sigma-u_w)}{1+b(\sigma-u_w)}]$ $b = [\frac{3\pi f}{E(1-\nu^2)h}]^{0.5}$	K_0 نفوذپذیری شکاف در فشار مرجع (σ_0) ، h مقدار میانگین ریشه دوم توزیع ارتفاعی سطح ناپیوستگی، a_0 نصف میزان بازشدگی در فشار مرجع (σ_0) ، u_w فشار منفذی سیال، f فاصله همبستگی، E مدول الاستیسیته سنگ و ν نسبت پواسون.

ادامه جدول ۱

منبع	رابطه به دست آمده	توضیحات
[۲۵]	$K(\sigma_0') = k_0 \left[1 - \left(\frac{\sigma_0'}{\sigma_M} \right)^m \right]^3$	مدل دندانهای ^۱ ، بنام بستری از میخها ^۲ معروف است. در ماسه سنگ شکسته به دست آمده است. σ_M مدول موثر دندانها در ناپیوستگی بوده و مقدار آن ۰/۱ تا ۰/۱ مدول بالک مواد دندانهاست. m ثابتی است که تابع توزیع ارتفاعی دندانها را مشخص می کند. ($\sigma_0' = \sigma_{pmp1}$)، تنش نرمال موثر و k هدایت هیدرولیکی در فشار صفر است.
[۲۶]	$K = k_0 e^{-\sigma}$	σ فشار موثر و k_0 میزان نفوذپذیری در فشار موثر صفر می باشد.
[۲۷]	$k = C_0 \left[\log \left(\frac{\sigma_{ch}}{\sigma_c} \right) \right]^3$	از نتایج آزمایشی بر روی سنگهای کربناته بدست آمده است. σ_{ch} فشار محصورشدگی در زمانی که مقدار نفوذپذیری صفر باشد و C_0 مقدار ثابتی که بستگی به سطح ناپیوستگی و بازشدگی اولیه دارد.
[۲۸]	$\sigma_c^{-m} K = A + B$	σ_c تنش محصورشدگی، A و m ثابتهای رابطه
[۲۹]	$K = A \sigma^{-m} (\sigma > \sigma_{threshold})$	A و m ثابتهای رابطه و σ فشار موثر

لبه به لبه (شبهه سازی می شود و جریان در اثر اختلاف فشار بین نواحی مجاور ایجاد می شود. در این روش نرخ جریان از یک ناحیه با فشار UDEC به یک ناحیه با فشار UDEC و با استفاده از رابطه ۹ محاسبه می شود [۳۱].

$$q = -K_f a^3 \frac{\Delta p}{L} \quad (9)$$

در این رابطه، K_f ضریب نفوذپذیری شکاف است که به طور نظری برابر 1.12μ می باشد (μ ویسکوزیته دینامیکی سیال می باشد)، a بازشدگی هیدرولیکی تماس، Δp اختلاف فشار و L طول تماس است که به صورت نصف فاصله به نزدیک ترین تماس در سمت راست به علاوه نصف فاصله به نزدیک ترین تماس در سمت چپ تعریف می شود.

هندسه مدل و شرایط مرزی

هنگامی که از یک مخزن شکاف دار تولید صورت می گیرد، فشار منفذی مخزن و بازشدگی شکافها دچار تغییراتی می شوند که در نهایت این عوامل باعث تغییراتی در نفوذپذیری شکافها می شوند.

در این روش مجموعه ای از بلوکهای سنگی که با شکافها محدود شده اند، تشکیل می شود و امکان شبهه سازی روابط پیچیده برای برش، جدایش و چرخش بلوکها را فراهم می آورد. محاسبات براساس قانون دوم حرکت نیوتون، بقای جرم و اصول مومنتم و انرژی بنا نهاده شده است. بلوکها می توانند صلب و یا تغییر شکل پذیر باشند. از نظر هیدرولیکی بلوکها نفوذ ناپذیرند و جریان فقط از درون شکافها عبور می کند [۳۱].

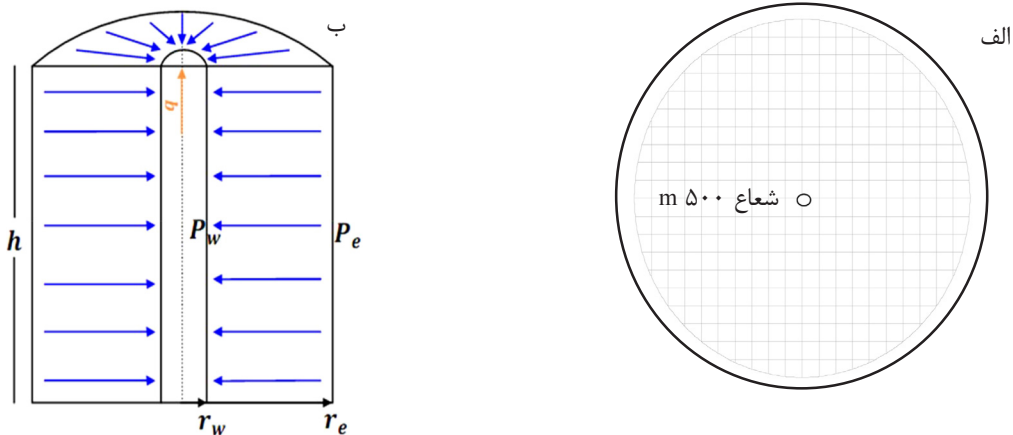
در این تحقیق از روش عددی المان مجزا در قالب برنامه UDEC برای شبهه سازی جریان استفاده شده است. این نرم افزار مجهز به یک زبان برنامه نویسی تعبیه شده (Fish) می باشد که قابلیت های گسترده ای را برای کاربران فراهم می نماید. همچنین نرم افزار قابلیت تحلیل کوپل کامل هیدرومکانیکی را دارا می باشد که در آن هدایت هیدرولیکی شکستگی به تغییر شکل مکانیکی وابسته است و برعکس فشار آب حفره ای شکاف رفتار مکانیکی شکاف را تحت تاثیر قرار می دهد. در نرم افزار UDEC شکاف به صورت دو صفحه موازی با بازشدگی ثابت (تماس

1. Asperity Model
2. Bed of Nails

بحث و بررسی

برای مخازن حساس به تنش در مرحله ارزیابی لازم است که ابتدا نوع سنگ‌ها در داخل محدوده مخزن شناسایی شوند و سپس نرخ دقیق کاهش نفوذپذیری با افزایش تنش برای هر نوع سنگ تعیین شود. این امر اجازه خواهد داد که نفوذپذیری در مراحل مختلف توسعه یک مخزن به‌خوبی پیش‌بینی شود. در واقع چنانچه مسئله نفوذپذیری وابسته به تنش و افت فشار به خوبی شناخته شود، ارتباط دقیق بین میزان تولید و فشار ته‌چاه قابل پیش‌بینی است. همچنین داشتن دانشی از نفوذپذیری در مقادیر مختلف تنش‌های برجا به‌عنوان راه‌کاری برای تعیین میزان آسیب وارده به تشکیلات ناشی از افت سریع فشار در دیواره و نزدیک چاه می‌باشد.

برای این که رابطه‌ای را بین نفوذپذیری حساس به تنش و میزان تولید چاه‌های نفتی پیدا کنیم، لازم است که نرخ جریان نفت را تحت شرایط مختلف همانند فشارهای ته‌چاه مختلف، فشارهای مختلف مخزن و ضرایب حساسیت مختلف نفوذپذیری نسبت به تنش محاسبه کنیم. بدین منظور همانند شکل ۱ مخزنی به شعاع $(r_e) 500\text{ m}$ برای تحلیل انتخاب شد و یک چاه به شعاع $(r_w) 10\text{ m}$ سانتی‌متر در داخل آن در نظر گرفته شد. در این مخزن فاصله شکستگی‌ها 50 m (چگالی شکستگی‌ها (0.04 m^{-1})) انتخاب گردید. سایر پارامترهای انتخاب شده برای تحلیل نیز در جدول ۲ ارائه شده‌اند. جریان سیال وارده به چاه به‌صورت شعاعی فرض شده است و برای شکاف‌ها در تمامی جهات نفوذپذیری ثابتی در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ شماتیک جریان شعاعی چاه تولیدی، الف) هندسه مدل ب) شرایط مرزی.

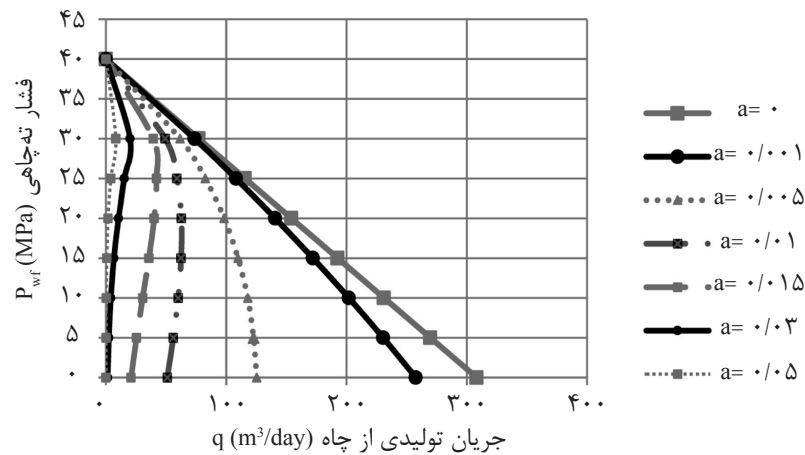
جدول ۲ پارامترهای انتخابی جهت تحلیل.

مقدار	پارامتر
۴۰	فشار اولیه P_i (MPa)
۴۰	فشار مرزی P_e (MPa)
1×10^{-4}	بازشدگی اولیه شکاف‌ها (m)
۰/۶	ویسکوزیته سیال μ (MPa.s)
۰/۰۴	تعداد شکستگی‌ها در واحد متر (m^{-1})
۲۰	ضخامت سازند h (m)
۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰	فشار جریانی ته‌چاه P_{wp} (MPa)
۰، ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۱۵، ۰/۰۳ و ۰/۰۵	ضرایب تراکم‌پذیری شکاف‌ها α (MPa^{-1})

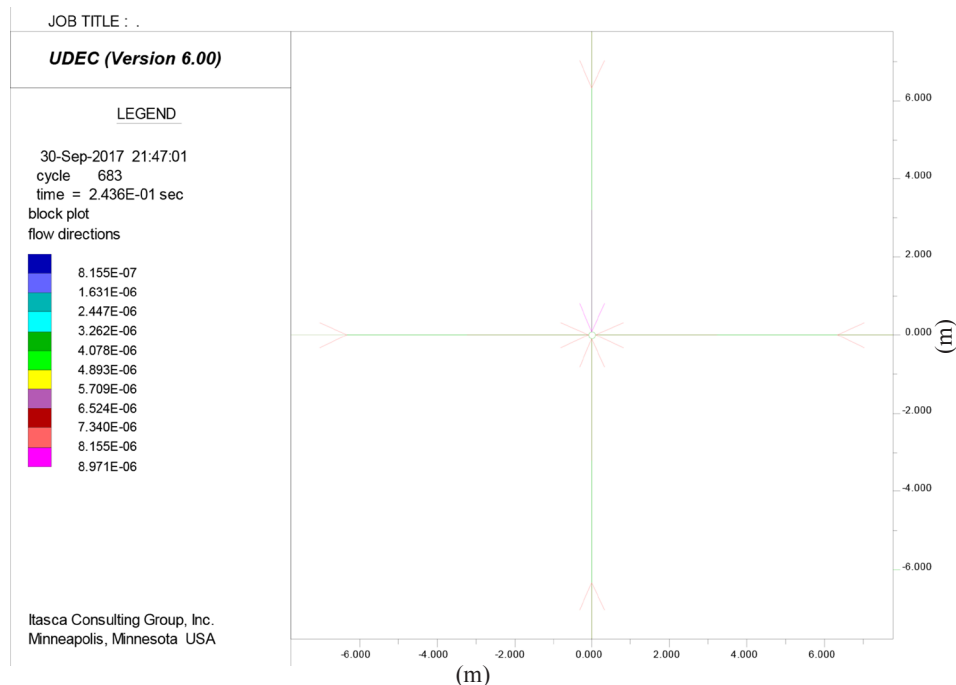
بحرانی ما شاهد کاهش نرخ جریان ورودی به چاه هستیم. در ضرایب حساسیت بالا (۰/۰۳ و ۰/۰۵) نرخ جریان ورودی به شدت دچار افت می‌شود و فشارهای جریانی ته چاه کمتر از ۳۰ MPa جواب‌گویی تولید نخواهند بود. با توجه به شکل ۲ می‌توان فهمید هرچه مقدار ضریب تراکم‌پذیری شکاف افزایش پیدا می‌کند، تاثیر حساسیت تنش بر روی نرخ جریان مشهودتر می‌شود، یعنی نرخ کاهش تولید بزرگ‌تر می‌شود. در یک مقدار مشخص α مقدار کاهش نرخ تولید در مقادیر بالای فشار ته چاه کمتر از مقادیر فشار ته چاه پایین می‌باشد، یعنی افت فشار مخزن می‌تواند دارای تاثیر بالایی بر روی نرخ تولید باشد. همچنین وقتی که ضریب تراکم‌پذیری بالا می‌رود، فشارهای ته چاه پایین نمی‌تواند نرخ جریان را بالا ببرد، در این موارد حتی باعث کاهش نرخ تولید می‌شود، این مورد نشان‌گر آنست که ضریب حساسیت بالا می‌تواند تاثیرات عمده‌ای بر روی نرخ جریان بگذارد. نتیجه کلی که می‌توان از شکل ۲ استنتاج کرد این است که در مخازن با حساسیت بالای نفوذپذیری نسبت به تنش، برای حفظ نرخ تولید بالا از مخزن لازم است که فشار مخزن در مقدار بالایی نگه داشته شود تا با این روش بتوان تا حدودی تاثیر منفی حساسیت نفوذپذیری مخزن را نسبت به تنش بر روی تولید جبران کرد. در فشارهای ته چاهی کمتر از فشار اولیه مخزن سیال به سمت چاه جریان پیدا می‌کند. شکل ۳ شماتیک نرخ جریان ورودی به داخل چاه را نشان می‌دهد، نرخ جریان کلی از مجموع جریان‌های موجود در تمامی شکاف‌های متقاطع با چاه محاسبه می‌شود. نتایج نرخ جریان ورودی به چاه برای ضریب حساسیت شکاف ۰/۰۱ در فشارهای ته چاهی مختلف در جدول (۳) ارائه شده است. در این میزان ضریب حساسیت برخلاف انتظار با کاهش فشار ته چاه شاهد افزایش نرخ جریان ورودی به داخل چاه نیستیم.

سرانجام در مرحله مدیریت کلی مخزن، شرایط تولید در یک چاه می‌تواند بر فشار بین محدوده چاه‌ها تاثیرگذار باشد. بنابراین باید داده‌های تنش-نفوذپذیری هر یک از چاه‌ها به یک مدل مخزنی یکپارچه در محدوده گسترده تبدیل شود. نقشه‌های واحد جریان باید در یک حوزه گسترده‌ای که شامل انواع سنگ، نفوذپذیری مرتبط با آن‌ها و مقدار تنش‌های برجا می‌باشد، ساخته شوند. شبیه‌سازی مخازن حساس به تنش اطلاعات مهمی را در مورد توازن بین موضوع اقتصادی بودن مخزن و فلسفه مدیریت آن به‌ویژه در رابطه با مسائلی مانند میزان تولید، میزان ذخیره و بازگشت سرمایه ارائه خواهد داد. در مخازن با وابستگی قابل توجه نفوذپذیری نسبت به تنش میزان تولید بالا ممکن است نتیجه عکس نشان دهد. در چنین مخازنی حساسیت نفوذپذیری نسبت به تنش باید به‌عنوان یک مولفه ضروری در مدل‌سازی برای افزایش دقت در برآورد ذخیره و به منظور بهبود روش‌های مدیریت مخزن در نظر گرفته شود.

در این تحقیق مدل‌سازی نفوذپذیری وابسته به تنش با استفاده از روش عددی المان مجزا انجام شده است. در کل ۶۰ مدل متفاوت تحت شرایط مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. برای بررسی وابستگی نفوذپذیری نسبت به تنش نمودارهای نرخ جریان ورودی به چاه شکل ۲، ضریب پوسته برحسب اختلاف فشار مخزن، نسبت نفوذپذیری برحسب ضریب پوسته و کاهش فشار مخزن برحسب فشارهای ته‌چاه مختلف رسم شده است. با توجه به شکل (۲) مشاهده می‌شود که در مخازن با ضرایب حساسیت پایین (۰ و ۰/۰۰۱ MPa) با کاهش فشار ته چاه نسبت به فشار مخزن می‌توان به نرخ‌های تولید بالاتر دست یافت. ولی در مخازن با ضریب حساسیت بالا تا یک حد بحرانی کاهش فشار ته چاه منجر به افزایش نرخ جریان ورودی به آن خواهد شد و بعد از آن مقدار



شکل ۲ تاثیر مقادیر مختلف ضریب حساسیت بر روی میزان تولید چاه.



شکل ۳ نرخ جریان ورودی به داخل چاه، ابعاد محدوده اطراف چاه برحسب متر نشان داده شده است.

جدول ۳ حداکثر نرخ جریان در فشارهای ته چاهی مختلف.

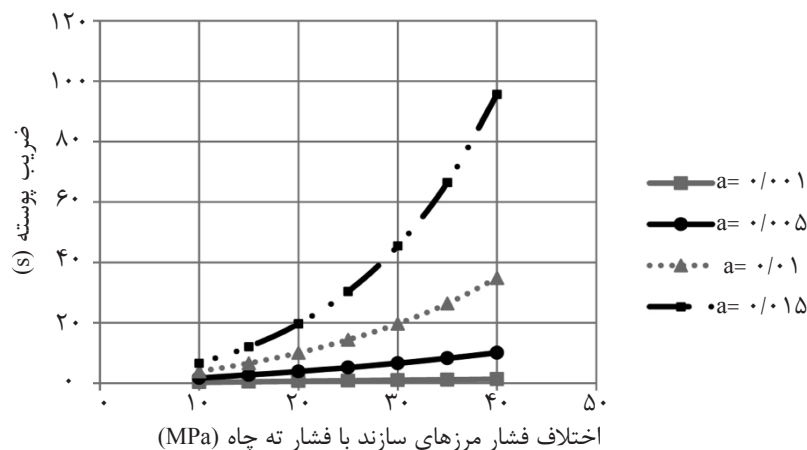
۳۰	۲۰	۱۰	۰	فشار ته چاه (MPa)
$7/113 \times 10^{-6}$	$9/069 \times 10^{-6}$	$8/682 \times 10^{-6}$	$7/376 \times 10^{-6}$	نرخ جریان حداکثر (m^3/s)

فشار، سنگ‌های مخازن در معرض تغییر شکل‌های الاستیک-پلاستیک قرار می‌گیرد. هرچه شکاف‌ها ضریب حساسیت بالاتری داشته باشند، زودتر تغییر شکل‌های پلاستیک در سنگ شروع می‌شود. این فرآیند باعث خواهد شد که آسیب‌های سازندی بیشتر شود.

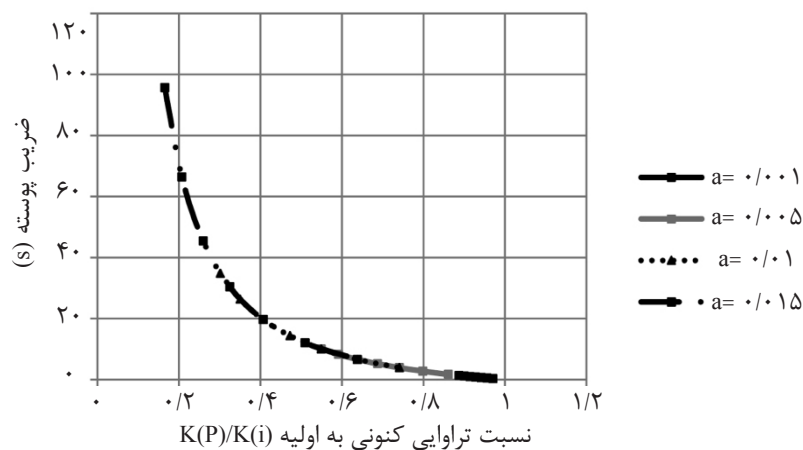
در واقع در این مقدار ضریب حساسیت با کاهش فشار ته چاه تا حدود ۳۰ MPa نرخ جریان ورودی به داخل چاه دچار افزایش می‌شود تا به یک مقدار حداکثر می‌رسد و بعد از این مقدار حداکثر نرخ جریان با شیب ملایمی کاهش پیدا می‌کند تا به مقدار $51 m^3/day$ می‌رسد. در طی فرآیند تولید نفت از مخازن حساس به تنش علاوه بر کاهش

افزایش دهد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌های عددی، ضریب پوسته دارای یک رابطه‌ی نمایی با نسبت نفوذپذیری از مقدار ۱ تا ۰/۶ ضریب پوسته دارای مقدار پایینی است و بعد از مقدار ۰/۶ نمودار ضریب پوسته یک شیب تند پیدا خواهد کرد و مقادیرش به شدت بالا خواهد رفت (شکل ۵). برای فشارهای ته‌چاهی کمتر از فشار اولیه مخزن، یک محدوده کاهش فشار به صورت شعاعی در اطراف چاه ایجاد می‌شود. اشکال (۶-۱۰) توزیع فشار منفذی اطراف چاه را در فشارهای ته‌چاهی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که با توجه به این اشکال پیداست، با افزایش فشار ته‌چاهی، شعاع کاهش فشار منفذی ایجاد شده در اطراف چاه کاهش پیدا خواهد کرد.

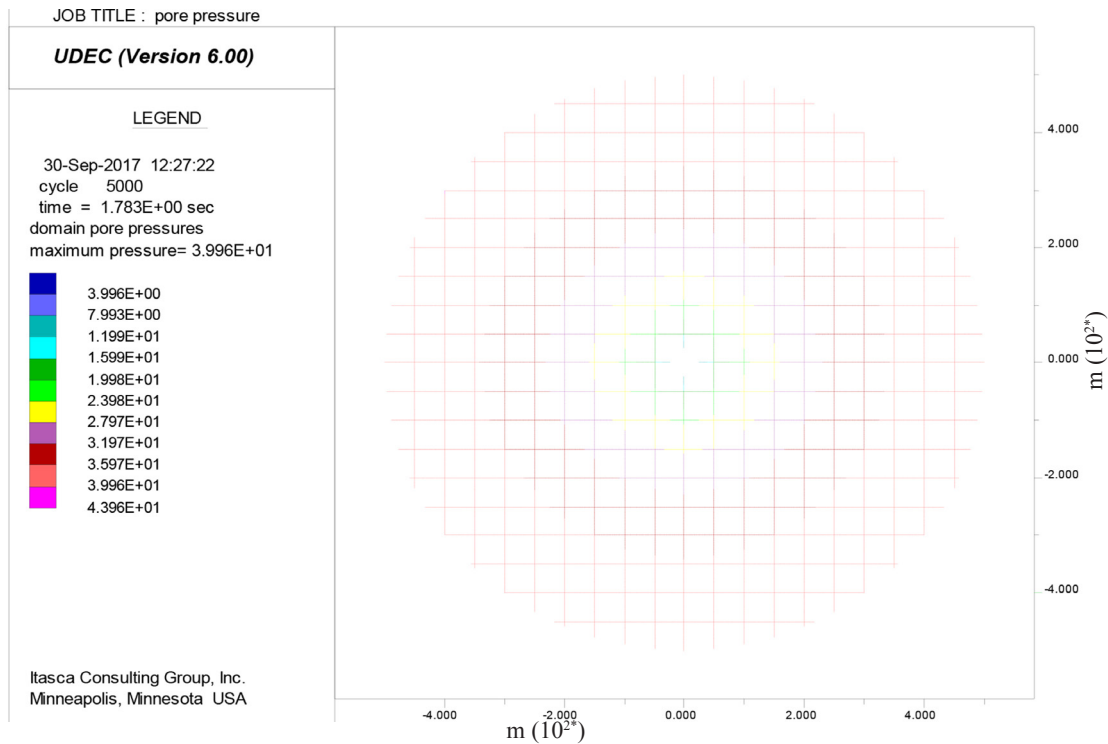
با افزایش ضریب حساسیت، اختلاف بین نرخ جریان حالت ایده‌آل و حساس به تنش بیشتر خواهد شد و در نتیجه ضریب پوسته و آسیب وارده به سازند بیشتر می‌شود (شکل ۴). در این پژوهش برای ضرایب حساسیت بالاتر از ۰/۱۵، ضرایب پوسته بسیار بالایی حاصل خواهد شد و مخزن به شدت دچار آسیب می‌شود. هنگامی که شرایط تنش‌های برج‌ها همسانگرد باشد، نفوذپذیری شکاف‌ها در طی فرآیند تولید به دلیل افزایش تنش نرمال دچار کاهش می‌شود. کاهش نفوذپذیری شکاف‌ها در طی فرآیند تولید وابسته به پارامترهای زیادی همانند میزان تنش‌های برج‌های اولیه، نرخ برداشت از مخزن، ضریب تراکم‌پذیری شکاف‌ها و ... است. کاهش نفوذپذیری مخزن می‌تواند آسیب‌های سازندی را



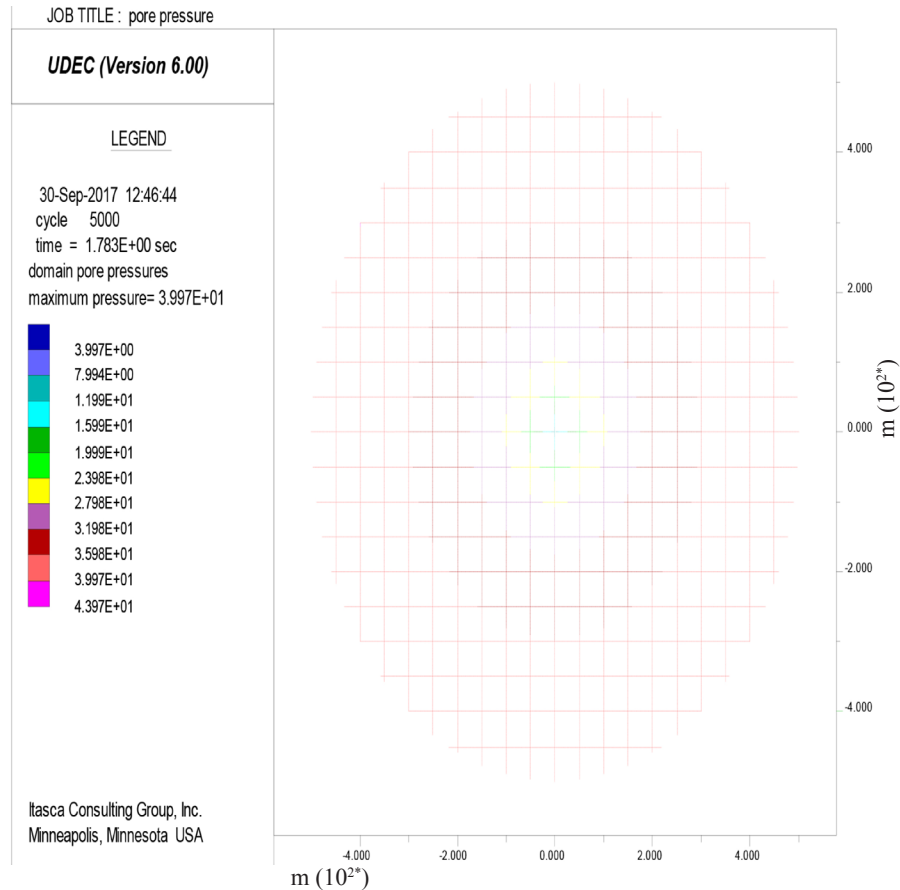
شکل ۴ تاثیر ضریب حساسیت بر روی ضریب پوسته در فشارهای ته چاهی مختلف.



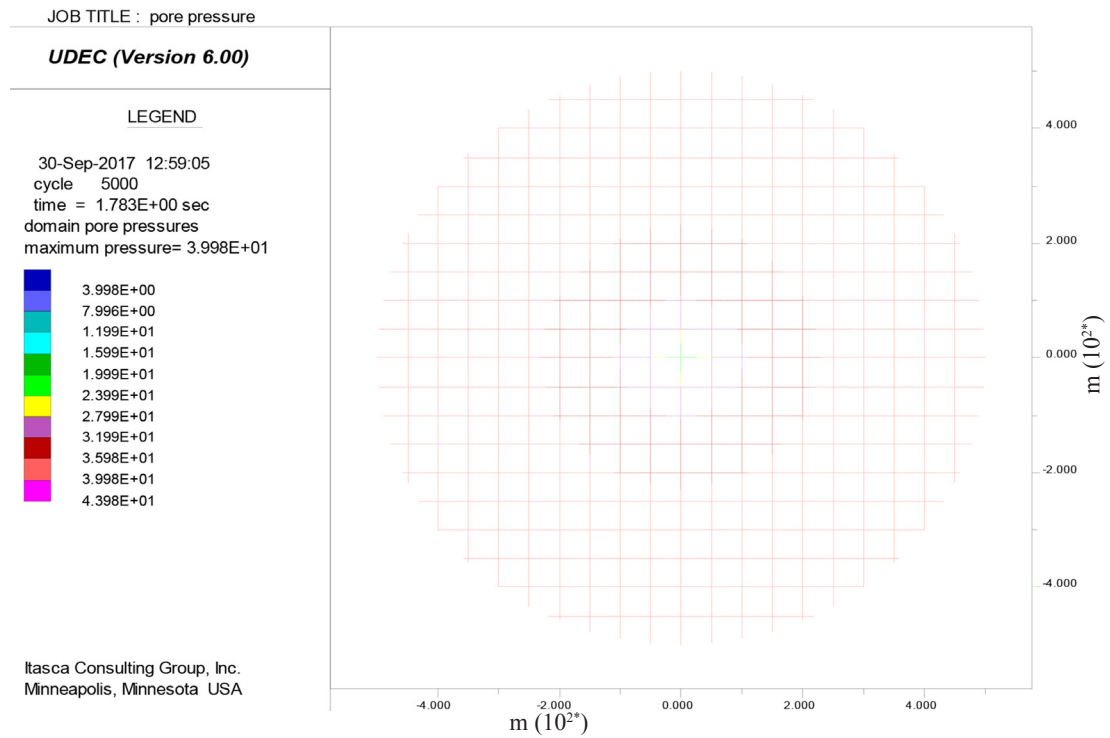
شکل ۵ تاثیر کاهش نفوذپذیری بر روی ضریب پوسته.



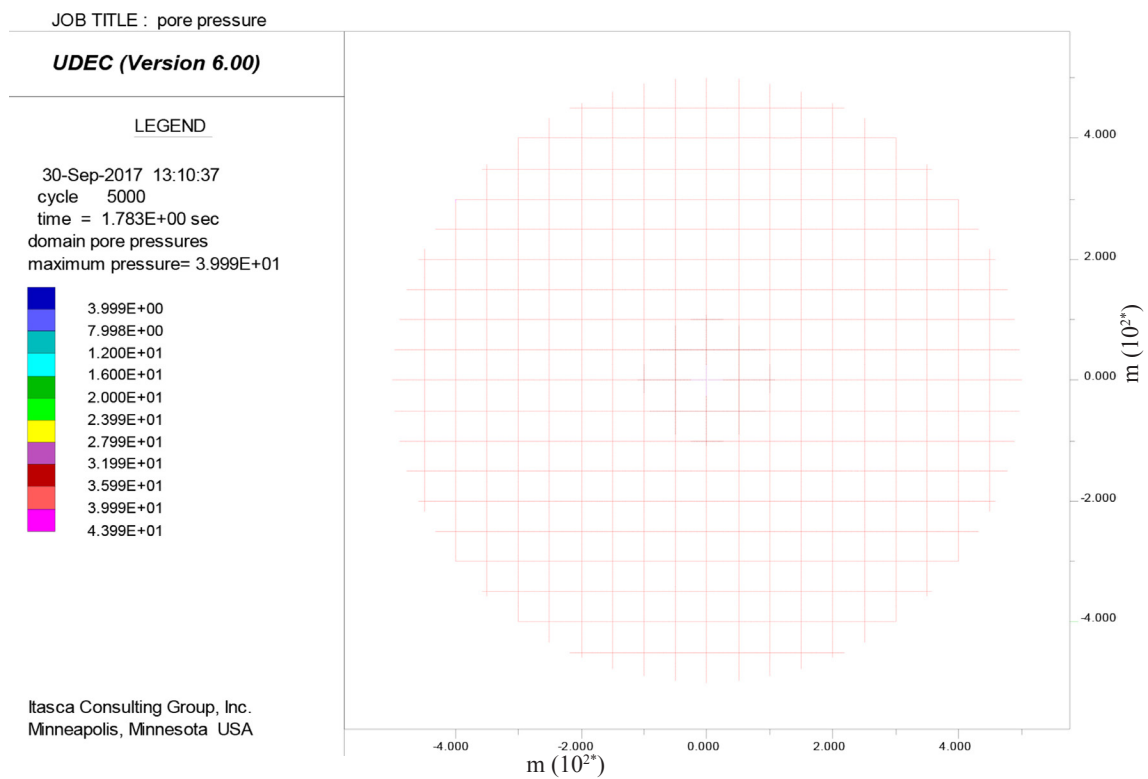
شکل ۶ توزیع فشار منفذی اطراف چاه در فشار ته چاه صفر (a= ۰/۰۱)، ابعاد محدوده اطراف چاه برحسب متر نشان داده شده است.



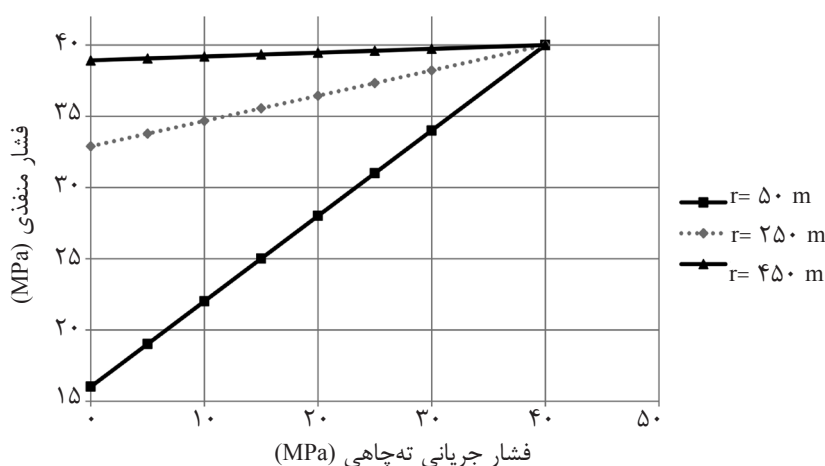
شکل ۷ توزیع فشار منفذی اطراف چاه در فشار ته چاه ۱۰ MPa (a= ۰/۰۱)، ابعاد محدوده اطراف چاه برحسب متر نشان داده شده است.



شکل ۸ توزیع فشار منفذی اطراف چاه در فشار ته چاه ۲۰ MPa ($a=0.1$)، ابعاد محدوده اطراف چاه برحسب متر نشان داده شده است.



شکل ۹ توزیع فشار منفذی اطراف چاه در فشار ته چاه ۳۰ MPa ($a=0.1$)، ابعاد محدوده اطراف چاه برحسب متر نشان داده شده است.



شکل ۱۰ کاهش فشار منفذی برحسب فشارهای جریانیه ته‌چاهی مختلف برای شعاع‌های مختلف.

نتایج به‌دست آمده به شرح ذیل می‌باشد:

۱- در مخازن بدون حساسیت و یا حساسیت با ضریب پائین، کاهش فشار ته‌چاه باعث افزایش نرخ جریان ورودی به چاه می‌شود و نرخ جریان دارای یک رابطه خطی با فشار ته‌چاه می‌باشد.

۲- در مخازن با حساسیت بالای نفوذپذیری نسبت به تنش تا یک مقدار بحرانی کاهش فشار ته‌چاه دارای یک رابطه خطی با نرخ جریان ورودی به داخل چاه می‌باشد. بعد از این مقدار بحرانی کاهش فشار ته‌چاه دارای یک رابطه سهمی شکل با نرخ جریان ورودی به داخل چاه می‌باشد. به‌طوری که در ضرایب حساسیت بالا (۰/۰۳ و ۰/۰۵) نرخ جریان به شدت دچار افت می‌شود و فشارهای جریانیه ته‌چاه کمتر از ۳۰ MPa جواب‌گوی تولید نخواهد بود. ۳- با افزایش ضریب حساسیت، ضریب پوسته مخزن بالا خواهد رفت، به‌طوری که مخزن در حالتی که دارای ضرایب حساسیت ۰/۰۳ و ۰/۰۵ باشد، آسیب وارده به مخزن به شدت بالا خواهد رفت.

۴- ضریب پوسته دارای یک رابطه نمایی با نسبت نفوذپذیری می‌باشد. با کاهش نسبت نفوذپذیری از ۱ تا مقدار ۰/۶ ضریب پوسته دارای مقدار پائینی است و بعد از مقدار ۰/۶ نمودار ضریب پوسته یک شیب تند پیدا خواهد کرد و مقدارش به شدت بالا خواهد رفت.

به‌طور کلی مطابق با شکل ۱۰ با افزایش فاصله نسبت به مرکز چاه به‌صورت شعاعی افت فشار مخزن کمتر می‌شود که در نهایت در شعاع m مخزن ۵۰۰ همان فشار اولیه خود را دارا می‌باشد. مطابق با اشکال ۲ الی ۱۰ در طی فرآیند تولید نفت از مخازن حساس به تنش علاوه‌بر کاهش فشار مخزن، سنگ‌های مخازن در معرض تغییر شکل‌های الاستیک-پلاستیک قرار می‌گیرد. این موضوع به نوبه خود باعث تغییر نفوذپذیری مخزن (به‌دلیل حساسیت نفوذپذیری نسبت به تنش) می‌شود و مستقیماً برروی تولید نفت مخزن تاثیرگذار می‌باشد. به منظور بهبود ظرفیت تولید، یک روش عملی متداول این است که فشار ته‌چاه کاهش پیدا کند. در مخازن حساس به تنش، از آنجائی که کاهش فشار اطراف چاه منتج به یک مخروط بزرگ‌تر کاهش فشار در اطراف چاه می‌شود در نتیجه باعث یک تغییر شکل جدی در سنگ‌های مخزن می‌شود و ممکن است به‌جای حاصل شدن افزایش تولید، افت فشار بیش از حد چاه منجر به کاهش نفوذپذیری و کاهش تولید چاه شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل‌سازی عددی نفوذپذیری وابسته به تنش با استفاده از روش عددی المان مجزاء در قالب نرم‌افزار UDEC مورد بررسی قرار گرفت. اهم

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از اداره پژوهش و فناوری شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب به علت حمایت مالی از پژوهش حاضر تشکر و قدردانی می‌شود.

۵- کد عددی توسعه داده شده یک مقطع دو بعدی از یک مخزن با نفوذپذیری برابر در تمامی جهات است، بنابراین در کارهای آینده لازم است مدل‌سازی‌های سه بعدی، نفوذپذیری و رژیم‌های تنشی ناهمسانگرد نیز در نظر گرفته شود.

مراجع

- [1]. Fatt I. and Davis D. H., "Reduction in permeability with overburden pressure," J. Petroleum Transactions," AIME, Vol. 4, Issue 12, December 1952.
- [2]. Chen J. H., Kang Y. L., You L. J., and Fang J. W., "Review and prospect about study on stress-sensitivity of low-permeability reservoir," J. Natural Gas Geoscience, 2011.
- [3]. Davies J. P., and Davies D. K., "Stress-dependent permeability: characterization and modeling," In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, Jan. 1999.
- [4]. Haifeng Z., Jun S., Erfei M., Hang C. and Guohua L. "Scale model of stress sensitivity for fractured low-permeability reservoirs," Proceedings, Fortieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-204, January 26-28, 2015.
- [5]. Lei G., Dong P., Wu Z., Mo S., Gai S., Zhao C., and Liu Z. K., "A fractal model for the stress-dependent permeability and relative permeability in tight sandstones," Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 54(01), pp. 36-48, 2015.
- [6]. Ojagbohunmi and Hamoud, M. T., "Coupling of stress dependent relative permeability and reservoir simulation," Influence of Geomechanical Processes on Relative Permeability, Ph.D. Thesis, University of Alberta, 2012.
- [8]. Oldakowski k. "Stress induced permeability changes of Athabasca oil sands," M.Sc. Thesis, University of Alberta, Edmonton, Canada, 2009.
- [9]. Lei Q., Xiong W., Yuang J., Cui Y., and Wu Y. S., "Analysis of stress sensitivity and its influence on oil production from tight reservoirs," In Eastern Regional Meeting. Society of Petroleum Engineers, Jan. 2007.
- [10]. Jolly R. J. H., Wei L., and Pine R. J., "Stress-sensitive fracture-flow modelling in fractured reservoirs," In SPE International Petroleum Conference and Exhibition in Mexico. Society of Petroleum Engineers, Jan. 2000.
- [۱۱]. قبادی ب، نجاتی ح. ر. و گشتاسبی ک، "بررسی عددی رفتار هیدرومکانیکی درزه‌های سنگی منفرد تحت بارگذاری برش مستقیم،" روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۷ (۱۳)، ص ۴۴-۳۵، ۱۳۹۶.
- [12]. Tao Q., Ehlig-Economides C. A., and Ghassemi A., "Investigation of stress-dependent permeability in naturally fractured reservoirs using a fully Coupled poroelastic displacement discontinuity model," In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, Jan. 2000.
- [13]. Tao Q., Ehlig-Economides C. A. and Ghassemi, A., "Modeling variation of stress and permeability in naturally fractured reservoirs using displacement discontinuity method," In 43rd US Rock Mechanics Symposium & 4th US-Canada Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, Jan. 2000.
- [14]. Zimmerman R. W. and Bodvarsson G. S., "Hydraulic conductivity of rock fractures. Transport in porous media," Vol. 23, No. 1, pp. 1-30, 1996.

- [15]. Chacon A. "Effect of pressure depletion on hydrocarbon recovery in naturally fractured reservoirs," Total Edition Press, Paris, 1987.
- [16]. Wei L. and Hudson J. A., "DEM modelling of water flow in jointed rocks," 70th International Congress on Rock Mechanics, Aachen, Vol. 1, pp. 823-826, 1991.
- [17]. Saidi A. M., "Reservoir engineering of fractured reservoirs," Ph.D. Dissertation, The University of Oklahoma, Norman, OK, 2006.
- [18]. Snow D T., "Anisotropic permeability of fractured media," Water Resources Research, Vol. 5, No. 6, pp. 1273-1289, 1968.
- [19]. Raven K. G., and Gale J. E., "Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size," In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 22, No. 4, pp. 251-261, Pergamon, Aug. 1985.
- [20]. Brace W., Walsh J. B. and Frangos W. T., "Permeability of granite under high pressure," Journal of Geophysical research, Vol. 73, No. 6, pp.2225-2236, 1968.
- [21]. Swan G., "Determination of stiffness and other joint properties from roughness measurements," Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 19-38, 1983.
- [22]. Gale J. E., "The effects of fracture type (induced versus natural) on the stress-fracture closure-fracture permeability relationships," In The 23rd US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association, Jan. 1982.
- [23]. Detournay E., "Hydraulic conductivity of closed rock fracture: an experimental and analytical study," In Proceedings of the 13th Canadian Rock Mechanics Symposium, pp. 168-173, May 1980.
- [24]. Walsh J. B., Grosenbaugh M. A., "A new model for analyzing the effect of fractures on compressibility," Journal of Geophysical Research, Vol. 84, (B7): pp. 3532-3536, 1979.
- [25]. Gangi A. F., "Variation of whole and fractured porous rocks permeability with confining pressure," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 15, No. 5, pp. 249-354, 1978.
- [26]. Louis C. A., Dessenne J. L. and Feuga B., "Interaction between water flow phenomena and the mechanical behavior of soil or rock masses," In: Gudehus G, eds. Finite Elements in Geomechanics, New York: Wiley, pp. 479-511, 1977.
- [27]. Jones F. O., "A laboratory study of the effects of confining pressure on fracture flow and storage capacity in carbonate rocks," Journal of Petroleum Technology, Vol. 21, pp. 21-27, 1975.
- [28]. Nelson R. "Fracture permeability in porous reservoirs: Experimental and field approach, PhD. Thesis," Texas: Texas A&M University, 1975.
- [29]. Tiller F. M., "The role of porosity in filtration: Numerical methods for constant rate and constant pressure n. filtration based on Kozeny's law," Chemical Engineering Progress, Vol. 49, No. 9, pp. 467-479, 1953.
- [30]. Raghavan R., and Chin L. Y., "Productivity changes in reservoirs with stress-dependent permeability," In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, Jan. 2002,.
- [31]. Itasca U D EC., Universal Distinct Element Code. "Version 5.0.," 2011.
- [32]. Fatehi Marji M., and Arash P., "The effect of fracture orientation and coupled stress-fluid flow on permeability and productivity index of naturally fractured hydrocarbon reservoirs," In 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Associatio, Jan. 2011.