

## مدل سازی فرونشست میدان پارس جنوبی با روش های تحلیلی و نیمه تحلیلی

سید محمود فاطمی عقدا<sup>۱\*</sup>، اکبرقاضی فرد<sup>۲</sup>، محمدحسین طاهری نیا<sup>۱</sup>

پذیرش مقاله: ۹۲/۱۰/۰۴

دریافت مقاله: ۹۱/۱۲/۰۳

### چکیده

برداشت از مخازن نفت و گاز افت فشار منفذی این مخازن را به دنبال خواهد داشت و در نتیجه میزان فشار مؤثر ناشی از وزن سنگ های روبروی مخزن افزایش یافته و باعث تراکم مخزن می گردد. در صورتی که میزان تراکم سنگ مخزن از حد معینی فراتر رود سنگ های روبروی در اثر وزن خود شروع به فرونشست خواهند کرد. با توجه به اهمیت میدان گازی پارس جنوبی و مشترک بودن این میدان بین ایران و قطر، محاسبه و مدل سازی فرونشست سطح میدان که می تواند تأثیر بسزایی در عملیات بهره برداری از این میدان داشته باشد از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش ابتدا با استفاده از تئوری تراکم تک محوره، تراکم مخزن پارس جنوبی در انتهای دوره برداشت محاسبه شده و سپس با استفاده از روش مدل سازی تحلیلی و نیمه تحلیلی (با استفاده از نرم افزار AEsubs) فرونشست ایجاد شده در سطح میدان در اثر تراکم مخزن تعیین گردید. بر اساس مطالعات انجام شده مقدار تراکم مخزن پارس جنوبی در پایان دوره برداشت در حدود ۰/۵ متر و بیشینه فرونشست ایجاد شده در سطح این میدان بر اساس دو روش مدل سازی بیش از ۰/۶ متر برآورد گردیده است.

**کلید واژه ها:** فرونشست، میدان پارس جنوبی، مدل سازی، سنگ مخزن، مراکز کرنش

۱. گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران fatemi@khu.ac.ir

۲. گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

پیش‌بینی خطرات زمین‌شناسی احتمالی که در طول احداث و بهره‌برداری از یک پروژه آن را تهدید می‌کند از اهمیت بالایی برخوردار است. در بسیاری موارد درحالی‌که پیش‌بینی و جلوگیری از وقوع این خطرات نیازمند صرف وقت و هزینه‌ی بسیار پائینی است عدم توجه کافی و برنامه‌ریزی اصولی خسارت‌های مالی و جانی جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته است. در پروژه‌های عظیم نفتی با توجه به اهمیت زیاد آنها در اقتصاد و توسعه‌ی کشور ضرورت انجام این مطالعات بیش از پیش آشکار می‌گردد. یکی از مخاطرات رخ داده در میداین مختلف سراسر دنیا که تأثیر بسزایی در عملکرد میدان داشته و در برخی موارد باعث ایجاد خسارت‌های بسیار سنگینی شده است، فرونشست سطح میدان می‌باشد. برطبق تعریف انستیتو زمین‌شناسی ایالات متحده، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابه‌جایی افقی اندکی باشد (Poland et al., 1972). یکی از مثال‌های شناخته شده از فرونشست میداین هیدروکربنی میدان اکوفیسک (Ekofisk) در کشور نروژ است. بستر دریا در زیر سکو ایکوفیسک در سال ۱۹۸۴ بیش از ۳/۵ متر فرونشست کرد، و باز گرداندن سکو به حالت قبل ۱ میلیارد دلار آمریکا هزینه در پی داشت (Sulak, 1991). فرونشست این میدان در پایان سال ۲۰۰۰ به ۶/۷ متر رسید (Hermansen et al., 2000). وسعت جام فرونشست ایجاد شده در این میدان برابر با ۵۰ کیلومتر مربع و حجم توده‌ی سنگی سرباره‌ی جابه‌جا شده در حدود ۱۵۰ کیلومتر مکعب گزارش گردیده است (Marte et al., 1994). تراکم میدان دولومیتی کالیفرنیا باعث شکست چاه‌های حفر شده گردید، که تعداد آن‌ها در برخی موارد به ۲۰ الی ۳۰ درصد از کل تعداد چاه‌های حفر شده در میدان می‌رسد (Settari, 2002). بهره‌برداری از میدان نفتی ویلمینگتون در لانگ بیچ (Long Beach) کالیفرنیا باعث ایجاد فرونشستی در حدود ۸/۸ متر گردید (Kosloff et al., 1980). خسارات ایجاد شده در اثر این فرونشست بیش از یکصد میلیون دلار برآورد گردیده است (Zeitoun and Wakshal,

2013) با توجه به اینکه در بسیاری از موارد میدان‌های هیدروکربنی در مناطق ساحلی قرار دارند فرونشست این میداین می‌تواند باعث ایجاد سیل و زیر آب رفتن این مناطق گردد. فرونشست ایجاد شده در سال ۱۹۸۰ در میدان‌های نفتی سواحل شرقی دریاچه ماراکایبو (Maracaibo) در کشور ونزوئلا باعث زیر آب رفتن بیش از  $450 \text{ km}^2$  از زمین‌های ساحلی این دریاچه گردیده است (Atefi Monfared, 2009). بهره‌برداری از میدان گازی گرونینگن (Groningen) در کشور هلند منجر به ایجاد ۲۴/۵ سانتی‌متر فرونشست در سطح زمین در سال ۲۰۰۳ (Schoustra, 2004) گردید. اگرچه مقدار فرونشست گزارش شده در این میدان بسیار اندک به نظر می‌رسد، اما با توجه به اینکه مناطق وسیعی در کشور هلند پایین‌تر از سطح دریا قرار داشته و توسط سدها محافظت می‌گردند، این فرونشست کوچک می‌تواند به فاجعه‌ای بزرگ منجر شود (Nagel, 2001).

همچنین تراکم مخزن و فرونشست سطح میدان می‌تواند باعث تشکیل و توسعه شکستگی‌هایی در پوش‌سنگ گردد که نهایتاً منجر به از دست رفتن قابلیت نگهدارندگی پوش‌سنگ و ایجاد مسیرهایی برای نشت نفت و گاز گردد (Gurevich and Chilingarian, 1995).

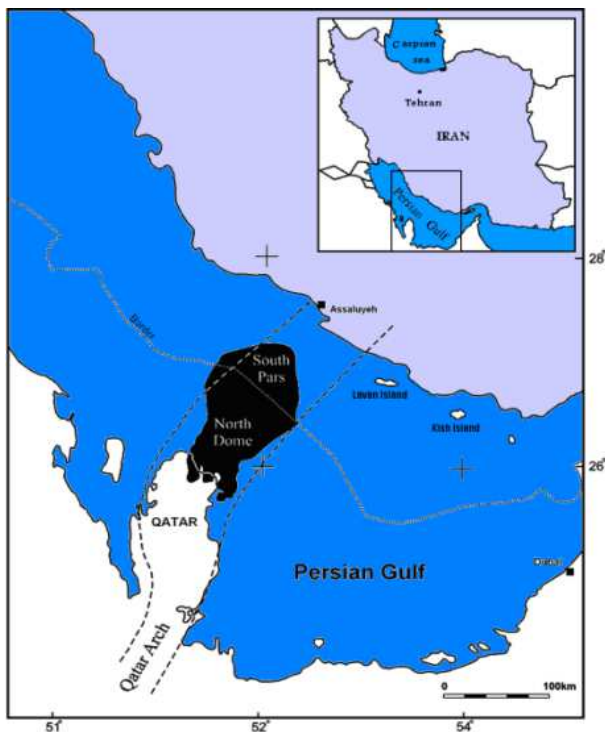
اولین قدم برای پیش‌بینی فرونشست سطح یک میدان برآورد میزان تراکم مخزن آن است. به‌طورکلی، میزان تراکم مخزن تابعی از افت فشار ایجاد شده در مخزن، تراکم‌پذیری سنگ مخزن و ضخامت مخزن (ارتفاع زون مورد استخراج) است. گام بعدی برای تعیین فرونشست یک میدان مدل‌سازی از اثر تراکم مخزن در سطح میدان است. تا کنون روش‌های مختلفی جهت مدل‌سازی فرونشست میدان ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به مدل تحلیلی مراکز کرنش ارائه شده توسط Geertsma (1973) اشاره نمود. هر چند با استفاده از این مدل می‌توان تخمین قابل قبولی از فرونشست میدان به دست آورد، ولی این مدل توانایی شبیه‌سازی کامل شرایط ژئومکانیکی مخزن و لایه‌های سرباره‌ی آن را ندارد. از این‌رو در سال‌های اخیر روش‌های عددی مختلفی جهت مدل‌سازی فرونشست

### ۳. محاسبه‌ی تراکم مخزن

تئوری تراکم تک‌محوره، تئوری پذیرفته شده در محاسبه‌ی تراکم مخزن میباشد. براساس این تئوری تراکم مخزن فقط در اثر کاهش ارتفاع آن رخ داده و ابعاد جانبی مخزن در طول تراکم آن ثابت باقی خواهند ماند (Geertsma, 1973). میزان تراکم مخزن و یا به عبارتی کاهش ارتفاع آن ( $\Delta h$ ) برابر است با:

$$\Delta h = HCm \alpha \Delta p \quad (1)$$

در این رابطه H ارتفاع اولیه‌ی مخزن، Cm ضریب تراکم تک‌محوره‌ی سنگ مخزن،  $\Delta p$  کاهش فشار مخزن و  $\alpha$  ضریب بیوت (Biot) سنگ مخزن می باشد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی میدان پارس جنوبی

ضریب تراکم‌پذیری تک محوره بیان‌کننده‌ی میزان تراکم واحد ارتفاع سنگ مخزن به ازای واحد افت فشار است و معمولاً برحسب  $cm^2/kg$  بیان می‌گردد. ضریب تراکم‌پذیری به عواملی مختلفی همچون نوع سنگ، درجه سیمانی شدگی، تخلخل و عمق دفن شدگی سنگ وابسته است. ضریب تراکم‌پذیری مخزن را می‌توان به طور مستقیم از آزمایش ادیومتری و یا به

میدان هیدروکربنی ارائه شده است (Fredrich et al., 2000; Sroka and Hejmanowski, 2006). استفاده از روش‌های عددی نیازمند دسترسی به اطلاعات کامل و دقیق از مخزن و سرباره آن بوده و بسیار زمانبر می‌باشند. با توجه به نقاط ضعف و قوت روش مدل‌سازی تحلیلی (دارای دقت پایین ولی بسیار ساده) و روش مدل‌سازی عددی (با دقت بالا و در مقابل پیچیدگی بالا)، (Fokker and Orlic, 2006) روش مدل‌سازی نیمه تحلیلی را ارائه نمودند. این روش قابلیت مدل‌سازی محیط چندلایه با خصوصیات ژئومکانیکی مختلف را دارا بوده و از طرف دیگر بسیار ساده‌تر از روش عددی می‌باشد.

با توجه به اهمیت میدان گازی پارس جنوبی و در نتیجه ضرورت پیش‌بینی هرگونه رخداد تأثیرگذار بر عملیات بهره‌برداری از این میدان، در این مقاله به بررسی و مدل‌سازی فرونشست احتمالی این میدان در پایان دوره‌ی برداشت پرداخته شده است. در این راستا ابتدا میزان تراکم مخزن پارس جنوبی بر اساس خصوصیات ژئومکانیکی لایه‌های مخزنی این میدان تعیین شده و سپس با استفاده از دو روش تحلیلی و نیمه تحلیلی فرونشست این میدان مدل‌سازی گردیده است.

### ۲. وضعیت زمین‌شناسی میدان پارس جنوبی

میدان گازی پارس جنوبی در فاصله ۱۰۵ کیلومتری جنوب غربی بندر عسلویه در موقعیت جغرافیایی ۵۲ تا ۵۲/۵ درجه شرقی و ۲۶/۵ تا ۲۷ درجه شمالی در خلیج فارس قرار دارد. این میدان دارای مساحتی در حدود ۹۷۰۰ کیلومترمربع است که حدود ۳۷۰۰ کیلومترمربع آن در آب‌های جمهوری اسلامی ایران واقع شده است. موقعیت جغرافیایی این میدان در شکل ۱ نشان داده شده است. از دیدگاه زمین‌شناسی این میدان در پهنه‌ی زاگرس واقع شده و دو سازند دالان و کنگان به سن پرمین-تریاس مخزن و سازند دشتک به سن تریاس پسین پوش سنگ این میدان را می‌سازد.

با توجه به جدول ۱ میزان تراکم کل مخزن در پایان دوره برداشت تقریباً برابر با ۰/۵ متر می‌باشد.

جهت مقایسه، ضریب تراکم‌پذیری تک‌محوره‌ی مخزن گرونینگن در حدود  $0.45 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$  تا ۰/۷۵ و ضخامت متوسط این مخزن ۱۷۰ متر گزارش شده است. فشار اولیه‌ی مخزن گرونینگن ۳۴/۷ MPa بوده که در اثر برداشت در سال ۲۰۰۵ به ۱۲/۵ MPa رسید. بنابراین، میزان تراکم این مخزن بین ۱۷ و ۲۸ سانتی‌متر است. بیشنه فرونشست ثبت شده در سطح این میدان در سال ۲۰۰۵ در حدود ۲۵ سانتی‌متر گزارش گردیده است (Ketelaar, 2009).

#### ۴. مدل‌سازی فرونشست میدان با استفاده از روش تحلیلی

برای به دست آوردن برآورد کلی از فرونشست، دانستن چگونگی گسترش تغییر شکل حاصل از تراکم مخزن در سراسر سرباره و محیط احاطه‌کننده‌ی آن ضروری می‌باشد. اولین تلاش برای رسیدن به یک آنالیز ریاضی برای مدل‌سازی فرونشست ناشی از تخلیه‌ی مخازن گاز و نفت توسط McCann and Wilts (1951) صورت گرفت. هدف این مطالعات مدل‌سازی فرونشست میدان ویلمینگتون بود. این محققان نتایج حاصل از دو مدل مراکز کشش و مدل گیره‌ی عمودی (شکل ۲ مدل مراکز کشش را نشان می‌دهد) را مورد بررسی قرار دادند. هر دو مدل بر اساس رفتار الاستیک خطی ارائه گردیده بود. مقایسه‌ی نتایج حاصل از این مدل با مشاهدات میدانی مشخص ساخت که مدل مراکز کشش نشان‌دهنده‌ی تصویری دقیقاً همانند رفتار میدان است، در حالیکه مدل گیره‌ی عمودی نتایج قابل قبولی را به همراه ندارد. لیکن این محققان نتوانستند توضیح قابل قبولی برای توجیه شباهت مدل مراکز کشش به رفتار طبیعی ارائه کنند و محاسبات نادرستی را با استفاده از مدل مراکز کشش پایه‌گذاری کردند. Geertsma (1973) مدل مراکز کشش ارائه شده توسط McCann and Wilts (1951) را مورد بازبینی قرار داد و یک مدل بسیار کارآمد به نام مدل مراکز کرنش را برای مدل‌سازی فرونشست حاصل از تراکم مخزن ارائه نمود. ایده‌ی

صورت غیرمستقیم با استفاده از مدول‌های الاستیسیته سنگ مخزن (با فرض رفتار پروالاستیک مخزن و عدم ایجاد تغییر شکل پلاستیک) با استفاده از رابطه ۲ (Fjær et al., 2008) محاسبه نمود:

$$C_m = \frac{1}{E} \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (2)$$

در این رابطه E مدول یانگ سنگ مخزن و  $\nu$  ضریب پواسون سنگ مخزن می‌باشد.

ضریب بیوت سنگ مخزن را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ۳ (Detournay and Cheng, 1993) محاسبه نمود:

$$a = 1 - \frac{K_{fr}}{K_s} \quad (3)$$

در این رابطه  $K_{fr}$  مدول بالک چارچوب یا مدول چارچوب (Frame modulus) و  $K_s$  مدول بالک دانه‌های جامد (solid grains) می‌باشد.

مخزن پارس جنوبی دارای لیتوفاسیس‌های متنوع و فراوانی می‌باشد ولی در مجموع ۶ لیتوفاسیس شاخص در این میدان قابل شناسایی می‌باشد. ضریب بیوت، ضریب تراکم‌پذیری تک‌محوره و میزان تراکم این ۶ لیتوفاسیس (در صورت عدم رخداد تغییر شکل پلاستیک) در پایان دوره‌ی برداشت در جدول ۱ ارائه گردیده است. علاوه بر رابطه‌ی ۲، Geertsma (1973) نمودارهایی را جهت تخمین ضریب تراکم‌پذیری تک‌محوره بر مبنای تخلخل سنگ مخزن، عمق و جنس آن ارائه نمود. با استفاده از این نمودارها ضریب تراکم‌پذیری تک‌محوره‌ی مخزن پارس جنوبی در حدود  $0.9 \times 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$  الی ۰/۳ می‌باشد.

#### جدول ۱. ضریب تراکم‌پذیری تک محوره و میزان تراکم

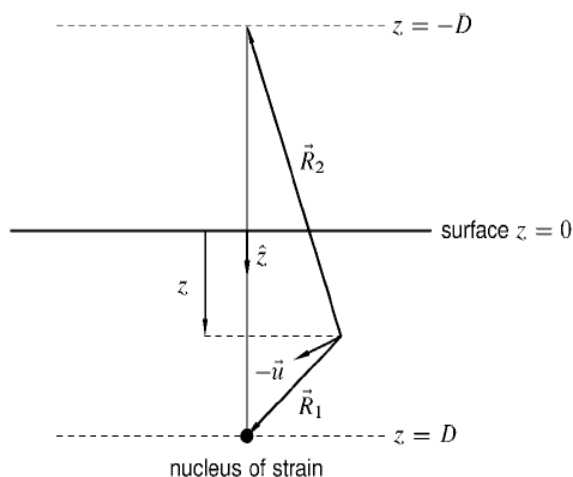
لیتوفاسیس‌های شاخص مخزن	$\alpha$	$C_m (\text{bar}^{-1})$	$\Delta h (\text{m})$
لیتوفاسیس			
گربستون (درشت‌دانه)	۰/۸۹	۰/۰۰۰۰۱۰۷	۰/۰۴۳
مادستون	۰/۸۳	۰/۰۰۰۰۰۲۴	۰/۰۸۷
پکستون (ریزدانه)	۰/۸۲	۰/۰۰۰۰۰۳۱	۰/۰۴
گربستون توده‌ای	۰/۸۵	۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۲۰۱
پکستون (درشت‌دانه)	۰/۹۳	۰/۰۰۰۰۰۷۴	۰/۱۰۱
گربستون (ریزدانه)	۰/۸۷	۰/۰۰۰۰۰۳۸	۰/۰۲۶

مورد نیاز را با استفاده از راه‌حل‌های ترموالاستیسیته در رابطه‌ی ۶ اعمال نمود و این رابطه را به صورت رابطه ۷ کامل نمود:

(۷)

$$u = \frac{Cm}{4\pi} \left( \frac{R_1}{R_1^3} + (3-4\nu) \frac{R_2}{R_2^3} - \frac{6z(z=D)R_2}{R_2^5} + \frac{2z}{R_2^3} \right) [3-4\nu](z+D) - z] V\alpha\Delta p_f$$

هندس و پارامترهای رابطه‌ی فوق در شکل ۳ ارائه گردیده است. عبارت اول این رابطه حاصل از بسط رابطه‌ی ۶ می‌باشد، در صورتی‌که بقیه‌ی عبارات، عبارات الحاقی جهت تأمین تنش عمودی صفر در سطح زمین می‌باشند (Fjær et al., 2008).

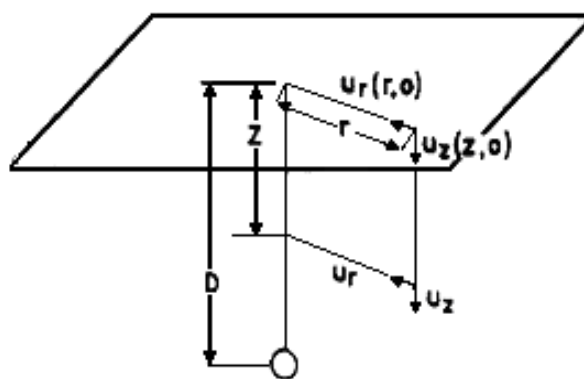


شکل ۳. مدل مراکز کرنش و پارامترهای استفاده شده در رابطه‌ی ۷ (Fjær et al., 2008)

۴-۱. مدل‌سازی فرونشست یک میدان دیسک شکل

بیشینه جابه‌جایی عمودی ممکن در امتداد محور مرکزی میدان رخ خواهد داد. بنابراین تعیین مقدار این جابه‌جایی از اهمیت خاصی برخوردار است. برای تعیین این جابه‌جایی می‌توان مؤلفه‌ی عمودی جابه‌جایی ناشی از تراکم یک المان کروی شکل از مخزن را با استفاده از رابطه‌ی ۷ تعیین و سپس روی مخزن انتگرال‌گیری کرد. در این محاسبات مجموعه‌ای از مراکز کرنش در عمق D فرض می‌شود و برای به دست آوردن نتایج نهایی در ارتفاع مخزن (H) ضرب می‌گردد. نتیجه نهایی این محاسبات به صورت رابطه ۹ می‌باشد:

اصلی این مدل محاسبه‌ی فرونشست حاصل از تراکم یک کره‌ی کوچک، و سپس محاسبه‌ی کل فرونشست میدان با جمع کردن تأثیر تعداد زیادی از این کره‌ها می‌باشد. این مدل محدود به مواردی است که بین خصوصیات الاستیک مخزن و اطراف آن تفاوتی وجود نداشته باشد.



شکل ۲. تصویری شماتیک از مدل مراکز کشش (Geertsma, 1973)

بر طبق مدل مراکز کرنش جابه‌جایی شعاعی  $u(r)$  در فاصله‌ی  $r$  از مرکز یک کره‌ی تخلیه شده با شعاع  $R_0$  که جابه‌جایی  $u_0$  در سطح آن رخ داده برابر است با:

$$u(r) = u_0 \frac{R_0^2}{r^2} \quad (۴)$$

جابه‌جایی رخ داده در سطح یک کره‌ی تخلیه شده به حجم  $V$  در نتیجه‌ی رخ داد کاهش فشار  $\Delta p$  در آن برابر است با:

$$u_0 = -\frac{CmV\alpha\Delta p}{4\pi R_0^2} \quad (۵)$$

با جایگزین کردن رابطه ۵ در رابطه ۴، رابطه ۶ بصورت زیر حاصل می‌گردد:

$$u(r) = -\frac{Cm}{4\pi} V\alpha\Delta p \frac{1}{r^2} \quad (۶)$$

با استفاده از این رابطه می‌توان میدان جابه‌جایی در اطراف یک کره‌ی تخلیه شده در یک محیط نامحدود و همگن را تعیین نمود.

در محیطی با پارامترهای الاستیسیته‌ی یکسان و همگن (محیط یک لایه)، تنها شرایط مرزی به صفر رسیدن تنش (کششی) عمودی ( $\sigma_{13}$ ) در سطح زمین ( $Z=0$ ) می‌باشد، ولی رابطه‌ی ۶ این شرط را برآورده نمی‌کند. (Geertsma 1973) شرایط مرزی

### ۵. مدل سازی نیمه تحلیلی

مدل سازی نیمه تحلیلی را می توان یکی از جدیدترین روش های مدل سازی فرونشست میداین هیدروکربنی دانست. مزیت اصلی این روش نسبت به روش های تحلیلی دقت بالاتر و همچنین انعطاف پذیری آن با شرایط پیچیده ی مخزن و سرباره می باشد. در این روش امکان مدل سازی محیط های چند لایه با خصوصیات ژئومکانیکی کاملاً متفاوت وجود دارد. از سوی دیگر این روش بسیار ساده تر و نیازمند صرف وقت بسیار کمتری نسبت به روش های عددی پیچیده می باشد (Fokker and Orlic, 2006). در این پژوهش از نرم افزار Fokker AEsubs طراحی شده بر اساس روش نیمه تحلیلی Fokker and Orlic (2006) برای مدل سازی فرونشست میدان پارس جنوبی استفاده گردیده است.

در روش نیمه تحلیلی، از روش های تحلیلی جهت حل معادلات الاستیسیته استفاده می گردد. دو معادله ی اصلی تئوری الاستیسیته ی خطی، قانون هوک و معادله تعادل می باشد. قانون هوک در محیط پروالاستیک به صورت رابطه ۱۲ ارائه می گردد:

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \left[ \frac{2G}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} - \alpha\Delta p \right] \delta_{ij} \quad (12)$$

در این رابطه  $\sigma_{ij}$  مولفه های تنش،  $\varepsilon_{ij}$  مولفه های کرنش،  $\Delta p$  تغییرات فشار،  $G$  مدول برشی،  $\nu$  ضریب پواسون،  $\alpha$  ضریب بیوت و  $\delta_{ij}$  دلتای کرونکر می باشد.

و معادله ی تعادل به صورت رابطه ۱۳ می باشد:

$$\partial_j \sigma_{ij} = 0 \quad (13)$$

روابط ۱۲ و ۱۳ با در نظر گرفتن شرایط مرزی و فصل مشترک لایه ها کامل می شوند. در محیطی با پارامترهای الاستیسیته ی متفاوت (مانند محیطی متشکل از لایه های با خصوصیات متفاوت)، شرایط مرزی شامل به صفر رسیدن تنش های کششی ( $\sigma_{i3}$ ) در سطح زمین، و ادامه یافتن کشش و جابه جایی (ui) در فصل مشترک لایه ها می باشد، به عبارت دیگر:

(۸)

$$u_z = -\frac{1}{2} \Delta h \left[ 3-4\nu + \frac{D-Z}{|D-Z|} - \frac{D-Z}{\sqrt{R^2+(D-Z)^2}} - \frac{(D+Z)(3-4\nu)}{\sqrt{R^2+(D+Z)^2}} + \frac{2R^2Z}{(R^2+(D-Z)^2)^{3/2}} \right]$$

فرونشست سطح در مرکز میدان را می توان با قرار دادن  $Z=0$  در رابطه ۸ محاسبه نمود:

$$u_z = 2C_m h \alpha \Delta p_f (1-\nu) \left( 1 - \frac{D}{\sqrt{D^2+R^2}} \right) \quad (9)$$

فرونشست نقاطی خارج از محور مرکزی یک میدان دیسک شکل را می توان با استفاده از رابطه ۱۰ تعیین نمود:

$$u_z(r,0) = -2\Delta h(1-\nu)A(\rho, \eta) \quad (10)$$

در این رابطه  $\rho = r/R$  و  $\eta = D/R$  می باشد و  $A$  انتگرال توابع بیسل (Bessel functions) بوده و برابر است با:

$$A = R \int_0^\infty J_1(aR) J_0(ar) e^{-Da} da \quad (11)$$

در این رابطه  $J_0$  و  $J_1$  تابع بیسل از مرتبه صفر و یک می باشند (Geertsma, 1973).

مقدار انتگرال  $A$  را می توان از جدول ۲ بر اساس دو نسبت  $\rho$  و  $\eta$  تعیین نمود.

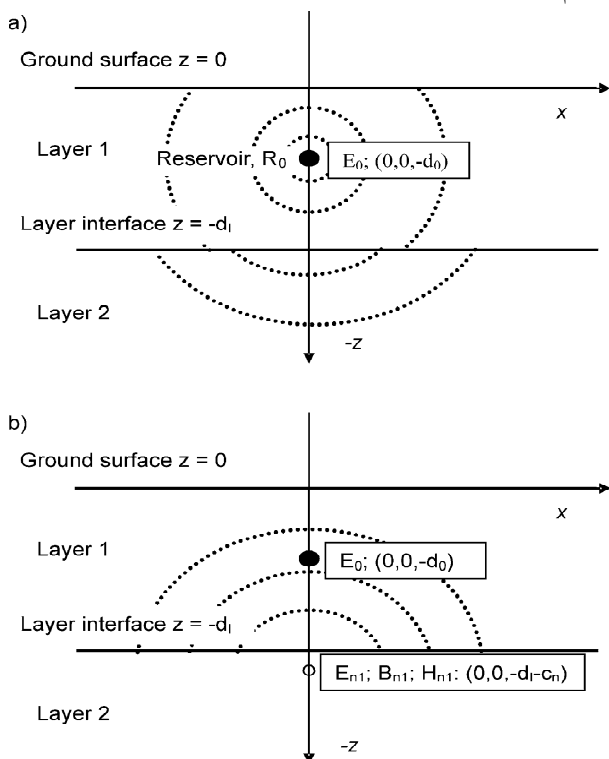
جدول ۲. مقادیر ضریب  $A$  برای نسبت های مختلف  $\rho$  و  $\eta$

		(Geertsma, 1973)					
		$\eta$	۰	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱
$\rho$	$\eta$	۰	۰/۷۵۷۵	۰/۵۵۲۸	۰/۴	۰/۲۹۲۹	
۰/۲۵	۰	۱	۰/۷۴۶۹	۰/۵۳۹۰	۰/۳۸۸۴	۰/۲۸۴۹	
۰/۵	۰	۱	۰/۷۰۷۹	۰/۴۹۳۷	۰/۵۳۳۲	۰/۲۶۰۶	
۰/۷۵	۰	۱	۰/۶۰۶۲	۰/۴۰۶۸	۰/۲۹۵۱	۰/۲۲۳۳	
۱	۰/۵	۰/۵	۰/۳۶۲۵	۰/۲۸۱۵	۰/۲۲۲۸	۰/۱۷۸۷	
۱/۲۵	۰	۰	۰/۱۴۰۹	۰/۱۶۵۹	۰/۱۵۴۲	۰/۱۳۵	
۱/۵	۰	۰	۰/۰۶۳	۰/۰۹۵	۰/۱۰۲۶	۰/۰۹۸۵	
۱/۷۵	۰	۰	۰/۰۳۴	۰/۰۵۷۴	۰/۰۶۸۶	۰/۰۷۱۲	
۲	۰	۰	۰/۰۲۰۷	۰/۰۳۷	۰/۰۴۷۱	۰/۰۵۱۹	
۵/۲	۰	۰	۰/۰۰۹۵	۰/۰۱۷۹	۰/۰۲۴۵	۰/۰۲۸۹	
۳	۰	۰	۰/۰۰۵۲	۰/۰۱	۰/۰۱۴۲	۰/۰۱۷۴	

$$F_{dipole} = kH \frac{1}{R} \quad (21)$$

ثابت‌های E، B و H نشان‌دهنده‌ی مقاومت مراکز کمکی هستند.

تعدادی از این مراکز در فواصل متفاوتی از فصل مشترک لایه‌ها در طول محور Z در نظر گرفته می‌شوند. میدان هسته‌های کمکی قرار گرفته در پایین فصل مشترک، در بالای سطح مشترک و میدان هسته‌ی بالای فصل مشترک در پایین آن اعمال می‌گردد. اعمال بخشی میادین اضافی موجب ایجاد ناپیوستگی‌های اضافی در تنش و جابجایی می‌شود که این میدان‌ها تحت تأثیر مقاومت هسته‌های کمکی بوده و بنابراین می‌توان به وسیله‌ی تنظیم مقاومت‌های هسته‌های ایجادکننده‌ی این میادین به شرایط مرزی مورد نظر دست یافت. در شکل ۴ چگونگی گسترش میدان تنش و کرنش در اطراف یک مرکز تراکم و یک هسته‌ی کمکی نشان داده شده است.



شکل ۴. چگونگی گسترش میدان تنش و کرنش در لایه‌های با مقاومت متفاوت. (a) میدان تنش و کرنش در اطراف یک مرکز تراکم، (b) میدان تنش و کرنش در اطراف یک هسته‌ی کمکی (Fokker and Orlic, 2006)

(۱۴)

$$\text{surface } (z=0) : \sigma_{i3} = 0$$

$$\text{interfaces } (z = -d_1 \dots -d_n) : \begin{cases} \sigma_{i3} = \text{continuous} \\ u_i = \text{continuous} \end{cases}$$

در این روش از توابع تنش گالریکن جهت فرمول‌بندی و حل معادلات استفاده شده است. با استفاده از بردار گالریکن (F) جابه‌جایی و تنش برابر است با:

$$u_i = 2[1-\nu]\nabla^2 F_i - \partial_i \partial_k F_k \quad (15)$$

(۱۶)

$$\sigma_{ij} = 2G\{(\nu\delta_{ij}\nabla^2 - \partial_i\partial_j)\partial_k F_k + [1-\nu]\nabla^2(\partial_i F_j + \partial_j F_i)\}$$

در این روش نیز مانند روش (Geertsma (1973) از مراکز تراکم (کرنش) برای نشان دادن مخزن تراکم شده استفاده می‌گردد:

$$F_{\text{centere of compression}} = kE_0 \log(R+z+d) \quad (17)$$

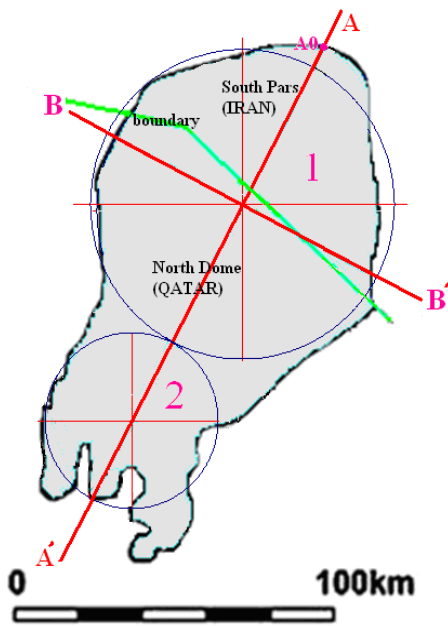
در این رابطه k بردار واحد در جهت محور z و R فاصله تا مرکز کرنش ( $R = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+d)^2}$ ) می‌باشد. برای کروی به حجم dV که کاهش فشار ΔP در آن رخ داده است، E<sub>0</sub> برابر است با:

$$E_0 = -\alpha \frac{1-2\nu}{2G(1-\nu)} \frac{dVdp}{4\pi} = -Cm \frac{dV\Delta p}{4\pi} \quad (18)$$

با استفاده از این روابط (۱۶، ۱۷ و ۱۸) می‌توان جابه‌جایی و تنش ایجاد شده اطراف یک مرکز تراکم، واقع در یک فضای سه بعدی نامحدود همگن را محاسبه نمود. ولی در یک محیط نامحدود متشکل از چندین لایه با خصوصیات مکانیکی متفاوت این روابط به تنهایی شرایط مرزی در سطح زمین و فصل مشترک لایه‌ها را برآورده نمی‌کنند. در این روش برای برآورده نمودن شرایط مرزی از مراکز کرنش کمکی که شامل مراکز تراکم، جفت نیرو و مراکز تراکم دو قطبی در جهت محور Z می‌باشد، استفاده می‌گردد:

$$F_{\text{double force}} = kB \frac{z+d}{R} \quad (19)$$

$$F_{\text{centere of compression}} = kE \log(R+z+d) \quad (20)$$



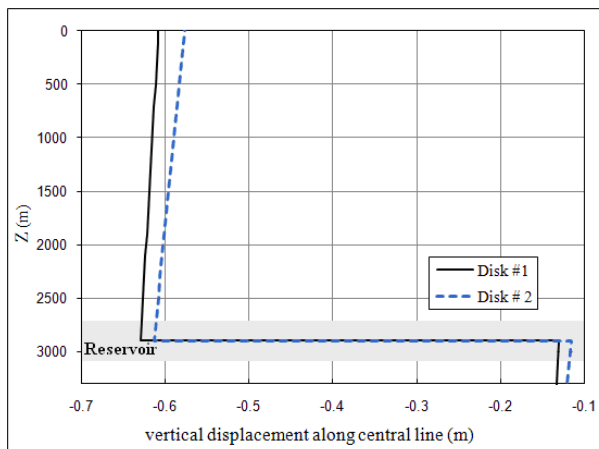
شکل ۵. مخزن پارس جنوبی تقسیم شده به دو مخزن دیسک شکل

برای تعیین مقاومت هسته‌ها، اولین مدل که نتایج آن دارای انحراف از شرایط مرزی مورد نیاز است ایجاد می‌گردد. مقاومت‌های مرکز تراکم مشخص و مقاومت هسته‌های کمکی نامشخص است. چون این مدل خطی است، استفاده از یک روش معکوس بهترین نتایج را در برآورد مقاومت هسته‌های کمکی دارد. در این مدل‌سازی از روش کمترین مربعات جهت تخمین مقاومت هسته‌های کمکی استفاده می‌گردید. روش کمترین مربعات روشی آماری است که برای حل دستگاه معادلاتی که تعداد معادلات آن بیش از تعداد مجهول‌هایش است، به کار می‌رود. کمترین مربعات در واقع روشی برای برازش (Fit) داده‌ها است. در روش کمترین مربعات، بهترین مدل برازش شده بر مجموعه‌ای از داده‌ها، مدلی است که در آن مجموع مربع مانده‌ها کمینه باشد. منظور از مانده، اختلاف بین داده مشاهده شده و مقداری است که از مدل به دست می‌آید (Wolberg, 2005).

## ۶. مدل‌سازی فرونشست میدان پارس جنوبی

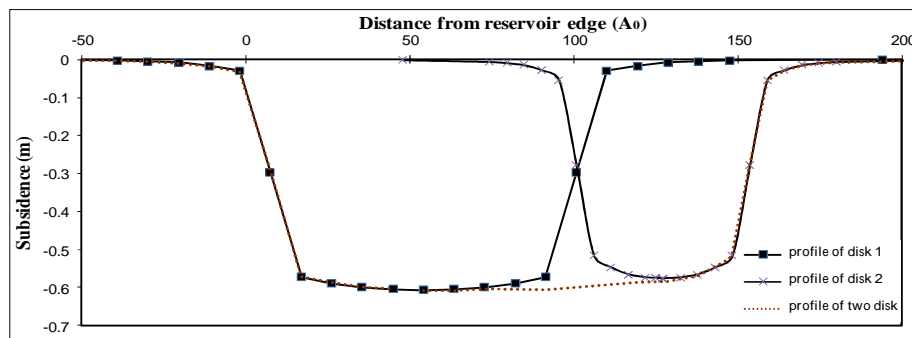
### ۶-۱. روش تحلیلی

جهت استفاده روش تحلیلی میدان پارس جنوبی به دو میدان با مخازن دیسک شکل ۱ و ۲ با شعاعی به ترتیب برابر با ۴۶/۶۲ و ۲۶/۴۵ کیلومتر تقسیم گردید (شکل ۵). جابجایی عمودی رخ داده در مرکز هر یک از این میداین دیسک شکل با استفاده از رابطه‌ی ۸ محاسبه و نتایج آن در شکل ۶ ارائه شده است.



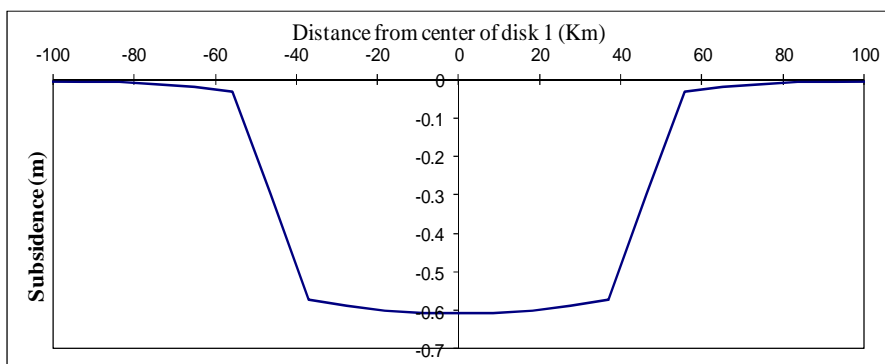
شکل ۶. جابجایی عمودی در امتداد محور میانی با استفاده از

روش Geertsma



شکل ۷. نیمرخ جام فرونشست در امتداد خط A-A' با استفاده از روش Geertsma



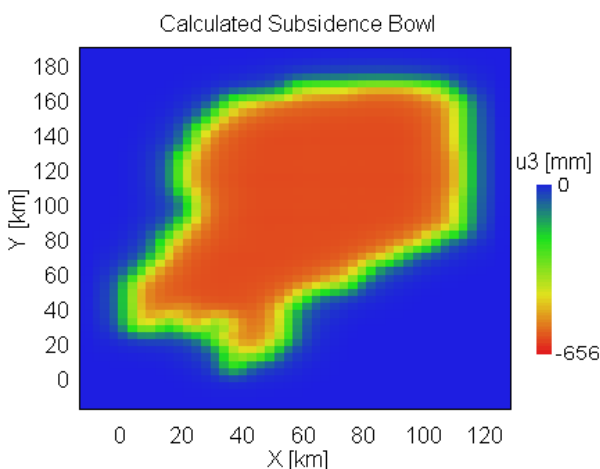


شکل ۸. نیمرخ جام فرونشست در امتداد خط B-B' با استفاده از روش Geertsma

همچنین نیمرخ جام فرونشست در امتداد دو خط A-A' و B-B' (شکل ۶) با استفاده از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه و در اشکال ۷ و ۸ ارائه گردیده است.

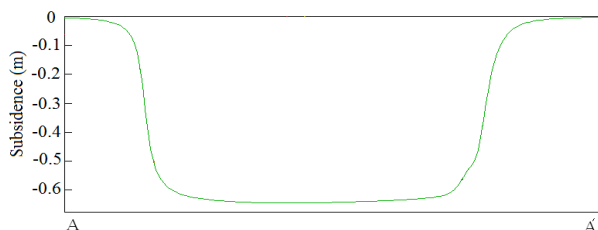
### ۶-۲. روش نیمه تحلیلی

مدل‌سازی نیمه تحلیلی فرونشست میدان پارس جنوبی با استفاده از نرم‌افزار AEsups صورت پذیرفت. در شکل ۹ شبکه تراکم مخزن (که یکی از داده‌های ورودی نرم‌افزار AEsups می‌باشد)، و در شکل ۱۰ جام فرونشست مدل‌سازی شده با این نرم‌افزار ارائه شده است. نیمرخ جام فرونشست در امتداد خط A-A' مدل‌سازی شده با این نرم‌افزار در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



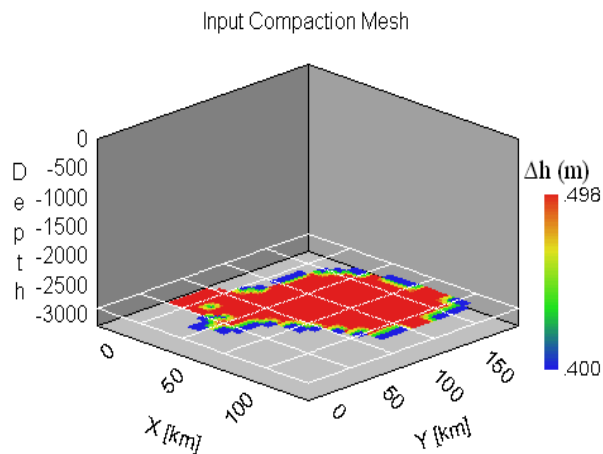
شکل ۱۰. جام فرونشست مدل‌سازی شده در پایان دوره‌ی برداشت با استفاده از نرم‌افزار AEsups

برداشت با استفاده از نرم‌افزار AEsups



شکل ۱۱. نیمرخ جام فرونشست در امتداد خط A-A' مدل

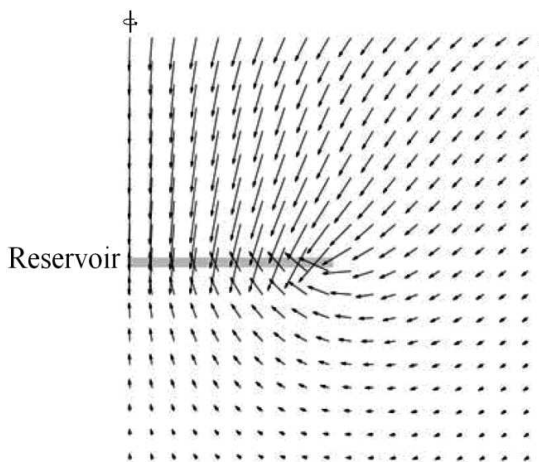
شده با استفاده از نرم‌افزار AEsups



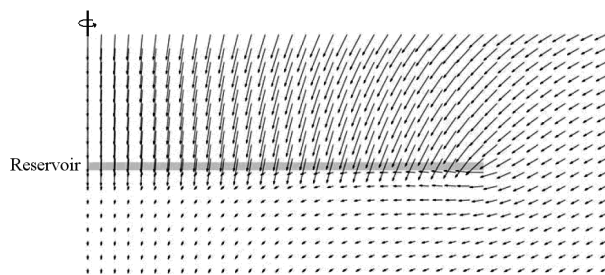
شکل ۹. شبکه تراکم مخزن

۵-۳. بررسی و مقایسه‌ی نتایج حاصل از دو روش مدل‌سازی پیشینه فرونشست پیش‌بینی شده در پایان دوره‌ی برداشت از میدان پارس جنوبی بر اساس روش تحلیلی و روش نیمه تحلیلی به ترتیب برابر با ۰/۶ و ۰/۶۶ متر می‌باشد. نتایج حاصل از این دو روش دارای تطابق بسیار بالایی می‌باشند. این

می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌کنید، کف میدان در مرکز دو میدان دیسک شکل ۱ و ۲ به ترتیب بیش از ۰/۱۴ و ۰/۱۲ متر به سمت پایین جابجا خواهد شد. همچنین جابجایی عمودی کف مخزن پارس جنوبی با استفاده از نرم‌افزار AEsups مدل‌سازی و در شکل ۱۴ ارائه گردیده است.

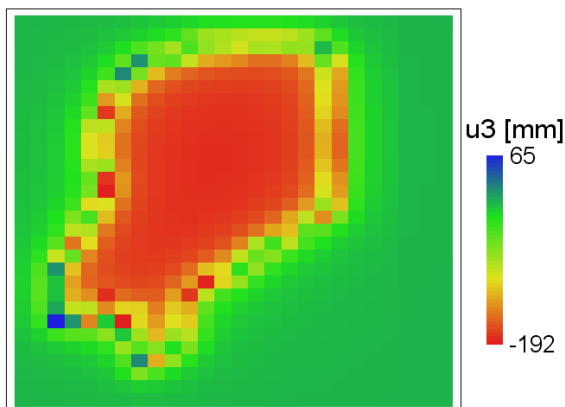


شکل ۱۲. جابجایی رخ داده در اطراف مخزنی با عمقی برابر شعاع آن (Fjær et al., 2008)



شکل ۱۳. جابجایی رخ داده در اطراف مخزنی با عمقی سه برابر شعاع آن (Fjær et al., 2008)

Displacement on User-defined plane: u3



شکل ۱۴. جابجایی عمودی کف مخزن

تطابق را می‌توان ناشی از یکسانی و همگنی مخزن و وسعت زیاد میدان و شکل هندسی ساده‌ی میدان دانست. وسعت بسیار زیاد میدان اجازه ایجاد قوس‌زدگی تنش در سرباره و انتقال وزن سرباره به کناره‌های مخزن را نداده و در نتیجه تمامی تراکم مخزن بدون ایجاد کاهش قابل توجهی در آن به سطح زمین منتقل خواهد شد. این موضوع به خوبی در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به یکسان در نظر گرفته شدن خصوصیات سرباره‌ی هر دو میدان، سرباره میدان ۲ با توجه به کوچکتر بودن میدان ۲ نسبت به میدان ۱ اجازه‌ی انتقال مقدار کمتری از تراکم مخزن به سطح را داده است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که خصوصیات مکانیکی سرباره در میدانی با وسعت میدان پارس جنوبی تأثیر چندانی بر فرونشست میدان نداشته باشد. البته با توجه به عدم دانش ما از خصوصیات مکانیکی دقیق سرباره و کف مخزن و تغییرات آن‌ها در مدل‌سازی با نرم‌افزار AEsups میدان به صورت یک محیط سه لایه شامل سرباره، مخزن و کف مخزن در نظر گرفته شده است و در نتیجه از تمام ظرفیت‌های نرم‌افزار AEsups استفاده نگردیده است. نکته جالب در نتایج حاصل از هر دو روش مدل‌سازی پیش‌بینی مقدار فرونشست بیشتر از مقدار تراکم مخزن می‌باشد. برطبق نظر Geertsma (1973) دلیل این امر را می‌توان جابه‌جایی کف میدان به سمت پایین دانست. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ جابه‌جایی رخ داده در اطراف دو مخزن دیسک شکل با نسبت‌های مختلف  $D/R$  را نشان می‌دهد. شکل ۱۲ نشان دهنده‌ی جابه‌جایی رخ داده در اطراف مخزنی با شعاعی برابر عمق آن می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید بالای مخزن به سمت پایین جابه‌جا شده در حالی که کف مخزن بالا می‌آید، این موضوع موجب ایجاد فرونشستی کمتر از تراکم مخزن می‌گردد. از سوی دیگر همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده هم بالا و هم کف یک مخزن عریض با شعاعی سه برابر عمق آن به سمت پایین جابه‌جا می‌شود و در نتیجه فرونشست ایجاد شده در سطح میدان بیشتر از تراکم مخزن می‌باشد.

نتایج حاصل از محاسبه‌ی جابجایی عمودی در امتداد محور میانی با استفاده از روش تحلیلی نیز مؤکد این موضوع

**۷. نتیجه‌گیری**

مدل‌سازی انجام گرفته با نرم‌افزار AEsubs به بیش از ۰/۱۸ متر خواهد رسید. بر اساس محاسبات انجام گرفته با استفاده از مدل تحلیلی مقدار جابجایی عمودی کف میدان ۱ و ۲ به ترتیب بیش از ۰/۱۴ و ۰/۱۲ متر پیش‌بینی گردید.

**تشکر و قدردانی**

در پایان لازم می‌دانیم مراتب تشکر و قدردانی خود را از واحد پژوهش و فناوری شرکت نفت و گاز پارس جهت فراهم نمودن داده‌های مورد نیاز این تحقیق، و جناب دکتر کمپانی و آقای مهندس پرتقالی جهت راهنمایی‌های ارزنده‌شان به عمل آوریم.

۱. میزان تراکم مخزن پارس جنوبی در اثر برداشت گاز در پایان دوره‌ی برداشت (در صورت عدم رخداد تغییر شکل پلاستیک و گسیختگی در سنگ مخزن) تقریباً به ۰/۵ متر خواهد رسید.  
 ۲. از دو روش مدل‌سازی فرونشست انجام پذیرفته نتایج تقریباً یکسانی حاصل گردید که بر طبق این نتایج بیشینه فرونشست ایجاد شده در میدان پارس جنوبی در پایان دوره‌ی برداشت به بیش از ۰/۶ متر خواهد رسید.  
 ۳. بر اساس نتایج از هر دو روش مدل‌سازی‌های انجام گرفته، میزان فرونشست ایجاد شده در سطح میدان پارس جنوبی از میزان تراکم مخزن آن بیشتر بوده که این امر به دلیل جابجایی کف میدان به سمت پایین روی می‌دهد. بیشینه جابجایی عمودی رخداد در کف مخزن بر اساس نتایج حاصل از

**منابع**

- Atefi Monfared, K., 2009. Monitoring Oil Reservoir Deformations by Measuring Ground Surface Movements, Civil Engineering. University of Waterloo, Ontario, Canada, p. 256.
- Detournay, E., Cheng, A.H.-D., 1993. Fundamentals of Poroelectricity 1.
- Fjær, E., Holt, R., Horsrud, P., Raaen, A., Risnes, R., 2008. Petroleum Related Rock Mechanics. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Fokker, P., Orlic, B., 2006. Semi-analytic modelling of subsidence. *Mathematical Geology* 38, 565-589.
- Fredrich, J.T., Arguello, J., Deitrick, G., Rouffignac, E.d., 2000. Geomechanical modeling of reservoir compaction, surface subsidence, and casing damage at the Belridge diatomite field. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering* 3, 348-359.
- Geertsma, J, 1973. Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs. *JPT* 59 734-744.
- Gurevich, A.E, Chilingarian, G.V, 1995. Chapter 4 Possible impact of subsidence on gas leakage to the surface from subsurface oil and gas reservoirs, in: G.V. Chilingarian, E.C.D., Yen, T.F. (Eds.), *Developments in Petroleum Science*. Elsevier, pp. 193-213.
- Hermansen, H., Landa, G.H., Sylte, J.E., Thomas, L.K., 2000. Experiences after 10 years of waterflooding the Ekofisk Field, Norway. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 26, 11-18.
- Ketelaar, V.B.H., 2009. *Satellite radar interferometry*. Springer.
- Kosloff, D., Scott, R.F., Scranton, J., 1980. Finite element simulation of Wilmington oil field subsidence: I. Linear modelling. *Tectonophysics* 65, 339-368.
- Marte, G., Lloyd, T., Harald, H., Axel, M., Nick, B., Landa, G., 1994. Modelling of the compaction behaviour of fractured chalk. *Rock Mechanics in Petroleum Engineering*.
- McCann, G.D., Wilts, C.H., 1951. A mathematical analysis of the subsidence in the Long Beach-San Pedro Area. California Institute of Technology.
- Nagel, N., 2001. Compaction and subsidence issues within the petroleum industry: From Wilmington to Ekofisk and beyond. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy* 26, 3-14.
- Poland, J.F., Lofgren, B.E., Riley, F.S., 1972. Glossary of Selected Terms Useful in Studies of the Mechanics of Aquifer Systems and Land Subsidence Due to Fluid Withdrawal. U.S. Geological Survey, USGS, Wash., D.C.

- 
- Schoustra, S.S., 2004 Bodemdaling Groningen, Analyse van de waterpassingen 1964-2003, Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
- Settari, A., 2002. Reservoir compaction. JPT 54, 62-69.
- Sroka, A., Hejmanowski, R., 2006. Subsidence prediction caused by the oil and gas development., 3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering and 12th FIG Symposium on Deformation Measurements, Baden, Austria, p. 8.
- Sulak, R.M., 1991. Ekofisk field: the first twenty years. JPT 43 1265-1271.
- Wolberg, J., 2005. Data analysis using the method of least squares: extracting the most information from experiments. Springer.
- Zeitoun, D.G., Wakshal, E., 2013. Land Subsidence Analysis in Urban Areas: The Bangkok Metropolitan Area Case Study. Springer London, Limited.