



مقاله پژوهشی

بررسی عددی تغییر میدان تنش‌های کل در مخازن نفت تحت اثر فرآیند استخراج، با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی برای سنگ مخزن

برزین شریفی^۱؛ علی پاک^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف تهران
۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف تهران

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۰۵ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2023.390795.1190

چکیده

در اثر برداشت از مخازن نفت و گاز زیرزمینی فشار منفذی در مخزن کاهش یافته و به تناسب آن تنش مؤثر افزایش می‌یابد. اگرچه تحکیم (*Consolidation*) تدریجی مخازن زیرزمینی و تراکم آن‌ها در اثر استخراج می‌تواند سبب بهبود روند تولید و تسهیل در خروج سیال هیدروکربوری در اثر رانش تراکمی (*Compaction Drive*) آن گردد، می‌تواند مشکلاتی را نیز به همراه داشته باشد. اندازه‌گیری‌های میدانی در دو دهه گذشته حاکی از آن است که علاوه بر تغییر تنش مؤثر در محدوده مخزن، میدان تنش‌های کل (*Total Stress Field*) نیز در داخل و اطراف مخزن می‌تواند تغییر کند. در اثر نشست که سقف مخزن به دلیل وقوع تحکیم متحمل می‌شود، از پایداری این ناحیه کاسته شده و با کاهش پایداری سقف مخزن در اثر تراکم، این ناحیه ظرفیت سابق را برای تحمل وزن روباره (*Over-burden*) نخواهد داشت. این پدیده موجب "بازتوزیع تنش" (*Stress Redistribution*) در داخل و اطراف مخزن می‌گردد. علت رخداد بازتوزیع تنش به پدیده "قوس‌زدگی تنش" (*Stress Arching*) نسبت داده می‌شود. از آنجا که توزیع تنش بر اساس سختی مصالح و نحوه اتکای پایدار لایه‌ها بر یکدیگر انجام می‌شود، با کاهش پایداری ناحیه سقف مخزن و تغییر نحوه اتکای مصالح در این محدوده، بخشی از باری که پیشتر توسط سقف مخزن تحمل می‌شد به نواحی پایدارتری نظیر جوانب مخزن (*Side-burden*) منتقل می‌گردد. هدف پژوهش حاضر، بررسی وقوع و چگونگی تغییر در تنش‌های کل افقی و قائم پیرامون مخازن نفت و گاز در اثر برداشت به وسیله شبیه‌سازی کاملاً همبسته هیدرومکانیکی (*HM*) می‌باشد. در این تحقیق، جهت شبیه‌سازی بهتر روند استخراج سیال از مخزن و به منظور لحاظ نمودن اثر عملیات تولید بر خصوصیات ژئومکانیکی سنگ مخزن در حال تخلیه (*Depleting Zone*) از مدل رفتاری الاستیک غیرخطی استفاده گردیده‌است. در بخش نخست این پژوهش، مقایسه‌ای میان مقدار تنش‌های کل در اطراف سه مخزن متفاوت از نظر پهنا، در دوره‌های زمانی مختلف تولید صورت گرفته‌است. در بخش دوم، اثر اختلاف میان سختی اولیه سنگ مخزن و سنگ پیرامون آن بر شدت اثر پدیده قوس‌زدگی تنش به وسیله در نظر گرفتن سه نسبت سختی متفاوت، مورد بررسی قرار گرفته‌است. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهند در مواردی که مخزن دارای وسعت جانبی محدود و یا سنگ مخزن دارای سختی اولیه کمتری در مقایسه با سنگ اطراف باشد، تغییرات در میدان تنش‌های کل قابل توجه بوده و لحاظ نمودن اثر آن در جنبه‌های مختلف تولید و توسعه میدان (*Field Development*) ضروری می‌باشد.

واژگان کلیدی

تغییر تنش‌های کل،
بازتوزیع تنش، قوس‌زدگی
تنش، شبیه‌سازی همبسته
هیدرومکانیکی، رفتار
الاستیک غیرخطی

۱. پیش‌گفتار

آن دچار کاهش می‌شود. در اثر کاهش در فشار منفذی، تنش مؤثر افزایش یافته و در مخزن پدیده تحکیم روی می‌دهد. علاوه بر این، تغییرات ژئومکانیکی مهم دیگری هم می‌تواند در مخزن و محیط اطراف آن روی دهد [۱].

با استخراج مواد هیدروکربوری از مخازن زیرزمینی نفت و گاز، به تدریج این سیالات از داخل منافذ سنگ مخزن خارج شده و فشار سیال منفذی در محدوده مخزن و محیط اطراف

۱- ثابت باقی ماندن تنش کل قائم در ناحیه مخزن و محیط اطراف آن در مدت زمان تولید (چشم‌پوشی از انتقال تنش قائم به نواحی پایدارتر)،

۲- مقید بودن مخزن در راستای افقی (وقوع تراکم تنها به صورت محوری قائم) در مخزن و صفر بودن کرنش جانبی. فرض بدون تغییر ماندن تنش کل قائم تنها برای شرایط ایده‌آلی نظیر مخازن عمیق، با وسعت خیلی زیاد و بدون پیچیدگی‌های زمین‌شناختی معتبر است. در چنین شرایطی است که کل وزن روباره به سقف مخزن وارد گشته [۶] و انتقال تنش قائم در اثر وقوع پدیده قوس‌زدگی (Stress Arching) که در ادامه راجع به آن بحث می‌شود به دلیل پهنای زیاد و ضخامت کم مخزن رخ نمی‌دهد [۷]. در چنین مخازنی، فرض شرایط مرزی کرنش محوری (صفر بودن کرنش جانبی) نیز خطای کمی را در پی دارد [۶]. بر اساس اندازه‌گیری‌های دوره‌ای میدانی و همچنین مطالعات مبتنی بر روش‌های عددی و تحلیلی، نامعتبر بودن فرضیات مذکور برای بسیاری از مخازن طبیعی توسط محققین بسیاری از جمله سیگال و فیتزجرالد [۸] گزارش گردیده است.

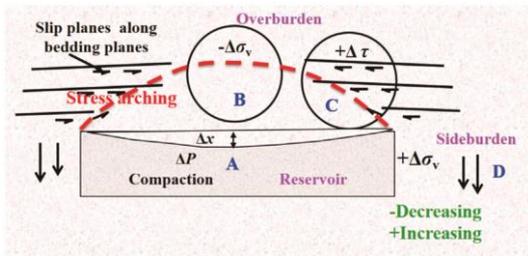
با اینکه ابهاماتی در زمینه وقوع تغییر در تنش‌های کل و علل پیدایش این تغییرات در محدوده مخازن در حال تخلیه وجود دارد، مطالعات به‌مراتب بیشتری بر روی تغییر تنش‌های کل افقی نسبت به تنش کل قائم صورت گرفته و دانسته‌های بیشتری در خصوص دلایل تغییر تنش‌های کل افقی در دست است. در اثر برداشت از مخازن زیرزمینی، فشار سیال منفذی در محدوده مخزن دچار افت شده و سقف مخزن در اثر تراکم و کاهش حجم شروع به نشست می‌کند. به دلیل نشست سقف مخزن، تنش کل افقی در لایه‌های بالای این ناحیه دچار تغییر می‌گردد. بدین صورت که با افت تراز سقف مخزن، لایه‌های روباره بالای شانه‌های (Shoulders) مخزن به صورت افقی به سمت داخل حرکات لغزشی و برشی داشته و این درهم‌فشرده‌گی به وجود آمده در لایه‌های بالای تاج (Crest) مخزن موجب افزایش تنش کل افقی (به دلیل افزایش تمرکز تنش افقی) در این محدوده و همچنین کاهش تنش کل افقی (ناشی از کاهش تمرکز تنش و در واقع باربرداری افقی) در بالای یال‌های (Flanks) مخزن می‌گردد (شکل ۱). در مواردی، این تغییرات در مقدار تنش‌های کل افقی در محدوده بالای سقف مخزن می‌تواند سبب گسیختگی لوله جداره شود.

یکی از کلیدی‌ترین اقدامات در بررسی رفتار مخازن نفت و گاز در طول عملیات تولید و توسعه میدان (Field Development)، تشخیص وضعیت میدان تنش‌ها (Stress Field) و پیش‌بینی دقیق تغییرات آن در مخزن و محیط اطراف آن می‌باشد. از شناخته‌شده‌ترین مثال‌ها در خصوص اثرات ژئومکانیکی عملیات تخلیه مخزن (Depletion) می‌توان به تراکم مخزن و فرونشست سطحی (Surface Subsidence) ناشی از آن اشاره نمود. یکی دیگر از مشکلات رایجی که در اثر تراکم مخزن رخ می‌دهد، گسیختگی لوله جداره (Casing Failure) در داخل و یا در مجاورت مخزن در حال تراکم می‌باشد [۲]. جهت لحاظ نمودن اثر فرونشست سطحی در طراحی لوله‌های جداره و طرح‌های حفاری تکمیلی، استقرار چاه‌های تزریق و افزایش بهره‌وری، نیاز است تا میزان تراکم مخزن در اثر استخراج سیال هیدروکربوری تعیین شود [۲]. برای دستیابی به این هدف، می‌بایست تخمین مناسبی از وضعیت تنش‌ها و تغییرات آن‌ها در مدت زمان افت فشار مخزن در اثر عملیات استخراج صورت پذیرد. تراکم و انقباض مخزن در اثر استخراج نفت می‌تواند سازوکار محرک (Compaction Drive) مهمی برای تولید به‌ویژه در مخازن نفتی نسبتاً نرم باشد. تغییرات در میدان تنش‌های کل نه تنها میزان تراکم مخزن را کنترل می‌کند، بلکه سبب ایجاد تغییر در وضعیت جریان سیال در مخزن هم می‌گردد. بدین گونه که نفوذپذیری سنگ مخزن تغییر یافته و راستای غالب جریان نیز عوض می‌شود [۳]. در نتیجه، وضعیت تنش‌ها و تغییرات آن‌ها در مخزن و پیرامون آن به‌طور مستقیم از طریق تراکم و به‌طور غیرمستقیم به‌وسیله ایجاد تغییر در خصوصیات هیدرولیکی و ژئوتکنیکی مخزن، بر میزان برداشت نفت و به‌طور کلی تولیدات هیدروکربوری تأثیری اساسی دارد [۴].

در زمینه سازوکار تغییر در "تنش‌های مؤثر" در اثر افت فشار منفذی در طول عملیات، میان محققین هم‌نظری وجود دارد. اما در خصوص تغییراتی که می‌تواند در میدان "تنش‌های کل" در اثر تولید رخ دهد ابهاماتی هست و مکانیزم رخداد این پدیده هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است.

در حوزه ژئومکانیک نفت عموماً سعی شده است روابط پیشنهادی به ساده‌ترین حالت و در عین حال با تقریب مناسب به کار گرفته شوند. دو فرض ساده‌کننده مرسوم در خصوص بررسی مسیر تنش‌ها در طول عملیات تولید عبارتند از [۵]:

در مقدار تنش‌های کل افقی می‌گردد. با وجود مطالعات اندک در زمینه چرایی تغییر در تنش کل قائم در محدوده مخزن در حال تخلیه، علت اصلی این تغییرات توسط برخی محققین به پدیده "قوس‌زدگی" تنش نسبت داده شده‌است. مفهوم کلی این پدیده بدین صورت است که در هنگام ایجاد تغییر شکل در اثر بارگذاری، از پایداری برخی نواحی کاسته شده و بار وارده به نواحی جانبی با پایداری بیشتر منتقل می‌گردد. با تعمیم مفهوم ژئوتکنیکی قوس‌زدگی به مسئله استخراج نفت از مخزن و وقوع تغییرات در مقدار تنش کل قائم، می‌توان چنین تفسیر نمود که در مدت‌زمان تخلیه مخزن و تراکم تدریجی ناشی از آن، به‌مرور از پایداری سقف مخزن کاسته شده، ظرفیت این ناحیه در تحمل وزن روباره افت کرده و بخشی از وزن روباره که پیشتر سقف مخزن متحمل آن بوده به سازند اطراف مخزن که پایداری بیشتری دارد منتقل می‌گردد (شکل ۳). در واقع، انتقال بار قائم روباره به‌صورت باربرداری از سقف مخزن و بارگذاری بر توده سنگ واقع در جوانب مخزن صورت می‌گیرد [۱۳].

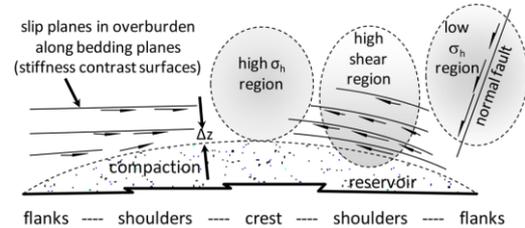


شکل ۳. وقوع پدیده قوس‌زدگی در اثر کاهش پایداری سقف مخزن در طول عملیات تولید، باربرداری از سقف مخزن و انتقال بار به جوانب آن، [۱۴].

تغییراتی که در تنش کل قائم محدوده مخزن در اثر فرآیند تولید محتمل است، می‌تواند در بروز یکسری از مشکلات نقش اساسی داشته باشد. این موارد عبارتند از:

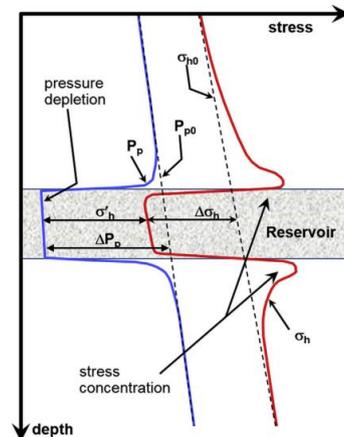
- ۱- فعال‌سازی مجدد گسل‌ها [۱۴]،
- ۲- وارد آمدن آسیب به لوله جدار و چاه [۱۴]،
- ۳- ایجاد تغییرات قابل توجه در نفوذپذیری ناحیه در حال تخلیه و در نتیجه اثر بر جریان سیال [۱۳]،
- ۴- کاهش نرخ افزایش تنش مؤثر در برخی نقاط و حفظ درصد

این شکل از گسیختگی فراوان‌ترین نوع بریده شدن لوله جدار در اثر نشست سقف مخزن می‌باشد [۹].



شکل ۱. تأثیر نشست سقف مخزن در حال تخلیه بر تغییر تنش‌های کل افقی سنگ اطراف مخزن، [۱۱].

بخشی دیگر از تغییراتی که می‌تواند در تنش‌های کل افقی رخ دهد، ناشی از خود روند تولید و افت فشار ناشی از آن می‌باشد. با کاهش تنش‌های افقی در داخل مخزن، در نواحی بالا و پایین سنگ مخزن به دلیل داشتن اندرکنش با سنگ مخزن [۱]، تنش افقی افزایش می‌یابد (شکل ۲). در واقع تنش افقی کاهش یافته در داخل مخزن به لایه‌های سنگی بالا و پایین مخزن منتقل شده و باز توزیع تنش اتفاق می‌افتد [۱۰].



شکل ۲. نقش افت فشار سیال منفذی سنگ مخزن در تغییر تنش‌های کل افقی داخل و اطراف مخزن، [۱۲].

همچنین، تغییراتی که می‌تواند در تنش کل قائم محدوده سنگ مخزن در اثر فرآیند تولید روی دهد به دلیل اثری که بر تمرکز تنش دارد به‌طور غیرمستقیم باعث تغییراتی

مک‌آلن (McAllen) تگزاس برابر با ۰/۵ [۱۷]، گزارش گردیده‌است [۸]. از دیگر نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات میدانی، می‌توان به تناقض مشاهدات با فرض ساده‌کننده صفر بودن کرنش افقی در داخل و اطراف یک مخزن مسطح و حتی با وسعت جانبی نامحدود اشاره نمود [۸]. برای مثال، در میدان نفتی ویلمینگتون (Wilmington) کالیفرنیا، میزان انقباض افقی مخزن در اثر فرآیند تولید به کرنش ۱ درصد رسیده و موجب کمانش مسیر راه‌آهن و خطوط لوله در سطح زمین شده‌است [۱۸].

برخی دیگر از مطالعات در زمینه تغییر در میدان تنش‌های کل، بر پایه مدل‌های تحلیلی انجام گردیده‌اند. عمده مدل‌های تحلیلی مورد استفاده در این زمینه بر پایه نظریه هسته‌های کرنش (Strain Nuclei) از گیرتسما [۱۹]، و نظریه ادخال و ناهمگونی (Inclusion & Inhomogeneity) از اشلبی [۲۰] می‌باشند، که برای به‌کارگیری در حوزه پوروالاستیسیته و ژئومکانیک مخازن توسعه یافته‌اند. اساس نظریه هسته‌های کرنش بدین صورت است که معادلات میدان (Field Equations) برای یک محیط الاستیک و تحت شرایط بارگذاری نقطه‌ای نظیر نیروهای نقطه‌ای، لنگرهای متمرکز، و مرکز اتساع یا فشار محاسبه می‌شوند. در نظریه ادخال و ناهمگونی، تنش در داخل و اطراف ادخال‌هایی با هندسه متفاوت به وسیله اعمال کرنش معلوم با استفاده از فرمول‌بندی الاستیک تعیین می‌گردد. نمونه‌هایی از کاربرد و توسعه نظریه‌های مذکور در پژوهش‌های متعلق به سگال [۱۰]، سگال و همکاران [۲۱]، سگال و فیتزجرالد [۸]، رودنیکی [۲۲] و [۲۳]، و سلطان‌زاده و هاوکس [۲۴] و [۲۵] یافت می‌گردد [۱۲].

یکی از اصلی‌ترین دستاوردهای مطالعات مبتنی بر مدل‌های تحلیلی، تشخیص برخی از عواملی می‌باشد که می‌توانند سبب تشدید وقوع پدیده قوس‌زدگی تنش یا به‌عبارتی تغییر در میدان تنش‌های کل شوند. روابط (۱) و (۲) که توسط سگال و فیتزجرالد [۸] و رودنیکی [۲۲] به ترتیب بر اساس نظریه‌های متعلق به گیرتسما و اشلبی استخراج شده‌اند، بیانگر ضرایب مسیر تنش‌های کل افقی حدآقل و قائم داخل یک مخزن پوروالاستیک عدسی‌شکل مدفون در محیط جامد بی‌نهایت که دارای سختی الاستیک یکسانی با سنگ محیط پیرامون خود است، می‌باشند [۱].

بالایی از نفوذپذیری اولیه در این نقاط، و یا رشد نرخ افزایش تنش مؤثر در نقاط دیگر و در نتیجه کاهش نفوذپذیری برخلاف پیش‌بینی‌ها در آن نقاط [۵] و [۱۴].

۵- مشکلات ناشی از مطابق واقع نبودن طرح‌ریزی‌ها در زمینه عملیات توسعه میدان، و کاهش قابل توجه تراکم مخزن به دلیل کاهش تنش قائم وارد بر سقف مخزن و در نتیجه افت قابل توجه تولید نفت (Oil Recovery) تا میزان ۵۰ درصد [۵].

با توجه به موارد فوق، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که فرض بدون تغییر باقی ماندن تنش‌های کل به‌ویژه تنش کل قائم در طول عملیات برداشت می‌تواند خطای قابل ملاحظه‌ای را وارد فرآیند تحلیل و طراحی تولید از مخزن نماید و رفتاری که برای مخزن بر پایه چنین فرضیات ساده‌کننده‌ای پیش‌بینی می‌شود متفاوت با رفتار واقعی آن خواهد بود.

۲. مرور مطالعات پیشین

همانطور که در بخش پیشین بدان اشاره شد، مطالعات محدودی در زمینه وقوع تغییر در میدان تنش‌های کل، چرایی وقوع این پدیده، تأثیرات آن، و عوامل تشدیدکننده شدت رخداد آن صورت گرفته‌است. علیرغم محدود بودن مطالعات در زمینه قوس‌زدگی تنش، رویکردهای پژوهشی گوناگونی در این خصوص به کار گرفته شده‌اند.

برخی از مطالعات، به صورت میدانی و با استفاده از آزمون‌های شکست هیدرولیکی (Hydraulic Fracturing Tests) به منظور اندازه‌گیری مقدار قوس‌زدگی تنش کل افقی حدآقل انجام شده‌اند. این آزمون‌ها قابل اتکاترین شیوه جهت ارزیابی قوس‌زدگی تنش ناشی از فرآیندهای استخراج یا تزریق می‌باشند. نتایج برآمده از چنین پژوهش‌هایی حاکی از وابسته‌به‌زمان بودن مقدار قوس‌زدگی تنش و حتی متغیر بودن آن در نواحی مختلف مخزن می‌باشد [۱۲]. مقادیر گزارش شده برای قوس‌زدگی تنش کل افقی حدآقل (نسبت تغییر تنش کل افقی حدآقل به تغییر فشار منفذی) در بازه‌ای از ۰/۲۴ تا ۰/۸۴ قرار دارند [۱۵]. بدین معنی که مشاهده شده‌است با افت فشار سیال منفذی سنگ مخزن در اثر فرآیند استخراج، مقدار تنش افقی حدآقل در آن ناحیه نیز دچار کاهش می‌شود. به‌عنوان نمونه، مقدار ضریب قوس‌زدگی تنش افقی حدآقل در میدان اکوفیسک (Ekofisk) نروژ برابر با ۰/۸ [۱۶]، و در میدان

مخازنی که نسبت وسعت جانبی به ضخامت بالایی دارند، معتبر می‌باشد. این مطلب اهمیت هندسه ناحیه در حال تخلیه را بازگو می‌کند [۸].

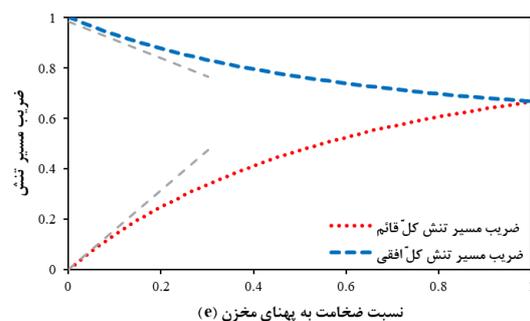
روابطی که پیشتر ارائه گردید، با فرض مشابه بودن خصوصیات الاستیک ناحیه در حال تخلیه و محیط اطراف آن (*Elastically Matched Case*) استخراج شده‌اند. اختلاف خصوصیات الاستیک (*Elastic Contrast*) بین دو محیط مذکور، می‌تواند به وسیله معادلات کامل ارائه شده توسط رودنیک [۲۲] یا به کمک شبیه‌سازی‌های المان محدود لحاظ شود [۲۶] و [۲۷]. بررسی شرایطی که اختلاف در ویژگی‌های الاستیک میان سنگ مخزن و سنگ پیرامون آن وجود دارد، نشان می‌دهد در صورتی که سختی مخزن در حال تخلیه به طور قابل توجهی کمتر از سختی سنگ اطراف آن باشد، پدیده قوس‌زدگی با شدت بیشتری رخ می‌دهد [۱]. به بیانی دیگر، ضرایب مسیر تنش‌های کل داخل یک مخزن که دارای سختی کمتری نسبت به سنگ محیط اطراف خود است، بیشتر از حالتی است که خصوصیات الاستیک مشابهی میان سنگ مخزن و سنگ پیرامون آن وجود دارد [۴]. در یک نسبت ابعادی محدود برای یک مخزن، اگر اختلاف میان خصوصیات الاستیک بی‌نهایت فرض شود (سنگ مخزن بسیار نرم و سنگ پیرامونی بسیار سخت)، هر دو ضریب مسیر تنش کل افقی حداقل و تنش کل قائم به عدد یک میل می‌کنند. در طرف مقابل، در حالتی که سنگ مخزن بسیار سخت و سنگ اطراف آن بسیار نرم باشد، این ضرایب به سمت صفر میل می‌کنند. پیشتر اشاره شد که در یک مخزن عدسی‌شکل، مجموع ضرایب مسیر تنش‌های کل که کنترل‌کننده تراکم حجمی (*Volumetric Compaction*) مخزن در حال تخلیه می‌باشند، مستقل از نسبت ابعادی مخزن است. یعنی بر اساس روابط (۱) و (۲)، رابطه‌ای که از جمع ضرایب مسیر تنش‌های کل افقی و ضریب مسیر تنش کل قائم حاصل می‌شود، فاقد پارامتر نسبت ابعادی (e) می‌باشد. لازم به ذکر است، در حالت وجود اختلاف خصوصیات الاستیک میان سنگ مخزن و محیط اطراف آن، مقدار مجموع ضرایب مسیر تنش و همچنین تراکم‌پذیری منافذ (*Pore Compressibility*) ناحیه سنگ مخزن، دیگر در نسبت‌های ابعادی مختلف ثابت نبوده و با افزایش نسبت سختی مخزن به سختی محیط پیرامون آن کاهش می‌یابد [۱].

[۸] و [۲۲]. با دقت در این روابط، می‌توان دریافت که هندسه یک مخزن در حال تخلیه در میزان تغییر در میدان تنش‌های کل نقش مهمی دارد.

$$\gamma_h = \frac{\Delta\sigma_h}{\Delta P_p} = \alpha \frac{1-2\nu_{fr}}{1-\nu_{fr}} \left(1 - \frac{\pi}{4} e\right) \quad (1)$$

$$\gamma_v = \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta P_p} = \alpha \frac{1-2\nu_{fr}}{1-\nu_{fr}} \left(\frac{\pi}{2} e\right) \quad (2)$$

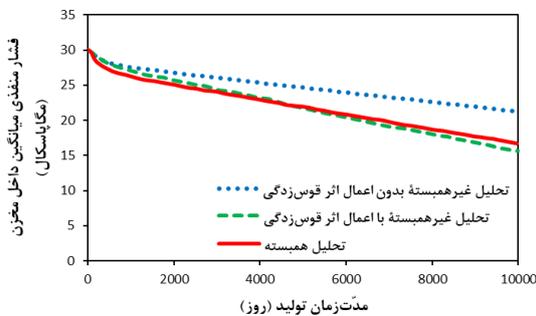
در شکل ۴، که بر مبنای روابط (۱) و (۲) تهیه شده، قابل مشاهده است که در خصوص مخازن عدسی‌شکل، با کاهش پهنای مخزن نسبت به ضخامت آن (یا به عبارتی تبدیل یک مخزن عریض به مخزنی کم‌عرض)، میزان تغییر در تنش کل قائم افزایش یافته و برعکس، میزان تغییر در تنش کل افقی حداقل کاهش می‌یابد. در شرایطی که اختلافی میان خصوصیات الاستیک سنگ مخزن و سنگ محیط پیرامون آن وجود ندارد، رابطه مجموع ضرایب مسیر تنش‌های کل افقی و تنش کل قائم، مستقل از نسبت ابعادی مخزن می‌شود. بدین معنی که یک سهم ثابت از مقدار مجموع ضرایب مسیر تنش، بر اساس نسبت ابعادی مخزن میان ضرایب مسیر تنش کل افقی و ضریب مسیر تنش کل قائم تقسیم می‌شود.



شکل ۴. تغییر مقدار ضرایب مسیر تنش کل افقی حداقل و قائم بر اساس نسبت‌های ابعادی مختلف مخازن عدسی‌شکل، [۱]، [۸] و [۲۲].

طبق شکل ۴، وابسته بودن ضرایب مسیر تنش کل داخل مخزن به شرایط مرزی جوانب آن قابل تشخیص است. پیشتر گفته شد که فرض ساده‌کننده ناچیز بودن کرنش افقی در

تراکم مصالح با افت خطی فشار سیال منفذی آن در دو حالت (۱) ثابت باقی ماندن تنش کل قائم و (۲) تغییر کردن تنش کل قائم به وسیله اعمال یک ضریب قوس زدگی تنش کل قائم (با فرض ثابت و یکسان بودن این ضریب برای کل مخزن)، به مدل شبیه سازی تولید تمپست، صورت گرفته است. از مقایسه نتایج تحلیل‌های فوق با یکدیگر در شکل ۵ مشخص است که در نظر نگرفتن اثرات پدیده قوس زدگی تنش و لحاظ نکردن تغییراتی که می‌تواند در میدان تنش‌های کل، به ویژه در تنش کل قائم رخ دهد، می‌تواند سبب بروز ۳۰ درصد خطا در پیش‌بینی میزان افت فشار سیال منفذی در مخزن و میزان تولید از آن در روز ده‌هزارم استخراج از مخزن شود.



شکل ۵. مقایسه مقادیر فشار منفذی میانگین مخزن

به دست آمده از تحلیل‌های غیرهمبسته در دو حالت (۱)

چشم‌پوشی از اثر قوس زدگی، و (۲) اعمال اثر قوس زدگی، با نتایج حاصل از تحلیل همبسته، [۱۳].

در پژوهش‌هایی که در رابطه با عوامل اثرگذار بر شدت رخداد پدیده قوس زدگی مطالعه انجام شده است، مواردی نظیر خصوصیات هندسی مخزن و خصوصیات مصالح سنگ مخزن و سنگ پیرامون آن مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در پژوهش سگورا و همکاران [۱۳]، همچنین نتایج به دست آمده از مجموعه تحلیل‌های عددی سه بعدی همبسته هیدرومکانیکی در زمینه تأثیر نسبت ابعادی مخزن (نسبت پهنا به ضخامت آن) و تأثیر نسبت سختی سنگ مخزن به سختی سنگ محیط پیرامون آن ارائه شده است. مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای سنگ مخزن و سنگ پیرامون آن پوروالاستیک خطی می‌باشد. برای حالتی که نسبت سختی سنگ مخزن به سختی سنگ اطراف ۰٫۰۱، و مخزن دارای نسبت ابعادی کوچکی (مثلاً ۲۵) بوده، مقدار ضریب مسیر

علیرغم کمک شایان توجه نظریه‌های فوق، این نظریه‌ها دارای فرضیات ساده‌کننده اساسی مرتبط با هندسه مخزن و جریان سیال می‌باشند. اغلب این مدل‌های نظری برای محیط اطراف نیمه بی‌نهایت معتبر بوده و برای محیط‌های محدود (مگر با هندسه ساده) مناسب نمی‌باشند [۲۸] و [۲۹].

به‌طور مشابه، در زمینه بررسی اثر تغییر در میدان تنش‌های کل و نقش این تغییرات بر رفتار مخزن و همچنین عوامل تشدیدکننده تأثیر این پدیده، مطالعاتی با رویکرد مدل‌سازی عددی انجام شده است. به‌طور کلی، شرایطی که تحت آن‌ها پدیده قوس زدگی تنش در محیط متخلخل می‌تواند اثر چشمگیری داشته باشد، به قرار زیر است:

۱- مخزن با خصوصیات و شرایط متفاوت با محیط اطراف (نظیر تفاوت در دما، فشار منفذی، و خصوصیات ژئومکانیکی) [۱۲].

۲- در مخازن کوچک با سختی کمتر نسبت به محیط اطراف [۱۱].

۳- در مخازنی با نفوذپذیری حساس به تغییرات تنش (*Stress-Sensitive Permeability*) نظیر مخازن دارای شکستگی که حتی با وجود قابل توجه نبودن اثر قوس زدگی بر تراکم مخزن، عملکرد مخزن حتماً از قوس زدگی اثر خواهد پذیرفت [۵].

پیش از آن که به یافته‌های پژوهش‌های عددی پیشین در خصوص عوامل افزایش‌دهنده میزان تغییر در میدان تنش‌های کل پرداخته شود، یافته سگورا و همکاران [۱۳] در ارتباط با تأثیر لحاظ نکردن اثر پدیده قوس زدگی بر پیش‌بینی رفتار مخزن، نیازمند توجه است. هدف بخشی از این پژوهش، بهبود نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های غیرهمبسته (*Uncoupled*) در مقایسه با نتایج به دست آمده از مدل‌های همبسته (*Coupled*) هیدرومکانیکی (*Hydro-Mechanical*) به وسیله اعمال اثر پارامترهای مسیر تنش در ضرایب حجم حفره (*Pore Volume Multipliers (PVM)*) می‌باشد. در این پژوهش، تحلیل همبسته تولید از مخزن به وسیله استفاده از یک کد رابط (*Message Passing Interface (MPI)*) که به صورت صریح (*Explicit*) مدل شبیه‌سازی تولید تمپست (*TEMPEST*) (محاسبات جریان سیال) و برنامه‌المان محدود *الفین* (*ELFEN*) (شبیه‌سازی ژئومکانیکی) را با یکدیگر یکپارچه می‌کند، انجام شده است. تحلیل غیرهمبسته نیز با استفاده از ضرایب حجم حفره به دست آمده از مدل‌سازی عددی مسئله

میدان تنش‌های کل، مؤثر گزارش گردیده‌است.

۳. اهداف و روش انجام پژوهش

هدف پژوهش حاضر، بررسی وقوع و چگونگی تغییر در تنش‌های کل افقی و قائم پیرامون مخازن نفت و گاز در اثر برداشت می‌باشد. عملیات استخراج از یک مخزن نفتی به صورت کاملاً همبسته هیدرومکانیکی و با در نظر گرفتن چاه و اعمال شار جریان سیال خروجی به بخشی از آن که در محدوده مخزن قرار دارد، به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس (*Abaqus FEA*) شبیه‌سازی شده‌است. مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای سنگ مخزن و سنگ پیرامون آن پوروالاستیک غیرخطی می‌باشد. در مدل الاستیک غیرخطی به کار گرفته شده، فرض شده‌است که سختی ناحیه مخزن به صورت خطی با کرنش حجمی ایجاد شده در ناحیه مخزن افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که سختی ناحیه در حال تخلیه در اثر کاهش تخلخل تا حداکثر کرنش حجمی ۰/۱ درصد، نهایتاً ۱۰ درصد زیاد می‌شود.

لازم به ذکر است، شرایط مرزی فشار سیال منفذی سنگ محیط اطراف مخزن به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌است که بسته به نفوذپذیری به مراتب پایین‌تر این ناحیه نسبت به سنگ مخزن بتواند دچار تغییر شده و از فرآیند استخراج اثر بپذیرد. چنین مدل رفتاری به وسیله نوشتن یک زیربرنامه برای تعریف متغیر میدان دلخواه کاربر (*User-Defined Field*) در نرم‌افزار آباکوس پیاده‌سازی گردیده‌است.

۱.۳. بررسی اثر پهنای مخزن بر شدت تغییر میدان

تنش‌های کل

در بخش‌های پیشین بیان گردید یکی از عوامل اصلی که می‌تواند بر میزان تغییر در میدان تنش‌های کل اثرگذار باشد، پهنای مخزن است. به همین دلیل یکی از اهداف پژوهش حاضر، شبیه‌سازی عملیات استخراج سیال نفت از سه مخزن متفاوت از نظر پهنا، با پلان مربعی، واقع در عمق ۳ کیلومتری از سطح زمین، و با ضخامت ۵۰۰ متر، یکی به صورت کم‌عرض (با پهنای ۲ کیلومتر)، یکی با عرض میانه (با پهنای ۵ کیلومتر) و دیگری عریض (با پهنای ۱۰ کیلومتر)، می‌باشد (شکل ۶). نتایج مدل‌سازی استخراج نفت از طریق یک چاه واقع در وسط

تنش کل قائم میانگین بالای ۰/۸ به دست آمده‌است. بدین معنی که میزان تغییر در تنش کل قائم ۰/۸ برابر تغییر در فشار سیال منفذی می‌باشد، که تغییر قابل ملاحظه‌ای است. در همین نسبت ابعادی، در صورتی که سختی سنگ مخزن، ۱۰ برابر سختی سنگ اطراف باشد، مقدار تغییر در تنش کل قائم به صفر میل می‌کند. چنین تغییری در شدت وقوع پدیده قوس‌زدگی تنش بیانگر تأثیر قابل توجه پارامتر اختلاف سختی میان سنگ مخزن و سنگ پیرامون می‌باشد.

در پژوهشی دیگر، *آسایی و همکاران [۱۲]*، تغییر تنش کل قائم در اطراف یک مخزن در یک نمونه آزمایشگاهی در اثر انجام فرآیند تزریق اندازه‌گیری شده‌است. نتایج به دست آمده از آزمایش، جهت کالیبراسیون یک مدل عددی دوبعدی متقارن محوری مورد استفاده قرار گرفت. مخزن مذکور با الگوبرداری از مفهوم موجود در نظریه *شلسبی* در سه حالت ادخال، ناهمگونی نرم، و ناهمگونی سخت تهیه شده‌است. نتایج به دست آمده حاکی از تأثیر مقدار مطلق سختی سنگ مخزن و سنگ پیرامون آن، و همچنین تأثیر نسبت آن‌ها در میزان تغییر در تنش کل قائم اطراف مخزن تحت تزریق، می‌باشد. همچنین اثر کاهنده لایه نرم میانی بر شدت وقوع پدیده قوس‌زدگی در محیط اطراف مخزن مشاهده شده‌است.

در پژوهش *طاهری‌نیا و همکاران [۵]*، یک تحلیل عددی سه‌بعدی متقارن محوری به صورت همبسته هیدرومکانیکی با استفاده از مدل رفتاری پوروالاستیک خطی صورت گرفته‌است. در شرایطی که سختی دو ناحیه یکسان باشد، میزان تغییر در تنش کل قائم تنها برابر با ۰/۱ تغییر در فشار منفذی داخل مخزن می‌باشد. در حالی که، اگر سختی سنگ اطراف مخزن ۱۰ برابر سختی سنگ مخزن باشد، مقدار ضریب قوس‌زدگی تنش کل قائم میانگین به ۰/۵۵ می‌رسد. همچنین، نشان داده شده‌است با افزایش نسبت سختی سنگ پیرامون مخزن به سنگ مخزن تا حد گفته شده (۱۰ برابر)، میزان تراکمی که در مخزن رخ می‌دهد کاهش یافته و از مقدار تراکمی که بر اساس فرض ثابت ماندن تنش کل قائم در محدوده مخزن پیش‌بینی شده بود، فاصله می‌گیرد. لازم به ذکر است، در این پژوهش مقدار مطلق سختی سنگ مخزن و سختی سنگ اطراف آن در شدت وقوع پدیده قوس‌زدگی بی‌تأثیر دانسته شده، و تنها نقش نسبت این سختی‌ها در تغییر

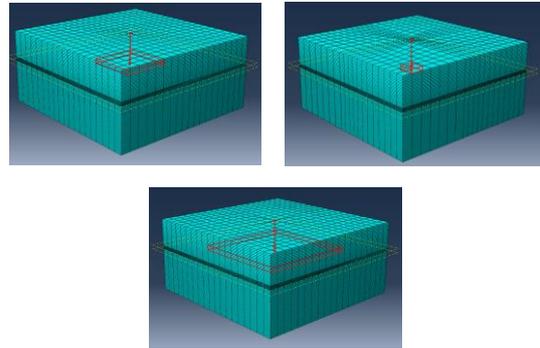
برای مصالح محیط اطراف مخازن شبیه‌سازی شده از داده‌های مربوط به برخی از خصوصیات سازند گچساران استفاده گردید (جدول ۱). پایین‌ترین لایه این سازند نقشی اساسی در نگهداری نفت به‌عنوان پوش‌سنگ مخازن نفتی نظیر مخزن آسماری دارد [۲].

لازم به ذکر است، از آنجا که پارامترهای مطالعاتی معمولاً تنها برای سنگ‌های مخزنی تعیین می‌شوند، مشخصات ژئومکانیکی سایر سازندها، به‌طور مستقیم مطالعه نمی‌شود. در همین راستا، به‌منظور تعیین خصوصیات ژئومکانیکی سازند گچساران، نمونه‌هایی از رخنمون این سازند واقع در ساختگاه سدهای گتوند و چمشیر توسط مهرگینی و همکاران [۳۱] مورد آزمایش قرار گرفت و با داده‌های حاصل از ارزیابی پتروفیزیکی و توصیف چاه‌پیمایی یکی از میادین نفتی ایران مقایسه شد. مشخص گردید که نتایج نمونه‌های مربوط به ساختگاه‌های گتوند و چمشیر با وجود تفاوت عمق و دما اختلاف چندانی با مقادیر تفسیر چاه نداشته و نتایج حاصله را می‌توان به‌عنوان پارامترهای ژئومکانیکی پوش‌سنگ گچساران منظور نمود [۲].

همانطور که در بخش پیشین بیان گردید یکی از موارد کلیدی اثرگذار بر شدت تغییر در تنش‌های کل، اختلاف سختی میان سنگ مخزن و سنگ اطراف آن می‌باشد، لذا از مقدار ۴۰ گیگاپاسکال برای مدول الاستیسیته اولیه سازند اطراف مخزن استفاده شده‌است (۲ برابر سختی اولیه سنگ مخزن)، تا تغییرات در میدان تنش‌های کل که مسئله اصلی پژوهش حاضر می‌باشد، مشهود باشد.

داده‌های سرعت جریان سیال خروجی از مخزن که به بخشی از بدنه چاه واقع در ناحیه مخزن اعمال شده‌است، بر اساس داده‌های نزدیک به ۲۲ سال تولید (بین سال‌های ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۶) متعلق به یکی از چاه‌های میدان نفتی کوپال می‌باشد. نمودار سرعت جریان غیرتجمعی ورودی به چاه تولید در بخش نتایج همراه با برخی از نتایج نظیر نمودارهای فرونشست سطحی ناشی از تراکم سه مخزن کم‌عرض، با عرض میانه و عریض قابل مشاهده است (برای مثال در شکل ۸).

مخازن مذکور با یکدیگر مقایسه شده‌است، تا اثرات هندسه مخزن بر تغییر میدان تنش‌های کل در محیط اطراف آن در اثر فرآیند تولید مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۶. مخزن کم‌عرض (با پهنا ۲ کیلومتر) (سمت راست)، مخزن با عرض میانه (با پهنا ۵ کیلومتر) (سمت چپ)، و مخزن عریض (با پهنا ۱۰ کیلومتر) (پایین).

مدل‌های ساخته‌شده در پلان، مربعی با بُعد ۴۰ کیلومتر می‌باشند. مخازن در عمق ۳ کیلومتری واقع شده‌اند، و المان‌های ریزتری برای ترازوی که مخازن در آن قرار دارند، در نظر گرفته شده‌است. در گام اول حل، تنش‌های برجا به‌صورت ژئواستاتیکی در مدل‌ها منظور می‌شود (*Geostatic Step*). در گام‌های بعدی حل که فرآیند استخراج سیال از مخزن شبیه‌سازی شده (*Soils Step*)، روند تغییرات زمانی میزان تولید از مخازن به نرم‌افزار داده شده‌است. کف مدل‌ها در برابر هرگونه تغییرشکلی مقید شده، و در جداره‌های جانبی مدل‌ها فقط تغییرشکل قائم (نشست) مجاز می‌باشد. در تمام جداره‌های پیرامونی مدل‌ها شرایط مرزی فشار منفذی ثابت است، و در المان‌های داخلی فشار منفذی امکان تغییر دارد و از فرآیند استخراج اثر می‌پذیرد. فرآیند استخراج به‌صورت اعمال سرعت جریان ورودی به بخشی از چاه که در تراز مخازن قرار دارد، شبیه‌سازی شده‌است.

درخصوص ویژگی‌های هندسی و پارامترهای ژئومکانیکی سه مخزن فوق، از خصوصیات مربوط به مخزن کربناته آسماری واقع در میدان نفتی کوپال در استان خوزستان، استفاده شده‌است (جدول ۱). سازند مخزنی آسماری غالباً متشکل از ماسه‌سنگ کوارتزی و سنگ‌های کربناته می‌باشد [۲].

جدول ۱. خصوصیات هندسی و ژئومکانیکی مخزن آسماری، [۳۰]؛ و مشخصات هندسی و ژئومکانیکی سازند گچساران، [۳۱].

| نام سازند | ضریب پواسون متوسط | مدول الاستیسیته متوسط (گیگاپاسکال) | چگالی متوسط (کیلوگرم بر متر مکعب) | ضخامت متوسط (متر) | عمق متوسط (متر) | تخلخل متوسط (درصد) |
|-------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| مخزن آسماری | ۰/۳ | ۲۱/۴۴ | ۲۵۰۰ | ۴۳۳ | ۳۱۷۵ | ۱۳/۶ |
| گچساران | ۰/۲۵ | ۴ | ۲۸۰۰ | ۸۰۰ | ۳۱۰۰ | ۳/۶ |

۲،۳. بررسی اثر اختلاف سختی اولیه سنگ مخزن و سنگ

پیرامونی بر شدت تغییر میدان تنش‌های کل

هدف دیگر این پژوهش، بررسی نحوه تغییر در مقدار تنش کل قائم محیط پیرامون (ناحیه بالای سقف و ناحیه اطراف گوشه) یک مخزن در حال تخلیه، در حالت‌های مختلف سختی اولیه سنگ مخزن و سختی اولیه سنگ محیط اطراف آن نسبت به یکدیگر، می‌باشد. مخزنی که برای این مسئله در نظر گرفته شده‌است، همان مخزن کم‌عرض (با پهنای ۲ کیلومتر) معرفی شده در زیربخش پیشین است. در زیر بخش قبل، مسئله مورد نظر، بررسی تأثیر پهنای مخزن بوده و به غیر از پهنای مخزن، باقی خصوصیات در نظر گرفته شده برای مخازن و محیط اطراف شبیه‌سازی شده بر اساس مشخصات مخزن آسماری و سازند گچساران در میدان نفتی کوپال می‌باشد. در این قسمت که هدف، سنجش اثر خصوصیات ژئومکانیکی اولیه سنگ مخزن و سنگ پیرامون آن نسبت به همدیگر می‌باشد، به غیر از خصوصیات ژئومکانیکی، باقی ویژگی‌های در نظر گرفته شده مشابه قبل است. لازم به ذکر است، با آغاز فرآیند استخراج از مخزن در مدل با توجه به گستره مقادیر خصوصیات ژئومکانیکی الاستیک (مدول الاستیسیته و ضریب پواسون) در زمینه مکانیک سنگ مرتبط با نفت [۱]، سه حالت مختلف سختی برای سنگ مخزن و سنگ پیرامون آن در نظر گرفته شده‌است. در حالت نخست، سنگ مخزن دارای سختی اولیه ۱۰ گیگاپاسکال که یک‌نهم سختی اولیه سنگ اطراف خود است، می‌باشد. در حالت دوم، سختی اولیه هر دو محیط سنگی برابر با ۵۰ گیگاپاسکال، و در حالت آخر، سنگ مخزن با سختی اولیه ۹۰ گیگاپاسکال، ۹ برابر سخت‌تر از سنگ اطراف خود است.

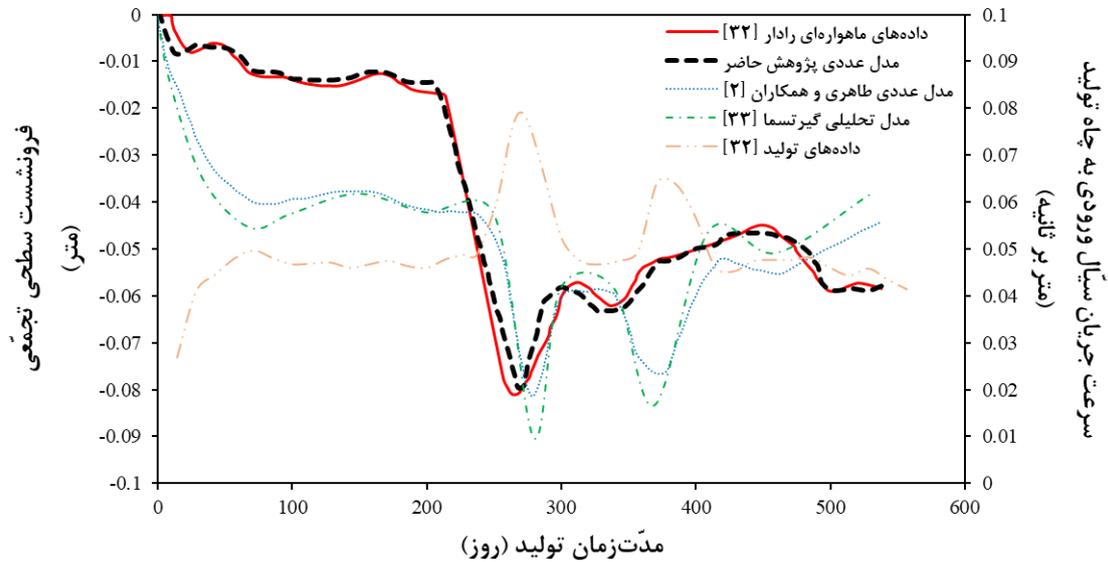
شایان توجه است، مشابه با مدل‌های ساخته شده برای مسئله پیشین، با آغاز فرآیند استخراج و تولید از مخزن و وقوع کرنش حجمی ناشی از پدیده تحکیم، خصوصیات ژئومکانیکی ناحیه در حال تخلیه دچار تغییر شده و ثابت باقی نمی‌ماند. همچنین، در سنگ محیط اطراف مخزن علیرغم نفوذپذیری و تخلخل بسیار پایین تری که در مقایسه با سنگ مخزن دارد، تا حدودی امکان افت در فشار سیال منفذی، وقوع کرنش حجمی ناشی از خروج سیال منفذی و افزایش تنش مؤثر، و در نتیجه تغییر در مقدار خصوصیات پوروالاستیک، وجود دارد.

۴. صحت‌سنجی شیوه شبیه‌سازی فرآیند

برداشت

در مسئله‌ای که به منظور صحت‌سنجی طریقه شبیه‌سازی استخراج سیال هیدروکربنی از مخزن در نظر گرفته شده‌است، فرونشست سطح زمین در اثر استخراج از مخزن بزرگی در ایالات متحده آمریکا با نام لاست هیلز (Lost Hills) واقع در غرب کالیفرنیا مورد بررسی قرار گرفته‌است. عمده مخزن از جنس دیاتومیت با تخلخل زیاد و نفوذپذیری کم می‌باشد. معمول‌ترین روش‌های پایش نشست در میادین نفت و گاز، یکی استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (Global Positioning System (GPS))، و دیگری استفاده از داده‌های ماهواره‌ای رادار (Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)) است که بر اساس روش دوم میزان نشست تجمعی در گذر زمان برای مخزن مورد نظر اندازه‌گیری و ثبت شده‌است [۲].

در شکل ۷، نمودار فرونشست تجمعی مربوط به نتایج مدل‌سازی عددی توسط طاهری و همکاران [۲] بر اساس تبدیل داده‌های تولید به داده‌های افت فشار و اعمال آن به گره‌های ناحیه مخزن الاستیک به‌دست آمده‌است.



شکل ۷. مقایسه مقادیر فرونشست سطحی به دست آمده از مدل سازی عددی پژوهش حاضر، مدل عددی طاهری و همکاران [۲]، و مدل تحلیلی گیرتسما [۳۳] با مقادیر فرونشست سطحی به دست آمده از داده های ماهواره ای رادار [۳۲].

روند تولید اثر بپذیرد.

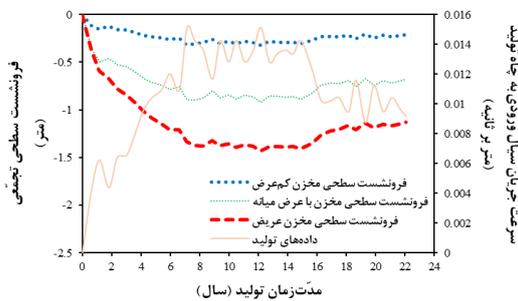
به منظور صحت سنجی نحوه شبیه سازی استخراج سیال از مخزن در این پژوهش، ابتدا مدلی با مخزن پوروالاستیک خطی (مدول یانگ ثابت نزدیک به ۴ گیگاپاسکال) ساخته شد. مشخص گردید که نتایج حاصل از چنین مدلی به مانند نتایج عددی طاهری و همکاران [۲] و همچنین نتایج رابطه مبتنی بر مدل تحلیلی گیرتسما [۳۳]، در برخی از دوره های تولید تطابق خوبی با داده های ماهواره ای داشته (محدوده بین روزهای ۲۵۰م تا ۳۴۰م تولید) و در برخی دیگر از دوره ها اختلاف زیادی دیده می شود (برای مثال، از ابتدای تولید تا روز ۲۲۰م).

به نظر می رسد دلیل اصلی این اختلاف، لحاظ نمودن تغییراتی است که در طول عملیات تولید در سختی ناحیه در حال تخلیه رخ داده است. با بررسی نمودار تولید و نمودار فرونشست بر اساس داده های ماهواره ای، می توان چنین استنباط نمود که بخشی از تغییر شکل ها در محدوده مخزن وارد حالت پلاستیک شده و رفتار مخزن الاستیک خطی نیست. چرا که برای مثال در بازه میان روزهای ۲۴۰م تا

بدین معنی که روند استخراج از مخزن به طور مستقیم و از طریق اعمال جریان ورودی به چاه تخلیه شبیه سازی نشده، محیط اطراف مخزن تحت اثر فرآیند استخراج قرار نگرفته، و سختی و خصوصیات هیدرومکانیکی ناحیه در حال تخلیه و محیط اطراف آن نیز که می توانند در اثر خروج سیال دچار تغییر شوند، ثابت فرض شده اند. به طور مشابه، در رابطه محاسبه فرونشست سطحی مبتنی بر مدل تحلیلی گیرتسما [۳۳] نیز شرایط ساده کننده گفته شده برقرار بوده است. بخشی از اختلافی که میان نمودار نتایج حاصل از دو مورد فوق با نتایج حاصل از اندازه گیری های ماهواره ای رادار وجود دارد هم به دلیل تفاوت میان شرایط مرزی در نظر گرفته شده و شرایطی است که واقعاً در هنگام عملیات تولید در ناحیه مخزن و محیط اطراف آن روی می دهد.

در مدل صحت سنجی شده نیز مطابق با مدل سازی های مسئله اصلی پژوهش حاضر، تولید از مخزن به وسیله اعمال سرعت جریان ورودی سیال به بخشی از بدنه چاه شبیه سازی شده است. در مدت زمان استخراج، علاوه بر تأثیری که سنگ مخزن از شرایط مرزی سرعت جریان ورودی به چاه می گیرد، محیط اطراف مخزن نیز که نفوذپذیری و نسبت تخلخل به مراتب کمتری نسبت به سنگ مخزن دارد نیز می تواند از

کمتر رخ داده است.

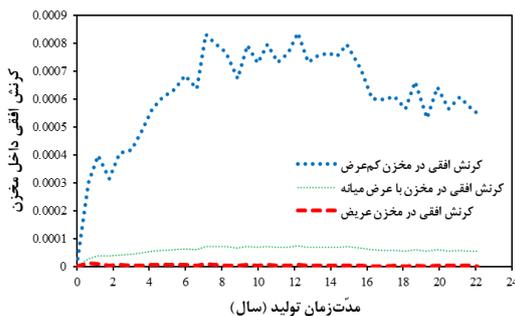


شکل ۸. مقایسه مقادیر فرونشست سطحی ناشی از تراکم قائم سه مخزن با پهناهای متفاوت.

۵.۱.۲. مقایسه مقادیر کرنش افقی داخل مخازن متفاوت از

نظر پهنا در اثر تراکم جانبی آنها

در بخش پیش‌گفتار گفته شد که یکی از فرضیات ساده‌کننده متداول در زمینه پیش‌بینی رفتار مخزن، فرض ناچیز بودن کرنش افقی در داخل و اطراف مخزن به‌هنگام متراکم شدن در اثر فرآیند استخراج می‌باشد. در شکل ۹، قابل مشاهده است که در مخزن عریض کرنش افقی رخ نداده است. در حالی که، مقادیر کرنش جانبی قابل توجهی برای مخزن کم‌عرض مشاهده می‌شود. می‌توان میزان کرنش افقی که می‌تواند در مخزن رخ دهد را به‌نوعی با اثر تنش کل افقی در ناحیه اطراف گوشه مخزن مرتبط دانست.



شکل ۹. تفاوت در مقادیر کرنش افقی داخل سه مخزن با پهناهای متفاوت به‌هنگام متراکم شدن.

۳۰۰م، میزان تولید تا حداًکثر مطلق رفته و بازگشته‌است، اما تغییر شکل اضافه‌ای که در اثر این افزایش تولید ایجاد شده بود، به‌طور کامل رفع نشده و بخش زیادی از آن پسماند است. بنابراین، برای دستیابی به نتایج بهتر و منطبق بر نمودار به‌دست‌آمده از داده‌های ماهواره‌ای، از بازه ۳ تا ۲۵ گیگاپاسکال برای شبیه‌سازی متغیر بودن سختی سنگ مخزن استفاده گردیده‌است.

۵. نتایج

۵.۱. بررسی اثر "پهنای مخزن"

۵.۱.۱. مقایسه مقادیر فرونشست سطحی مخازن متفاوت از

نظر پهنا در اثر تراکم قائم آنها

بیشتر در بخش پیش‌گفتار به یکی از اثرات پدیده قوس‌زدگی و تأثیر کاهنده آن بر تراکمی که در اثر عملیات استخراج در ناحیه سنگ مخزن رخ می‌دهد، اشاره گردید. در اثر تحکیمی که در سنگ مخزن به‌دلیل افت فشار سیال منفذی روی می‌دهد، ناحیه سقف مخزن شروع به نشست کرده و دچار افت در پایداری می‌شود. با کاهش پایداری، از ظرفیت این ناحیه در تحمل وزن روباره کاسته شده و در آن محدوده بازتوزیع تنش اتفاق می‌افتد.

بدین معنی که در اثر پدیده قوس‌زدگی تنش، بخشی از وزن روباره که سابقاً به سقف مخزن که دارای پایداری و قابلیت اتکای کافی بود وارد می‌شد، پس از کاسته‌شدن از پایداری این ناحیه، به نواحی پایدارتری نظیر گوشه‌های مخزن منتقل می‌شود. با کاهش وزن وارده به سقف مخزن، نقش پدیده طبیعی رانش تراکمی در بیشتر متراکم‌شدن مخزن کم‌اثر می‌شود. در نتیجه، در شرایطی که پدیده قوس‌زدگی تنش با شدت بیشتری رخ می‌دهد، تراکم کمتری در ناحیه سنگ مخزن روی داده، و در نتیجه فرونشست سطحی که یکی از رویدادهای ناشی از تراکم مخزن است، به میزان کمتری اتفاق می‌افتد.

در شکل ۸، با توجه به اینکه با کاهش پهناهای مخزن، فرونشست سطحی کمتری در طول ۲۲ سال تولید رخ داده‌است، می‌توان چنین نتیجه گرفت که با اینکه در شرایط پیش از تولید، تنش کل قائم نسبتاً یکسانی بر سقف سه مخزن مورد بررسی اثر می‌کرده، در طول عملیات استخراج کاهش شدیدتری در تنش کل قائم اثرگذار بر سقف مخزن با پهناهای

۳.۱.۵. مقایسه میزان تغییر تنش کل قائم در ناحیه بالای**سقف مخازن متفاوت از نظر پهنا**

با بررسی میزان تغییر در مقدار تنش کل قائم ناحیه سقف مخازن با پهناهای متفاوت در طول مدت‌زمان عملیات تولید در شکل ۱۰، مشاهده می‌شود که در مخازن نسبتاً عریض و عریض، تقریباً هیچ تغییری در وزن روباره وارد بر سقف مخازن مذکور به وجود نیامده است. با این حال، تنش کل قائم در ناحیه بالای مخزن کم‌عرض در مقایسه با دو مخزن دیگر کاهش چشمگیری داشته و کاملاً از روند تولید تبعیت کرده است. کاهش تنش کل قائم بالای سقف مخزن کم‌عرض می‌تواند توجیه مناسبی برای کوچکتر بودن میزان فرونشست سطحی ناشی از تراکم این مخزن نسبت به مخازن عریض‌تر باشد. می‌توان در خصوص نحوه اثرگذاری پهناهای مخزن بر شدت بازتوزیع تنش از بالای سقف مخزن به نواحی پایدارتر بدین‌گونه تفسیر نمود که تا هنگامی که پهناهای مخزن به قدری نباشد که مسیر انتقال تنش را طولانی کرده و تغییر اتکالی پایدار مصالح را به نحوی که بخشی از وزن روباره به جوانب مخزن منتقل شوند ناممکن کند، امکان وقوع تغییر در میدان تنش‌های کل وجود دارد. بدین معنی که با افزایش وسعت جانبی مخزن تا یک حد آستانه، همچنان امکان انتقال تنش وجود دارد. اما از آن حد به بعد، این امکان وجود نداشته و تمام وزن روباره به سقف مخزن وارد گشته، و سبب وقوع تراکم بیشتری در مخزن و در نتیجه آن فرونشست سطحی بزرگتری می‌شود.

۴.۱.۵. مقایسه میزان تغییر تنش‌های کل در گوشه‌های**مخازن متفاوت از نظر پهنا**

با توجه به کاهش قابل توجهی که در مقدار تنش کل قائم اثرگذار بر سقف مخزن کم‌عرض در مقایسه با مخازن با پهناهای بیشتر در شکل ۱۰ مشاهده گردید، به منظور حصول اطمینان از نقش اساسی پدیده قوس‌زدگی و تأیید مفهوم انتقال تنش از ناحیه سقف مخزن به جوانب پایدارتر مخزن، نحوه تغییر تنش کل قائم در ناحیه اطراف گوشه‌های سه مخزن مورد مطالعه، بررسی گردید.

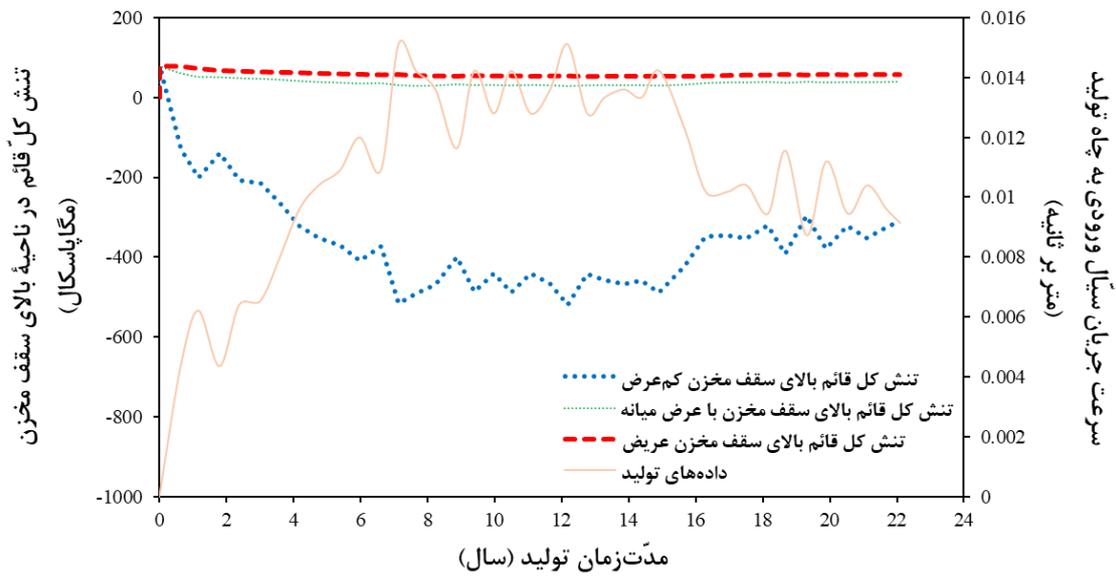
مطابق آنچه که بر اساس سازوکار پدیده قوس‌زدگی تنش انتظار می‌رفت، افزایش به مراتب بیشتری در مقدار تنش کل قائم ناحیه اطراف گوشه‌های مخزن کم‌عرض دیده می‌شود

(شکل ۱۱). با بررسی همزمان شکل ۱۰ و شکل ۱۱، به نظر می‌رسد همانطور که تغییرات در مقدار تنش کل قائم بالای سقف مخازن با عرض میانه و عریض در طول فرآیند تولید شباهت بسیاری داشته است، روند و میزان افزایش نسبی در تنش کل قائم ناحیه اطراف گوشه‌های این دو مخزن نیز نزدیک به یکدیگر می‌باشد.

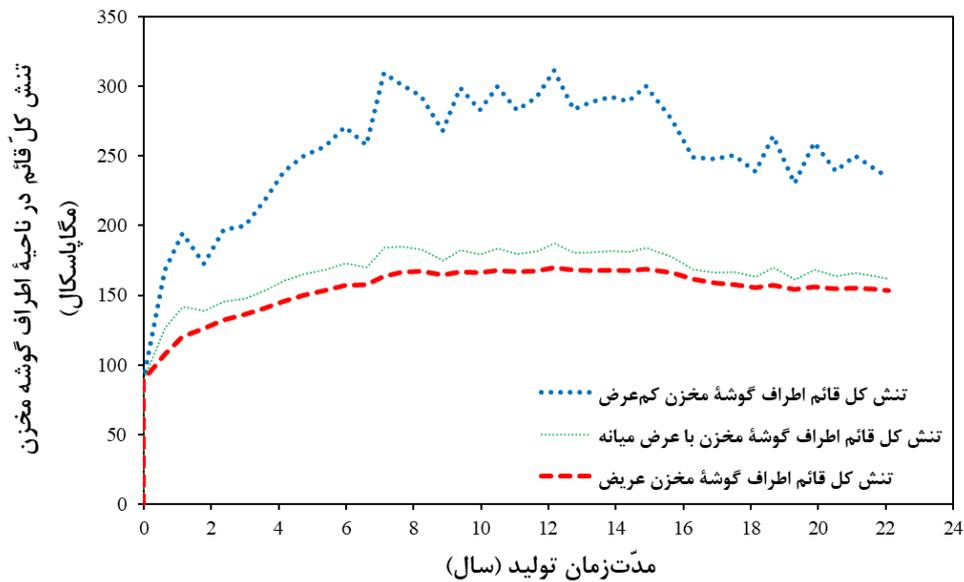
این مطلب به نحوی دیگر نقش پدیده قوس‌زدگی را به عنوان عامل اصلی تغییر در میدان تنش‌های کل اطراف مخزن در حال تخلیه آشکار می‌کند. بدین معنی که اگر با کاهش پهناهای مخزن از یک مخزن عریض به مخزنی با عرض میانه، کاهش چندانی در مقادیر تنش کل قائم وارد بر سقف مخزن با عرض میانه در طول ۲۲ سال تولید نسبت به مخزن عریض رخ نداده، افزایش قابل توجهی هم در مقادیر تنش کل قائم ناحیه اطراف گوشه‌های مخزن با عرض میانه در مقایسه با مخزن با وسعت جانبی بالاتر اتفاق نیافتاده است.

در بخش پیش‌گفتار گفته شد که عوامل مختلفی می‌توانند در تغییر تنش‌های کل افقی نقش داشته باشند. در اثر نشست که در ناحیه سقف مخزن به دلیل وقوع پدیده تحکیم رخ می‌دهد، لایه‌های سنگی بالای سقف مخزن از این تغییر شکل اثر گرفته و در این نواحی تمرکز تنش افقی تغییر می‌کند. افت تراز سقف مخزن می‌تواند اثر کاهشی بر تنش‌های کل افقی لایه‌های بالای شانه‌های سقف مخزن داشته باشد، و سبب افزایش تنش‌های کل افقی بالای تاج سقف مخزن شود. دیگر عامل اثرگذار در تغییر تنش‌های کل افقی، افت فشار سیال منفذی سنگ مخزن، کاهش تنش‌های کل افقی آن ناحیه، و بازتوزیع تنش کاهش‌یافته در نواحی بالا و پایین مخزن به دلیل اندرکنش میان سنگ ناحیه در حال تخلیه و سنگ پیرامون آن می‌باشد. علاوه بر این، تغییر تمرکز تنش به دلیل تغییر در تنش کل قائم می‌تواند سبب وقوع تغییر در تنش‌های کل افقی شود.

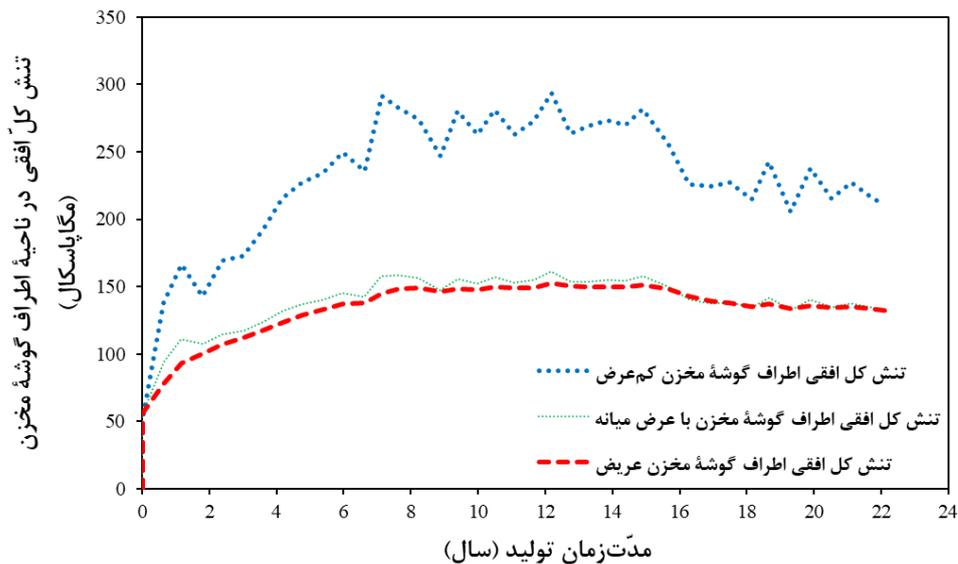
با مقایسه شکل ۱۱ و شکل ۱۲، با توجه به اینکه روند تغییر در تنش کل افقی حداقل، مشابه با روند تغییر تنش کل قائم می‌باشد، می‌توان چنین برداشت نمود که از بین سه عامل فوق، تغییر در تنش کل قائم در اثر فرآیند تولید می‌تواند بیشترین تأثیر را در مقدار تنش‌های کل افقی داشته باشد.



شکل ۱۰. مقایسه نحوه تغییر در مقدار تنش کل قائم اثرگذار بر سقف سه مخزن با پهنای متفاوت در طول تولید.



شکل ۱۱. مقایسه شدت تأثیر پدیده قوس زدگی و انتقال تنش به جوانب در سه مخزن با پهنای متفاوت.



شکل ۱۲. شباهت نحوه تغییر در مقدار تنش کل افقی حداقل اطراف گوشه مخازن با پهنای متفاوت با روند تغییر تنش کل قائم این ناحیه در اثر عملیات استخراج.

سنگ مخزن بسیار کوچکتر از سختی اولیه سنگ اطراف باشد، تراکم بسیار کمی در سنگ مخزن رخ می‌دهد. چنین رویدادی می‌تواند به دلیل انتقال تنش قابل ملاحظه از ناحیه بالای سقف مخزن به جوانب پایدارتر و سخت‌تر آن باشد. دیده می‌شود که در حالتی که سختی‌های اولیه دو محیط سنگی مذکور یکسان و برابر با ۵۰ گیگاپاسکال باشند، بازتوزیع تنش به میزان متفاوتی رخ داده و نسبت به حالت پیشین (سختی اولیه بسیار کمتر سنگ مخزن در مقایسه با سنگ پیرامونی) سهم بیشتری از تنش کل قائم به سنگ مخزن تعلق گرفته، و در نتیجه تراکم بیشتری هم در آن اتفاق افتاده است. با این حال، به نظر می‌رسد در این حالت که سختی‌های اولیه برابر باشند، با وقوع افت پایداری در سنگ سقف مخزن ناشی از افت فشار سیال منفذی، همچنان انتقال تنش قابل توجهی از این ناحیه به ناحیه اطراف گوشه‌های مخزن وجود دارد. چرا که میزان تراکم قائم رخ داده اختلاف فاحشی با تراکم قائم حالت پیشین ندارد. می‌توان چنین تفسیر نمود که در حالتی که سختی‌های اولیه برابرند، ناحیه‌ای که در طول تولید از پایداری نسبی بیشتری برخوردار باشد سهم بیشتری از تنش بازتوزیع شده را به خود اختصاص می‌دهد. در شرایطی هم که سختی اولیه سنگ مخزن به مراتب بزرگتر از سختی اولیه سنگ پیرامونی

در دو مسئله مورد بررسی پژوهش حاضر، روند تغییر تنش کل افقی حداقل در نواحی اطراف مخازن کاملاً مطابق با نحوه تغییر تنش کل قائم در این نواحی بوده است. به منظور پرهیز از تکرار فقط در این زیربخش نمودار تغییرات تنش کل افقی ارائه گردیده است.

۲.۵. اثر "اختلاف سختی اولیه" سنگ مخزن و

سنگ محیط اطراف آن بر تغییر تنش کل قائم

۱.۲.۵. مقایسه مقادیر فرونشست سطحی مخزن ناشی از تراکم قائم آن در سه اختلاف سختی اولیه مختلف

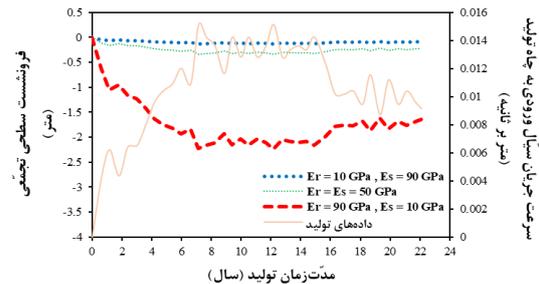
در بخش مطالعات پیشین به نظر برخی از محققین در خصوص تأثیر اختلاف سختی میان سنگ مخزن و سنگ پیرامون آن در شدت وقوع پدیده قوس زدگی تنش پرداخته شد. یافته‌ها حاکی از آن بود که هر قدر سختی سنگ محیط اطراف بیشتر از سختی سنگ مخزن باشد، تغییر در میدان تنش‌های کل اطراف مخزن با شدت بیشتری روی می‌دهد. به هنگام بازتوزیع تنش در اثر وقوع افت پایداری در ناحیه سقف مخزن، تسهیم تنش در محدوده اثرپذیر از فرآیند تولید بر اساس میزان سختی و پایداری نواحی انجام می‌شود. در شکل ۱۳، مشاهده می‌شود در حالتی که سختی اولیه

۳،۲،۵. مقایسه میزان تغییر تنش کل قائم در ناحیه بالای سقف مخزن در سه اختلاف سختی اولیه مختلف با توجه به شکل ۱۵، می‌توان دریافت تفسیرهایی که در زیربخش پیشین مبنی بر دلیل تفاوت میزان فرونشست سطحی (شکل ۱۳) ناشی از فرآیند استخراج از مخزن در سه حالت مختلف سختی اولیه سنگ مخزن و محیط سنگی پیرامون آن ارائه گردید، صحت داشته‌اند.

در شرایطی که سختی اولیه سنگ مخزن یک‌نهم سختی اولیه سنگ پیرامونی باشد، قابل مشاهده است که به دلیل کاسته شدن از پایداری سنگ ناحیه سقف مخزن در اثر افت فشار سیال منفذی مخزن و همچنین به دلیل سختی به مراتب پایین‌تر سنگ مخزن، کاهش شدیدی در مقدار تنش کل قائم که بر سقف مخزن اثر می‌کند، رخ داده‌است. اگر مقدار مطلق سختی اولیه سنگ مخزن بزرگتر (۵۰ گیگاپاسکال)، و همچنین با سختی اولیه محیط سنگی اطراف یکسان باشد، بازتوزیع تنش با نسبت متفاوتی در مقایسه با حالت قبل صورت گرفته‌است، و سنگ ناحیه سقف مخزن تنش کل قائم نسبتاً بیشتری را متحمل می‌شود. بدین معنی که در حالت دوم، افت کمتری در مقدار تنش کل قائم وارد بر سقف مخزن در طول تولید روی داده‌است. در شرایطی که سختی اولیه سنگ مخزن به مراتب فراتر از سختی سنگ اطراف خود باشد، تنش کل قائم بسیار بزرگتری بر سنگ سقف مخزن اثر کرده و با اثر کاهنده کمتری از سوی پدیده قوس‌زدگی تنش روبرو بوده‌است.

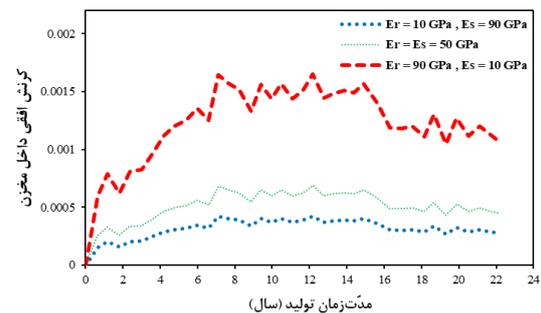
۴،۲،۵. مقایسه میزان تغییر تنش کل قائم در اطراف گوشه‌های مخزن در سه اختلاف سختی اولیه مختلف به منظور سنجش نقش پدیده قوس‌زدگی در تغییر تنش کل قائم بالای سنگ سقف مخزن، تغییر این تنش در ناحیه اطراف گوشه‌های مخزن مورد بررسی قرار گرفته‌است. با مقایسه شکل ۱۵ و شکل ۱۶، دیده می‌شود که در حالتی که سنگ مخزن بسیار نرم‌تر از سنگ اطراف خود باشد، بیشترین کاهش در تنش کل قائم اثرگذار بر سقف آن رخ داده، و در نتیجه آن، تنش کل قائم ناحیه اطراف گوشه‌های همان مخزن متحمل شدیدترین افزایش شده‌است. در طرف مقابل، در حالتی که سنگ مخزن بسیار سخت‌تر بوده‌است، کمترین تغییر در تنش کل قائم محیط اطراف مخزن در حال تخلیه مشاهده گردیده‌است.

باشد، میزان تراکمی که در ناحیه در حال تخلیه روی می‌دهد، بسیار فراتر از دو حالت پیشین می‌باشد. دلیل این موضوع آن است که آنقدر سختی پیش از آغاز تولید سنگ مخزن بزرگتر از سنگ اطراف می‌باشد که حتی در صورت کاهش پایداری در اثر فرآیند تولید در این ناحیه، تنش کل قائم بسیار کمتری به سنگ اطراف گوشه‌های مخزن منتقل می‌شود.

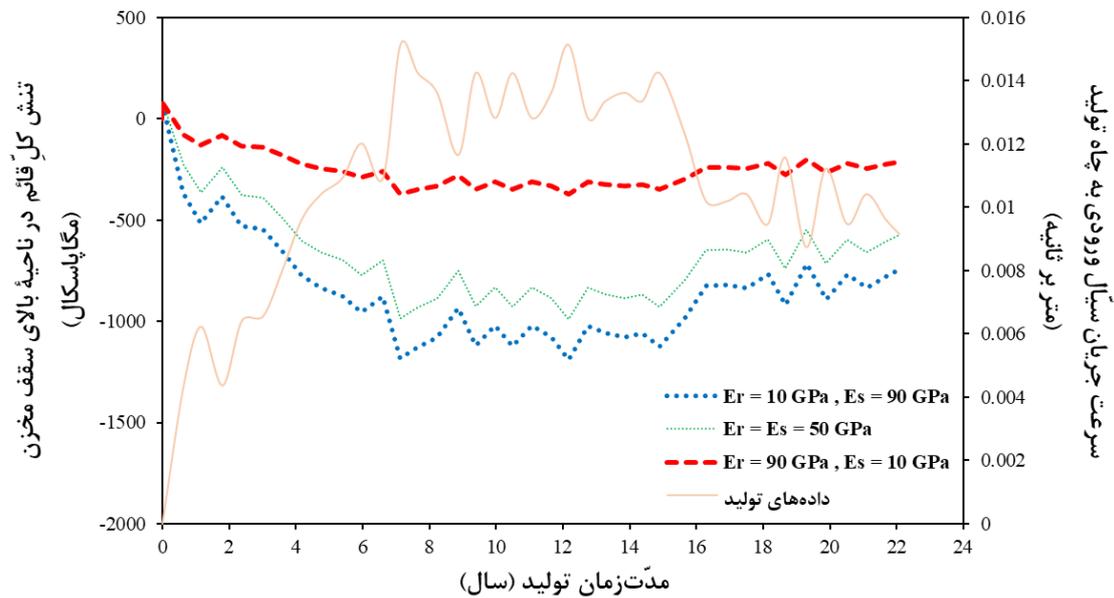


شکل ۱۳. مقایسه میزان تراکم قائم رخ داده در مخزن در سه حالت نسبی مختلف سختی اولیه سنگ مخزن و سختی سنگ پیرامون آن.

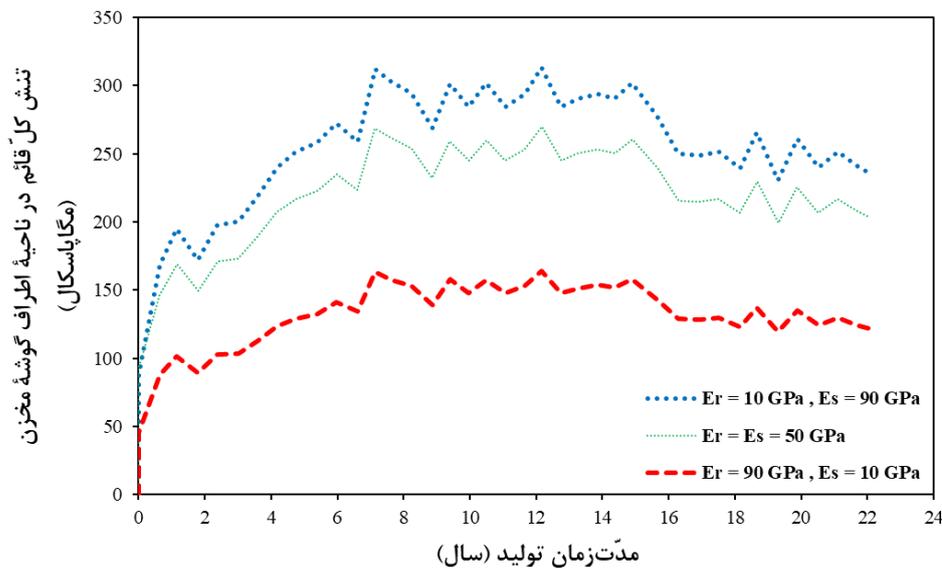
۲،۲،۵. مقایسه مقادیر کرنش افقی داخل مخزن ناشی از تراکم جانبی آن در سه اختلاف سختی اولیه مختلف با توجه به شکل ۱۴، تفاوت در میزان تراکمی که به صورت افقی در داخل مخزن میان سه حالت مختلف سختی اولیه نسبی سنگ مخزن و سنگ اطراف آن وجود دارد، با اختلافی که در میزان تراکم قائم مخزن در سه حالت مذکور به چشم می‌خورد (شکل ۱۳)، همخوانی دارد.



شکل ۱۴. مقایسه انقباض افقی داخل مخزن در سه حالت مختلف نسبت سختی اولیه سنگ مخزن و سنگ اطراف.



شکل ۱۵. متفاوت بودن شدت تغییر در تنش کل قائم ناحیه بالای سقف مخزن در سه حالت مختلف سختی اولیه سنگ مخزن و محیط سنگی اطراف آن.



شکل ۱۶. تفاوت در میزان افزایش تنش کل قائم ناحیه اطراف گوشه‌های مخزن در شدت‌های مختلف پدیده قوس‌زدگی تنش.

۶. نتیجه‌گیری

این مقاله به بررسی تغییر میدان تنش‌های کل در اثر تولید در سنگ اطراف مخازن نفت و گاز زیرزمینی پرداخته و اهمیت آن را در جنبه‌های مختلف بازگو می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر نشان می‌دهد که در اثر استخراج نفت از مخازن زیرزمینی، میدان تنش‌های کل دچار تغییر می‌شود. با پیشرفت عملیات تولید، فشار سیال منفذی در ناحیه در حال تخلیه تدریجاً دچار افت شده و با افزایش تنش مؤثر و وقوع پدیده تحکیم، سقف مخزن به تدریج شروع به نشست می‌کند. به‌مانند یک تونل حفر شده در عمق زمین که سقف آن پیشتر بر لایه‌هایی که بعداً برداشته شده متکی بوده‌است و پس از حفاری بخشی از وزن روباره تونل به جوانب پایدارتر در اطراف تونل منتقل می‌شود، در اثر تراکمی که در محدوده مخزن در حال تخلیه روی می‌دهد، سقف مخزن نیز به دلیل اتکای ناکافی و افت پایداری ظرفیت سابق را در تحمل وزن روباره نخواهد داشت. در نتیجه، بازتوزیع تنش رخ داده و در اثر پدیده قوس‌زدگی بخشی از وزن وارده بر سقف مخزن (روباره) به جوانب مخزن که پایداری بیشتری دارند منتقل می‌شود.

در پژوهش حاضر، مشاهده گردید که هر قدر مسیر انتقال تنش از ناحیه بالای سقف مخزن به گوشه‌های آن کوتاه‌تر باشد، شدت انتقال تنش بیشتر می‌شود. در صورتی که مخزن پهنای کمی داشته باشد، در اثر کاهش پایداری در سقف مخزن، نحوه اتکای مصالح در محدوده بالای مخزن به‌گونه‌ای تغییر می‌کند که تنش به جوانب پایدارتر مخزن انتقال داده شود. اما اگر وسعت جانبی مخزن زیاد باشد، انتقال تنش از ناحیه به‌تازگی ناپایدار شده به نواحی پایدارتر دشوارتر خواهد بود. در نتیجه، تغییر چندانی در میدان تنش‌های کل (به‌ویژه تنش کل قائم) رخ نمی‌دهد. همچنین، نشان داده شد که هر قدر اختلاف میان سختی اولیه سنگ مخزن و محیط سنگی پیرامون آن بیشتر باشد، به‌گونه‌ای که ناحیه مخزن شامل توده سنگی به‌مراتب نرم‌تری در مقایسه با سنگ اطراف خود باشد، اثر پدیده قوس‌زدگی تنش تشدید می‌شود. در مقابل، هر قدر که سختی اولیه سنگ مخزن به سختی اولیه سنگ پیرامون خود نزدیک شده و حتی از آن فراتر رود، از شدت تغییر در میدان تنش‌های کل در محیط اطراف مخزن کاسته می‌شود تا اینکه در شرایط وجود مخزنی به‌مراتب

سخت‌تر از محیط اطراف آن، این تغییرات تقریباً ناچیز می‌شوند.

۷. فهرست نمادها

| نماد | واحد | شرح |
|------------------|------|-----------------------------------|
| γ_h | - | ضریب مسیر تنش کل افقی حداقل |
| γ_v | - | ضریب مسیر تنش کل قائم |
| $\Delta\sigma_h$ | Pa | تغییر تنش کل افقی حداقل |
| $\Delta\sigma_v$ | Pa | تغییر تنش کل قائم |
| ΔP_p | Pa | تغییر فشار سیال منفذی |
| α | - | ضریب پوروالاستیسیته بیو (Biot) |
| ν_{fr} | - | ضریب پواسون زهکشی شده |
| e | - | نسبت ابعادی (ضخامت به پهنای) مخزن |

۸. مراجع

- [1] Fjaer, E., Holt, R. M., Horsrud, P., & Raaen, A. M. (2008). *Petroleum related rock mechanics*. Elsevier.
- [۲] طاهری، س. ر.، پاک، ع.، و شاد، س. (۱۳۹۷). مطالعه و بررسی توزیع زمانی و مکانی فرونشست زمین در فرآیند برداشت از میدان نفتی کوپال، نشریه پژوهش نفت، ۴، ۱۰۱ تا ۱۶.
- [3] Dusseault, M. B., Bruno, M. S., & Barrera, J. (2001). Casing shear: causes, cases, cures. *SPE Drilling & Completion*, 16(02), 98-107.
- [4] Holt, R. M., Flomes, O., Li, L., & Fjær, E. (2004, June). Consequences of depletion-induced stress changes on reservoir compaction and recovery. In *Gulf rocks 2004, the 6th north America rock mechanics symposium (NARMS)*. OnePetro.
- [5] Taherynia, M. H., Fatemi Aghda, S. M., Fahimifar, A., & Koopialipoor, M. (2022). Investigation of Stress Arching Above Depleting Hydrocarbon Reservoirs and Its Effect on the Compaction Drive Mechanism. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(1), 259-272.
- [6] Settari, A. (2002). Reservoir compaction. *Journal of petroleum technology*, 54(08), 62-69.

- [19] Geertsma, J. (1973). Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs. *Journal of petroleum technology*, 25(06), 734-744.
- [20] Eshelby, J. D. (1957). The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. *Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences*, 241(1226), 376-396.
- [21] Segall, P., Grasso, J. R., & Mossop, A. (1994). Poroelastic stressing and induced seismicity near the Lacq gas field, southwestern France. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B8), 15423-15438.
- [22] Rudnicki, J. W. (1999, August). Alteration of regional stress by reservoirs and other inhomogeneities: stabilizing or destabilizing?. In 9th ISRM Congress. *OnePetro*.
- [23] Rudnicki, J. W. (2020). Eshelby transformations, pore pressure and fluid mass changes, and subsidence. In *Poromechanics II* (pp. 307-312). CRC Press.
- [24] Soltanzadeh, H., & Hawkes, C. D. (2007, May). Predicting the stress changes induced by fluid production and injection in porous reservoirs. In 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium. *OnePetro*.
- [25] Soltanzadeh, H., & Hawkes, C. D. (2008). Semi-analytical models for stress change and fault reactivation induced by reservoir production and injection. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 60(2), 71-85.
- [26] Morita, N., Whitfill, D. L., Nygaard, O. A., & Bale, A. (1989). A quick method to determine subsidence, reservoir compaction, and in-situ stress induced by reservoir depletion. *Journal of Petroleum Technology*, 41(01), 71-79.
- [27] Mulders, F. M. M. (2003). Modelling of stress development and fault slip in and around a producing gas reservoir.
- [28] Li, S., Sauer, R. A., & Wang, G. (2007a). The Eshelby tensors in a finite spherical domain—part I: theoretical formulations.
- [29] Li, S., Wang, G., & Sauer, R. A. (2007b). The Eshelby tensors in a finite spherical domain—Part II: applications to homogenization.
- [7] Goult, N. R. (2003). Reservoir stress path during depletion of Norwegian chalk oilfields. *Petroleum Geoscience*, 9(3), 233-241.
- [8] Segall, P., & Fitzgerald, S. D. (1998). A note on induced stress changes in hydrocarbon and geothermal reservoirs. *Tectonophysics*, 289(1-3), 117-128.
- [9] Bruno, M. S. (1992). Subsidence-induced well failure. *SPE Drilling Engineering*, 7(02), 148-152.
- [10] Segall, P. (1985). Stress and subsidence resulting from subsurface fluid withdrawal in the epicentral region of the 1983 Coalinga earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B8), 6801-6816.
- [11] Dusseault, M. B. (2011). Geomechanical challenges in petroleum reservoir exploitation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4), 669.
- [12] Asaei, H., Moosavi, M., & Aghighi, M. A. (2018). A laboratory study of stress arching around an inclusion due to pore pressure changes. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(4), 678-693.
- [13] Segura, J. M., Fisher, Q. J., Crook, A. J. L., Dutko, M., Yu, J. G., Skachkov, S., ... & Kendall, J. M. (2011). Reservoir stress path characterization and its implications for fluid-flow production simulations.
- [14] Wang, F., Li, X., Couples, G., Shi, J., Zhang, J., Tepinhi, Y., & Wu, L. (2015). Stress arching effect on stress sensitivity of permeability and gas well production in Sulige gas field. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 125, 234-246.
- [15] Soltanzadeh, H., & Hawkes, C. D. (2009). Induced poroelastic and thermoelastic stress changes within reservoirs during fluid injection and production. *Poros media: heat and mass transfer, transport and mechanics*, 2009, 27-57.
- [16] Teufel, L. W., Rhet, D. W., & Farrell, H. E. (1991, July). Effect of reservoir depletion and pore pressure drawdown on in situ stress and deformation in the Ekofisk field, North Sea. In *The 32nd US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. *OnePetro*.
- [17] Salz, L. B. (1977, October). Relationship between fracture propagation pressure and pore pressure. In *SPE annual fall technical conference and exhibition*. *OnePetro*.
- [18] Yerkes, R. F., & Castle, R. O. (1976). Seismicity and faulting attributable to fluid extraction. *Engineering Geology*, 10(2-4), 151-167.

[۳۰] پژوهشکده بالادستی نفت دانشگاه صنعتی شریف. (۱۳۹۶). شناخت مسئله، تجزیه و تحلیل اطلاعات، گزارش تاریخچه تولید، پروژه افزایش ضریب بازیافت مخزن بنگستان میدان کوپال با روش‌های فناوریانه پایه‌آبی/گازی، کارفرما: شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب.

[31] Mehrgini, B., Memarian, H., Dusseault, M. B., Eshraghi, H., Goodarzi, B., Ghavidel, A., ... & Hassanzadeh, M. (2016). Geomechanical characterization of a south Iran carbonate reservoir rock at ambient and reservoir temperatures. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 269-279.

[32] Wang, W. (2011). Reservoir characterization using a capacitance resistance model in conjunction with geomechanical surface subsidence models (Doctoral dissertation).

[33] Ketelaar, V. G. (2009). Satellite radar interferometry: Subsidence monitoring techniques (Vol. 14). Springer Science & Business Media.