

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن

ارزیابی تراکم مخزن و فرونشست سطح میادین هیدروکربوری با
استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی رادار و مدل سازی های
ژئومکانیکی: مطالعه موردی میدان نفتی درود

آرمان محمدی

استاد راهنما:

دکتر منصور ضیائی

بهمن ماه ۱۳۸۹





دانشکده : مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه : اکتشاف معدن

ارزیابی تراکم مخزن و فرونشست سطح میادین هیدروکربوری با استفاده از
روش تداخل سنجی تفاضلی رادار و مدل سازی های ژئومکانیکی، مطالعه موردی
میدان نفتی درود

دانشجو : آرمان محمدی

استاد راهنما
دکتر منصور ضیائی

اساتید مشاور
مهندس سیما سهرابی
مهندس نگین فولادی مقدم

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی اکتشاف معدن

بهمن ماه ۱۳۸۹



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره :
تاریخ :
ویرایش :

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آرمان محمدی رشته اکتشاف معدن تحت عنوان ارزیابی تراکم مخزن و فرونشست سطح میدان نفتی با داده از روش مداخله سطحی تناظری را در روز سه شنبه ۱۳۹۹/۱۱/۱۷ در تاریخ ۸۹/۱۱/۱۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول (با درجه : عالی - امتیاز : ۱۸) دفاع مجدد مردود

- ۱- عالی (۲۰ - ۱۸)
- ۲- بسیار خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)
- ۳- خوب (۱۵/۹۹ - ۱۴)
- ۴- قابل قبول (۱۳/۹۹ - ۱۲)

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران (a)
	استادیار	دکتر منصور ضیائی	۱- استاد راهنمای اول
	-	-	۲- استاد راهنمای دوم
	کارشناس ارشد -	مهندس سیما سهرابی -	۳- استاد مشاور
	کارشناس ارشد	مهندس نگین فولادی	
	استادیار	دکتر قوامی	۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استاد	دکتر عطایی	۵- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر آقاجانی	۶- استاد ممتحن

تأیید رئیس دانشکده:

تقدیم به بزرگ اختران زندگی،
تقدیم به سایبانان آرامش،
تقدیم به پدر و مادر مهربانم.....

تقدیر و سپاس

با سپاس از پروردگار بر خود لازم می دانم که از زحمات دکتر ضیائی که در تمامی مراحل انجام این پژوهش از راهنمایی های ارزشمندشان بهره برده‌ام سپاسگزاری نمایم. همچنین از سرکار خانم مهندس نگین فولادی مقدم که مشاور این پروژه بودند و در مراحل مختلف پژوهش از مشورتشان استفاده کرده‌ام کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

این پژوهش تحت حمایت مالی شرکت ملی نفت فلات قاره انجام گرفته است. از سرکار خانم مهندس سیما سهرابی که مشاور صنعتی پروژه بودند جهت مساعدت و همکاری هایشان کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین بر خود لازم می دانم از جناب آقای مهندس موسوی ریاست محترم طرح و توسعه شرکت ملی نفت فلات قاره که فرصت و امکانات لازم جهت انجام این پروژه را در اختیار اینجانب قرار دادند و سرکار خانم مشایخی که در تهیه داده های مورد نیاز پژوهش کمال همکاری را داشتند تشکر و قدردانی نمایم.

از ریاست بخش ژئومتیکس سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور که امکانات لازم جهت پردازش تصاویر رادار را در اختیار این جانب قرار دادند، همچنین از سازمان فضایی اروپا ESA به جهت موافقت با طرح پیشنهادی و در اختیار قراردادن تصاویر منطقه بی نهایت سپاسگزارم.

از دوست عزیزم مهندس سعید اسلامی، همچنین اساتید و کارکنان محترم دانشکده نفت، معدن و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود و کلیه کسانی که در انجام این پروژه مرا یاری نمودند بی نهایت ممنون و سپاسگزارم.

تعهد نامه

اینجانب **آرمان محمدی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی اکتشاف معدن** دانشکده معدن نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **ارزیابی تراکم مخزن و فرونشست سطح میادین هیدروکربوری با استفاده از روش های تداخل سنجی راداری و مدل سازی های ژئومکانیکی: مطالعه موردی میدان نفتی درود** تحت راهنمایی **دکتر منصور ضیائی** متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ ۱۹/۱۱/۱۷

امضای دانشجو آرمان محمدی

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

یکی از جدی ترین مشکلات در توسعه میادین نفتی که می تواند مسبب وارد آمدن میلیون ها دلار خسارت باشد، فرونشست سطح در نتیجه تولید هیدروکربن و تراکم یا فشردگی مخزن است. تراکم مخزن می تواند با فعال سازی ساختارهای زیر سطحی و برهم زدن یکپارچگی مخزن، باعث مهاجرت هیدروکربن به سازند ها و مناطق دیگر گردد. همچنین تراکم مخزن باعث فرونشست سطح و کاهش تخلخل سازند میزبان می گردد که می تواند میزان تولید از مخزن را کاهش دهد.

روش های مختلفی جهت نظارت بر تراکم و فرونشست میدان نفتی و اثرات آن استفاده شده است. در این مطالعه از روش تداخل سنجی تفاضلی رادار و مدلسازی های ژئومکانیکی برای ارزیابی فرونشست و تراکم میدان نفتی درود، واقع در جنوب غربی ایران استفاده شده است. شکستگی های چاه گزارش شده در این میدان می تواند در اثر برهم خوردن موازنه جرم مخازن نفتی در اثر استخراج هیدروکربن باشد.

تداخل سنجی تفاضلی رادار روش نسبتاً جدیدی است که توانایی آن در اندازه گیری تغییرات سطح زمین در حد سانتی متر به اثبات رسیده است. عوامل متعددی دقت این روش را تحت تأثیر قرار می دهند که تأثیرات اتمسفری مهمترین عامل آن است. پردازش تصاویر SAR جزیره خارگ (بخش خشکی میدان درود)، که مربوط به سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ میلادی هستند، با استفاده از نرم افزار GAMMA انجام شد. بدلیل نرخ بالا و متغییر تبخیر آب در خلیج فارس همبستگی تصاویر منطقه بسیار پایین بود. بنابراین بررسی های صورت گرفته نشان از عدم کارایی این روش در منطقه داشت.

روابط Geertsma براساس معادلات هسته کرنش مکانیک سنگ ابزاری سریع و ارزشمند جهت ارزیابی فرونشست و تراکم مخازن است. با استفاده از این معادلات حداکثر نرخ تراکم مخزن دو برابر حداکثر نرخ فرونشست سطح میدان محاسبه شد.

همچنین یک برنامه اختلاف محدود برای پایش و اندازه گیری تراکم سنگ مخزن میدان نفتی درود استفاده شد. از این برنامه جهت بررسی تأثیر ویسکوزیته سیال، ضریب پواسون، مدول یانگ، نرخ تولید

و تزریق سیال به مخزن و مشخص نمودن میزان تراکم به عنوان تابعی از زمان استفاده شد. علاوه بر این با تعریف رابطه بین تخلخل و نفوذپذیری مخزن، تغییرات تخلخل و تراوایی در نتیجه تراکم مخزن بررسی شد.

ترکیب نتایج این پژوهش با روش های نقشه برداری میدانی در حال تراکم می تواند به بهره گیری مناسب از پدیده تراکم مخزن بیانجامد، در حالی که مشکلات ناشی از آن را حداقل خواهد نمود.

واژگان کلیدی: تراکم مخازن نفتی، فرونشست سطح میدان، روش تداخل سنجی رادار، روش اختلاف محدود، میدان نفتی درود.

فهرست مطالب

	چکیده/خ
	فهرست مطالب/د
۱	فصل اول: کلیات پژوهش
۲	۱-۱ پیشگفتار
۶	۲-۱ پیشینه پژوهش
۱۲	۳-۱ اهداف پژوهش
۱۳	۴-۱ ساختار پایان نامه
۱۴	فصل دوم: معرفی منطقه مورد مطالعه
۱۵	۱-۲ حوزه خلیج فارس
۱۶	۱-۱-۲ زمین شناسی خلیج فارس
۱۷	۲-۱-۲ نوع رسوبات در خلیج فارس
۱۸	۲-۲ فلات قاره و تقسیمات هیدروکربوری منطقه
۱۹	۱-۲-۲ موقعیت و تاریخچه میدان درود
۲۰	۲-۲-۲ زمین شناسی عمومی میدان درود
۲۶	۳-۲-۲ تکتونیک میدان درود
۲۹	فصل سوم: مکانیک محیط های متخلخل
۳۰	۱-۳ مقدمه
۳۰	۲-۳ تراکم مخازن هیدروکربوری
۳۰	۱-۲-۳ تراکم
۳۱	۲-۲-۳ آنالیز های ریاضی و آزمایشگاهی تراکم
۳۸	۳-۳ فرونشست حوزه های رسوبی
۳۸	۱-۳-۳ منشأ فرونشست
۴۰	۳-۳-۳ فرونشست در اثر استخراج سیالات
۴۵	۴-۳ اصول اساسی در مدل سازی تراکم و فرونشست مخزن
۴۹	۵-۳ حل عددی معادلات حاکم
۴۹	۱-۵-۳ روش اجزای محدود
۵۰	۲-۵-۳ روش اختلاف محدود
۵۲	۶-۳ روش های ارزیابی تراکم و فرونشست مخزن
۵۴	فصل چهارم: تداخل سنجی تفاضلی تصاویر SAR
۵۵	۱-۴ مقدمه
۵۵	۲-۴ سیستم راداری

۵۶	۳-۴ خصوصیات و پارامتر های سیگنال راداری
۵۷	۴-۴ اجزای سیستم تصویر بردار راداری
۵۸	۴-۵ رادار با گشودگی مصنوعی (SAR)
۵۸	۴-۵-۱ قدرت تفکیک سیستم های رادار با گشودگی مصنوعی
۶۰	۴-۶ اهمیت فاز
۶۲	۴-۷ تداخل سنجی رادار-InSAR
۶۴	۴-۸ ساخت تصویر تداخل سنجی
۶۵	۴-۹ تصحیح تغییرات فاز سطح مسطح
۶۶	۴-۱۰ بازیابی فاز
۶۸	۴-۱۱ انواع تداخل سنجی SAR
۶۹	۴-۱۲ عدم همبستگی
۷۲	۴-۱۳ آشکار سازی تغییرات توپوگرافی
۷۶	۴-۱۴ تداخل سنجی در میدان درود
۷۶	۴-۱۴-۱ پردازش تصاویر اخذ شده از جزیره خارگ
۷۷	۴-۱۴-۲ پیش پردازش تصاویر در نرم افزار GAMMA
۷۹	۴-۱۴-۳ تهیه تداخل نما
۸۲	۴-۱۴-۵ بازیابی فاز و مکان مرجع نمودن
۸۳	۴-۱۵ تأثیر اتمسفر بر محصولات InSAR
۸۴	۴-۱۵-۱ تأثیر عام اتمسفری
۸۴	۴-۱۵-۱-۱ تأخیر مرطوب
۸۵	۴-۱۵-۱-۲ تأخیر هیدرواستاتیک
۸۶	۴-۱۶ تکنیک های حذف نوفه اتمسفر
۸۸	۴-۱۷ روش پراکنده سازهای پایدار
۸۹	۴-۱۸ سایر روش های موجود جهت افزایش همدوسی
۹۰	فصل پنجم: مدل سازی تحلیلی تراکم و فرونشست مخزن
۹۱	۵-۱ مقدمه
۹۱	۵-۲ تخمین تراکم مخزن
۹۳	۵-۲-۱ تعیین ضریب تراکم پذیری
۹۸	۵-۲-۲ محاسبه تراکم مخزن فلهلیان
۱۰۰	۵-۳ رابطه بین تراکم مخزن و فرونشست سطح میدان
۱۰۴	۵-۴ ترکیب مفهوم هسته کرنش با روش تابع تأثیر
۱۰۷	۵-۵ محاسبه فرونشست سطح میدان درود
۱۱۲	۵-۶ تشریح نتایج

۱۱۵	فصل ششم: شبیه سازی عددی تراکم مخزن
۱۱۶	۱-۶ مقدمه
۱۱۶	۲-۶ مدل عددی تراکم
۱۱۶	۱-۲-۶ محاسبه افت فشار
۱۲۰	۲-۲-۶ محاسبه تراکم
۱۲۰	۳-۶ روش محاسبه
۱۲۱	۴-۶ فرضیات مدل سازی
۱۲۳	۵-۶ شبیه سازی عددی تراکم مخزن فلهلیان
۱۲۳	۱-۵-۶ پارامترهای ورودی مدل
۱۲۵	۲-۵-۶ شبکه اختلاف محدود
۱۲۷	۳-۵-۶ شرایط اولیه و مرزی مدل سازی
۱۲۸	۶-۶ محاسبه تراکم مخزن فلهلیان در مقیاس چاه
۱۳۱	۷-۶ محاسبه تغییرات تخلخل و تراوایی مخزن فلهلیان
۱۳۱	۱-۷-۶ رابطه بین تخلخل و تراوایی مخزن فلهلیان
۱۳۴	۲-۷-۶ محاسبه تغییرات تخلخل و تراوایی مخزن در مقیاس چاه
۱۳۵	۸-۶ نتایج مدل سازی در مقیاس میدان
۱۳۹	۹-۶ آنالیز حساسیت پارامترهای تأثیرگذار بر شبیه سازی
۱۳۹	۱-۹-۶ بررسی تأثیر مدول یانگ و ضریب پواسون
۱۴۰	۲-۹-۶ بررسی تأثیر ویسکوزیته بر نتایج مدل سازی
۱۴۲	فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۴۳	۱-۷ نتیجه گیری
۱۴۷	۲-۷ پیشنهادات
۱۴۸	منابع و مأخذ
۱۵۷	پیوست

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ : نقشه مکانی میدان های نفتی شرکت نفت فلات قاره ایران ۱۹
- شکل ۲-۲ : موقعیت میدان درود و جزیره خارگ در خلیج فارس ۲۰
- شکل ۱-۳ : طبقه بندی بارگذاری تراکم ۳۲
- شکل ۲-۳ : روابط میان تنش مؤثر و ضریب پوکی از سازند های میدان Cost Bolivar ۳۷
- شکل ۳-۳ : رابطه میان ضریب پوکی و فشار اعمال شده برای کوارتز، دولومیت و ماسه ۳۷
- شکل ۴-۳ : مقایسه نتایج تست تراکم بر روی ماسه ها و شیل های میدان نفتی Wilmington ۳۸
- شکل ۵-۳ : طبقه بندی ژنتیک فرونشست سطح زمین ۳۹
- شکل ۶-۳ : تصویری از تراکم مخزن ۴۲
- شکل ۷-۳ : انتقال بار بدلیل افت سطح ایستایی آب یا کاهش در فشار آب منفذی ۴۴
- شکل ۱-۴ : دامنه های استاندارد امواج ماکروویو ونام های مربوطه ۵۷
- شکل ۲-۴ : اصول تصویر برداری توسط سیستم SAR ۵۹
- شکل ۳-۴ : تشخیص اختلاف توپوگرافی میان نقاط a و b با تغییر موقعیت رادار ۶۱
- شکل ۴-۴ : هندسه تداخل سنجی تصاویر SAR با خط مبنای واحد ۶۳
- شکل ۵-۴ : تعیین رابطه ارتفاع توپوگرافی و زاویه فرود ۶۴
- شکل ۶-۴ : تغییرات فاز تداخل نما در ۱۰۰ کیلومتر عرض برداشت ۶۶
- شکل ۷-۴ : تغییرات فاز تداخل نما در گیرنده رادار ۶۷
- شکل ۸-۴ : نمایش بازتابی فاز در امتداد برش عرضی نشان داده شده در تداخل نما ۶۸
- شکل ۹-۴ : انواع تداخل سنجی SAR ۷۰
- شکل ۱۰-۴ : اندازه گیری تغییرات توپوگرافی در راستای فاصله مایل ۷۲

- ۷۴ شکل ۱۱-۴ : مدل توپوگرافی فرونشست شهر Bologna
- ۷۷ شکل ۱۲-۴ : موقعیت جزیره خارک و فریم تصویر ASAR
- ۷۸ شکل ۱۳-۴ : الگوریتم تبدیل تصاویر خام ASAR در نرم افزار GAMMA
- ۷۹ شکل ۱۴-۴ : نمونه ای از تصاویر حاصل از پردازش اولیه داده خام از منطقه خارگ
- ۸۰ شکل ۱۵-۴ : مراحل تشکیل تداخل نما در نرم افزار GAMMA
- ۸۱ شکل ۱۶-۴ : نمونه ای از تداخل نمای تهیه شده از منطقه خارگ پس از مسطح سازی
- ۹۶ شکل ۱-۵ : ضریب تک محوره تراکم برای مخازن ماسه سنگی در عمق ۱۰۰۰ متری
- ۹۶ شکل ۲-۵ : ضریب تراکم تک محوره برای مخازن ماسه سنگی در عمق ۳۰۰۰ متری
- ۹۷ شکل ۳-۵ : ضریب تراکم تک محوره برای مخازن کربناته در عمق ۳۰۰۰ متری
- ۹۷ شکل ۴-۵ : ضریب تراکم تک محوره برای مخازن کربناته در عمق ۱۰۰۰ متری
- ۹۹ شکل ۵-۵ : لاگ های سونیک، دنسیتی و گاما ری
- ۱۰۱ شکل ۶-۵ : مدل گیره عمودی Wilts و McCann
- ۱۰۱ شکل ۷-۵ : مدل مرکز کشش Wilts و McCann
- ۱۰۵ شکل ۸-۵ : مخزن هیدروکربور تقسیم شده به المان های مکعبی شکل
- ۱۰۶ شکل ۹-۵ : مناطق حلقوی و قسمت های تقسیم شده توسط خطوط شعاعی
- ۱۰۸ شکل ۱۰-۵ : مخزن فلهلیان منطبق شده با شبکه تأثیر
- ۱۱۰ شکل ۱۱-۵ : شبکه بکاربرده شده جهت تهیه نقشه فرونشست میدان درود
- ۱۱۱ شکل ۱۲-۵ : نقشه کنتوری فرونشست سطح میدان درود
- ۱۱۱ شکل ۱۳-۵ : پروفیل فرونشست میدان در امتداد خط A-B
- ۱۱۳ شکل ۱۴-۵ : تراکم و فرونشست

- شکل ۱-۶ : تعادل فشارها در مرز بین سازند روباره و سازند مخزن ۱۱۷
- شکل ۲-۶ : شبکه یکپارچه ای که بر روی آن نقشه آیزوپیک مشخص شده ۱۱۹
- شکل ۳-۶ : نقشه آیزوپروسیتی مخزن فهلیان ۱۲۴
- شکل ۴-۶ : نقشه آیزوپیک مخزن فهلیان ۱۲۴
- شکل ۵-۶ : نقشه آیزوپرمی ابیلیتی مخزن فهلیان ۱۲۵
- شکل ۶-۶ : شبکه یکپارچه اختلاف محدود مخزن فهلیان ۱۲۶
- شکل ۷-۶ : موقعیت و عمق چاه مورد مطالعه در مخزن فهلیان ۱۳۰
- شکل ۸-۶ : منحنی نرخ تولید هیدروکربن از چاه مورد مطالعه ۱۳۰
- شکل ۹-۶ : پروفیل تراکم مخزن در فضای اطراف چاه مورد مطالعه ۱۳۱
- شکل ۱۰-۶ : درصد تغییرات تخلخل در فضای اطراف چاه مورد مطالعه ۱۳۵
- شکل ۱۱-۶ : درصد تغییرات تراوایی در فضای اطراف چاه مورد مطالعه ۱۳۵
- شکل ۱۲-۶ : افزایش تراکم مخزن در طول دوره شبیه سازی ۱۳۶
- شکل ۱۳-۶ : متوسط تراکم مخزن در محل چاه های مخزن با و بدون چاه های تزریقی ۱۳۷
- شکل ۱۴-۶ : تغییرات تخلخل و تراوایی مخزن، در نتیجه استخراج هیدروکربن ۱۳۸
- شکل ۱۵-۶ : تغییرات تراکم مخزن به ازای مقادیر مختلف ضریب پواسون ۱۴۰
- شکل ۱۶-۶ : تغییرات تراکم مخزن به ازای مقادیر مختلف مدول یانگ ۱۴۰
- شکل ۱۷-۶ : مقایسه نرخ تراکم سالیانه مخزن برای دو حالت با ویسکوزیته های مختلف ۱۴۱

فهرست جداول

- جدول ۵-۱: مینیمم و ماکسیمم پارامترهای الاستیک سازند های مخزن فلهلیان ۱۰۰
- جدول ۵-۲: متوسط پارامترهای الاستیک سازند های مخزن فلهلیان ۱۰۰
- جدول ۵-۳: خصوصیات مکانیکی و تراکم کل لیتوفاسیس های مخزن ۱۰۰
- جدول ۵-۴: مقدار عبارت $A = R \int_0^{\infty} J_1(\alpha R) J_0(\alpha r) e^{-D\alpha} d\alpha$ ۱۰۴
- جدول ۵-۵: مقدار عبارت $B = R \int_0^{\infty} J_1(\alpha R) J_1(\alpha r) e^{-D\alpha} d\alpha$ ۱۰۴
- جدول ۵-۶: ضریب تأثیر حلقه ها و ضریب تأثیر هر قسمت از حلقه ۱۰۹
- جدول ۶-۱: پارامترهای ورودی شبیه سازی عددی مخزن فلهلیان ۱۲۳
- جدول ۶-۲: تعداد چاه های تولید/تزریق مخزن، در هر کدام از سال های شبیه سازی ۱۲۸
- جدول ۶-۳: میزان تراکم محاسبه شده در محل چاه مورد مطالعه ۱۳۱
- جدول ۶-۴: مقادیر تراوایی، $f(\phi)$ و ضریب a محاسبه شده برای مخزن فلهلیان ۱۳۴
- جدول ۶-۵: متوسط نرخ تولید هیدروکربن و تزریق سیال در چاه های مخزن ۱۳۶

فصل اول

کلیات پژوهش

۱-۱ پیشگفتار

استخراج سیالات موجود در فضاهاى خالی سنگ مخزن هیدروکربور باعث کاهش حجم کلی لایه های زیر سطحی و تراکم مخزن می‌گردد. در طول بهره برداری از مخزن، حجم و فشار سیال درون منافذ سنگ مخزن کاهش می‌یابند. این در حالی است که وزن پوسته زمین در بالای مخزن وضعیت تقریباً ثابتی از تنش فشاری عمودی بر روی مخزن ایجاد می‌کند، که باعث بوجود آمدن کرنش فشاری درون سنگ مخزن می‌گردد. فشردگی در مخزن چاه می‌تواند باعث بوجود آمدن فرونشست قابل توجهی در سطح و لایه های بالایی سنگ مخزن گردد (Bull, 2003).

فرونشست پیوسته در میداین و حوضه های نفتی می‌تواند باعث کاهش تخلخل تشکیلات میزبان نفت، همچنین باعث فعال سازی ساختارهای زیر سطحی گردد. این تغییرات ممکن است با برهم زدن یکپارچگی ساختار سازند میزبان هیدروکربن، باعث مهاجرت هیدروکربن ها به سمت مناطق و یا سازند های دیگر شود. کاهش تخلخل سازند میزبان، می‌تواند منجر به کاهش میزان تولید گردد. همچنین فرونشست با برهم زدن نظم ساختارهای زیر سطحی باعث افزایش فعالیت های لرزه خیزی در منطقه می‌گردد. موارد متعددی نیز گزارش شده که در آنها شکستگی چاه ها به دلیل تراکم و فرونشست مخزن خسارات فراوانی را در میداین نفتی به بار آورده است (Saif ud din et al., 2005).

رویکرد نوینی که اخیراً در مدیریت مخازن در صنعت نفت مطرح شده است، فرآیند بهینه سازی جامع مخزن (IRO)^۱ است که لازمه آن شناخت کامل ویژگی های مخزن و عملکرد آن می‌باشد. فرآیند مذکور دارای ۴ مرحله است که عبارتند از: (۱) شناسایی مخزن، (۲) طراحی نحوه توسعه میدان، (۳) کاربری میدان و (۴) کنترل و پایش مخزن (Beamer et al., 1998). مرحله نهایی که همان مدل سازی، پایش و کنترل تولید است در شناخت بهتر فرآیند ها و بهینه سازی تولید کنونی و آتی نفت نقش تعیین کننده ای دارد. بنابراین، توسعه روشی برای پایش بینی اثرات تولید نفت بر سطح، در

¹ Integrated Reservoir Optimization

طراحی تولید اقتصادی و مطمئن بالاخص در مناطقی که فرونشست سطح ممکن است اثرات فاجعه آمیزی در پی داشته باشد، ضروری می نماید.

روش های تجربی و محض بسیاری در پیش بینی تراکم و فرونشست زمین در مناطقی که در حال برداشت هستند، وجود دارد (Chrzanowski et al., 1998). تعیین محدوده و هندسه منطقه تولیدی مخزن، همانند فرونشست حقیقی، دشوار است. بنابراین توسعه روشی برای پیش بینی تراکم و فرونشست در میادین نفتی یکی از ضروریات تلقی می گردد. ایجاد مدل پیش بینی بایستی با انتخاب و توسعه بهترین روش برای مدل سازی تراکم مخزن و فرونشست زمین و بهبود ارتباط میان فرونشست، حجم برداشت، تغییر فشار مخزن و تراکم تشکیلات مخزن، انجام شود.

روش های گوناگونی را می توان برای نگاشت میزان پیشرفت تغییر شکل مخزن و سطح میدان ضمن گذر زمان به کار بست. روشی که بر مبنای پیمایش فاصله بین دهانه لوله های جداری صورت می گیرد، ساده است اما جابجایی لوله جداری نسبت به تغییر شکل تشکیلات را اندازه گیری نمی نماید (Nagel, 2001). سایر روش هایی که از اهمیت کمتر برخوردارند، عبارتند از چاه نگاری رادیواکتیو^۱، چاه نگاری میزان تخلخل^۲، پایش میکرولرزه ای^۳، تیلتمتر سطحی^۴ و درون چاهی^۵، لرزه نگاری چهاربعدی^۶ و انبساط سنج ها^۷. در این میان امکانات پایش تراکم موجود بر اساس چاه نگاری رادیواکتیو در تشکیلات، قابل اطمینان ترین روش است. از سویی روش لرزه نگاری کل مخزن نیز از توانایی قابل ملاحظه ای برخوردار است، اما در مراحل اولیه توسعه خویش قرار دارد (Maxwell, 1998).

رایج ترین روش در پایش فرونشست، که بالاخص در میادین نفتی موجود در خشکی کاربرد دارد ترازبایی و نقشه برداری زمینی است. در این روش، شبکه ای از ایستگاه ها در سطح و پیرامون

¹ Logging radioactive bullets shot

² Porosity logging

³ Microseismic monitoring

⁴ Surface tiltmeter

⁵ Borehole tiltmeter

⁶ 4D seismic

⁷ Extensometers

منطقه فرونشست قرار داده می شود، برداشت ها صورت گرفته و حرکت هر یک از ایستگاه ها مورد ارزیابی قرار می گیرد. این روش با وجود دارا بودن دقت قابل قبول، زمان بر و هزینه بر می باشد. در سال های اخیر از سیستم های موقعیت یاب جهانی GPS برای پایش فرونشست استفاده می شود. در این سیستم، ماهواره موقعیت یاب جهانی جهت تعیین حرکت افقی و قائم ایستگاه های گیرنده به کار برده می شوند. از مزایای اصلی سیستم اندازه گیری GPS در ترازیابی، امکان سنجش فرونشست به صورت پیوسته و دقیق (حداقل ۵ میلیمتر جابجایی قائم) با هزینه کم می باشد. البته وجود یک گیرنده و سیستم جمع آوری داده در هر ایستگاه از ضروریات این شبکه است.

اگرچه قدرت تفکیک زمانی بالا یکی از مزایای شبکه پیوسته GPS می باشد، اما قدرت تفکیک مکانی که با فواصل میان ایستگاه ها تعیین می شود، برای شناسایی و پایش فرونشست سطحی ناشی از استحصال نفت کفایت نمی کند. در چنین کاربردهایی قدرت تفکیک مکانی با دقت زیر کیلومتر لازم است (Ge et al., 2001).

در مقاله ای که توسط Xu از دانشگاه استنفورد در سال ۲۰۰۱ ارائه گردید، فن آوری نوینی در پایش مخزن از دید فرونشست سطحی معرفی شد. اساس چنین پایشی تلفیق مهندسی مخزن و سنجش از دور بوده که روشی را برای اندازه گیری زمینی و شبیه سازی عددی فراهم می سازند. بر اساس نمونه های انجام شده از میدین نفتی Lost Hills & Belridge و East Mesa روش پیشنهادی از کارایی قابل ملاحظه ای برخوردار بوده است. این روش نسبت به لرزه نگاری چهاربعدی دارای دو مزیت عمده است: نخست هزینه کمتر و دیگر قابلیت پایش پیوسته. لرزه نگاری چهاربعدی تعداد نقاط کمتری را در محور زمان برداشت می نماید، در مقابل روشی که در این مطالعه اتخاذ شده است قابلیت نمونه برداری با نرخ بالا را داراست، بنابراین پایش مخزن از نظر زمانی به واقعیت نزدیکتر خواهد بود (فولادی مقدم، ۱۳۸۸). این روش که پایش فرونشست به وسیله تداخل سنجی تصاویر رادار با گشودگی مصنوعی^۱ (InSAR) خوانده می شود از تغییر فاز میان یک زوج تصویر رادار ماهواره

^۱ Synthetic Aperture Radar Interferometry

ای برای تعیین دقیق تغییرات ارتفاعی استفاده می نماید (Fielding et al., 1998). این گونه گزارش شده است که InSAR قادر به پایش تغییرات میلیمتری در سطح زمین می باشد. با این وجود، تداخل سنجی SAR دارای محدودیت هایی است. نخست آنکه، InSAR تنها می تواند در میادین نفتی داخل خشکی به سبب اندازه گیری تغییر فیزیکی در فرونشست که در آب قابل تشخیص نیست، به کار رود. علاوه بر این، اندازه گیری های InSAR به تغییرات ظاهری در ارتفاع سطح به سبب رشد گیاهان و تغییرات آب و هوا حساس است. از سویی تداخل سنجی SAR با داده های حاصل از ماهواره های سنسجش از دور نظیر ERS و Envisat قابل اجراست که به سبب تعداد محدود این ماهواره ها، پوشش جهانی محدود در داده جمع آوری شده وجود ندارد (فولادی مقدم، ۱۳۸۸).

اخیراً در مهندسی مخزن مطالعه و شبیه سازی همزمان و ترکیبی^۱ جریان سیال و رفتار ژئومکانیکی سنگ مخزن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. معمولاً پدیده فرونشست را به وسیله دستگامی از معادلات دیفرانسیل معمولی و یا جزئی که در محدوده خاصی صادق است و شرایط مرزی و آغازین مناسبی را تامین می کند توصیف می کنند. در واقع یک معادله دیفرانسیل با شرایط مرزی و اولیه مورد نیاز خود یک مدل ریاضی کامل از یک پدیده است. برای یافتن توزیع متغیرهای مورد نظر که ارتباط آنها در فرم دیفرانسیلی توسط معادله حاکم بیان می گردد، می بایست معادله مذکور حل گردد تا بتوان مقادیر عددی هر کمیت مرتبط را در نقطه دلخواه بدست آورد. اما با توجه به اینکه تنها می توان اشکال بسیار ساده این معادلات آن هم در ناحیه های هندسی بسیار ساده را با روش های تحلیلی حل نمود، در حل اغلب معادلات حاکم به روش تحلیلی با مشکل بزرگی مواجه هستیم. برای مقابله با چنین مشکلاتی ضروری است که مسأله مورد نظر در یک قالب کاملاً جبری ریخته شود تا حل آنها تنها نیازمند عملیات جبری باشد. برای دستیابی به چنین هدفی می توان از انواع مختلف روش های گسسته سازی یک مسأله پیوسته تعریف شده به وسیله معادلات دیفرانسیل استفاده نمود. در این روش ها تابع و یا توابع مجهول که می توان آنها را با مجموعه ای نامتناهی از اعداد نشان داد،

^۱ Coupled

به وسیله تعداد متناهی از پارامترهای مجهول جایگزین می گردند که طبیعتاً در حالت کلی نوعی تقریب را در بر دارد. از روش های عمده در حل عددی معادلات دیفرانسیل حاکم بر مخازن در حال بهره برداری، می توان روش های تفاضل محدود^۱ و روش اجزای محدود^۲ را نام برد.

شبیه سازی تراکم و فرونشست با استفاده از روش های عددی می تواند ابزاری سودمند جهت ارزیابی تأثیرات ویسکوزیته سیال، ضخامت مخزن، نرخ تولید هیروکربن و نرخ تزریق سیال بر تراکم مخزن و فرونشست میدان نفتی باشد. همچنین می توان از این مدل سازی ها برای بدست آوردن تخمین های مهندسی از درجه پیشرفت و نرخ فرونشست، گسترش منطقه ای آن و همه پارامترهایی که مستقیماً مربوط به نرخ ورود و یا استخراج سیال دارند استفاده نمود.

در بعضی موارد استفاده از روش های عددی برای شبیه سازی و پیش بینی کامل فرونشست و تراکم مخزن کار مشکلی بوده و معمولاً فراهم کردن پارامترهای مورد نیاز برای معادلات مورد استفاده در این روش ها هزینه بالایی خواهد داشت. در این شرایط روش تحلیلی که با استفاده از معادله Geertsma و بر اساس معادلات هسته کرنش^۳ مکانیک سنگ اجرا می شود، همچنان ابزاری با ارزش و سریع در ارزیابی فرونشست مخازن هموژن دیسک شکل می باشد. از آنجایی که اغلب مخازن جهان دارای این شرایط می باشد. این روش یکی از روش های پر کاربرد در بررسی تراکم و فرونشست مخازن است (Dung, 2007).

۱-۲ پیشینه پژوهش

فرونشست مشکلی است که از دیرباز برای انسان ها مشکل ساز بوده و صدمات جدی بر تجهیزات و ساخته های بشر وارد آورده و گاهاً فاجعه های مصیبت باری را سبب شده است. ممکن است فرونشست به دلیل استخراج سیال از مخازن هیروکربن، پمپاژ آب از سفره های آب زیر زمینی، استخراج سیال ژئوترمال، معدنکاری و تونل سازی رخ دهد. تراکم مخازن گاز و نفت مکانیسم اصلی

¹ Finite Difference Method (FDM)

² Finite Element Method (FEM)

³ Nucleus of strain equations

ایجاد مشکلات پرهزینه در میدان نفتی در تمام دنیا می باشد. بزرگ ترین مشکلات ناشی از فرونشست در نروژ، روسیه، ایتالیا، ونزوئلا، ژاپن و در کالیفرنیا، تگزاس و خلیج مکزیک آمریکا گزارش شده است (Brun and Hilbert, 2003). برای مثال، تراکم مخزن در میدان Ekofisk در دریای شمال، فرونشست بالغ بر ۱۶ فوت، و هزینه ای معادل ۴۰۰ میلیون دلار برای تعمیر سکوه‌های درون آب جک آپ^۱ به بار آورد. تراکم مخزن و خسارت ناشی از آن بر لوله های جداری چاه همچنان مشکلی اساسی در میدان های دریای شمال می باشد (Kenter et al., 1998; Patillo et al., 1998).

یکی از نخستین نمونه های فرونشست ناشی از استخراج سیال هیدروکربوری به برداشت از میدان نفتی Goose creek در ساحل خلیج تگزاس در ایالات متحده آمریکا مربوط می باشد که در سال ۱۹۱۸ تشخیص داده شد و در سال ۱۹۲۶ توسط Pratt and Johnson تشریح گردید. از آثار وقوع این فرونشست می توان به پایین افتادگی جاده ها و خطوط ساحلی در کنار گسلش سطحی اشاره نمود (Nagel, 2001).

مشکلات پرهزینه و گسترده ناشی از فرونشست و تراکم مخزن در San Joaquin valley واقع در نزدیکی شهر لس آنجلس و Bakersfield در جنوب کالیفرنیا گزارش شده است. بخش هایی از شهر و بندر Long Beach در کالیفرنیا، تحت تأثیر فرونشست سطحی بسیار سریعی بوده اند. هنگامی که سطح مذکور با حداکثر فرونشست مطابق با داده های ترازیبی کنترل شد، به طرز قابل ملاحظه ای با سطح برداشت میدان نفتی Wilmington منطبق بود. از سویی دیگر کاملاً مشخص گردید که فرونشست مطابق با مدارک ثبت شده در سال ۱۹۳۷ در اندک زمانی پس از آغاز برداشت از میدان رؤیت شده است (Mayuga, 1970). تراکم مخزن در میدان Wilmington کالیفرنیا که ناشی از اشباع شدگی و کرنش های افقی بر دیواره های گودال فرونشست در مناطق در حال استخراج نفت بود، باعث فرونشستی معادل ۳۳ فوت، زمینلرزه و صدها مورد شکستگی چاه و خسارات تأسیسات روی سطح گردید. در سال ۱۹۶۲، مشکلات ناشی از فرونشست در میدان Wilmington و نواحی اطراف آن

^۱ Jack up

هزینه ای بالغ بر ۱۰۰ میلیون دلار به منظور تعمیر و کاهش اثرات آن در بر داشت (Brun and Hilbert., 2003). میدان Belridge در San Joaquin Valley واقع در نزدیکی Bakersfield کالیفرنیا مدت زیادیست که دچار مشکلات ناشی از فرونشست و تراکم مخزن شده است. این میدان از سال ۱۹۱۱ مورد بهره برداری قرار می گردد و اکنون یکی از بزرگترین میادین تولید کننده نفت در آمریکا می باشد. میدان Lost Hills که در San Joaquin Valley و در موقعیت جغرافیایی مشابهی با میدان Belridge واقع شده، تاریخچه تراکم و مشکلات شکستگی چاه مشابهی با میدان Belridge دارد (Bruno, 1992).

در سال ۱۹۷۴، L.C.Graham از مرکز فضائی Goodyear برای نخستین بار بیان نمود که می توان از مزیت فاز ثابت شده توسط رادار هواپرد برای اندازه گیری میزان جابجایی قائم سطح زمین استفاده نمود. Massonnet در سال ۱۹۹۳ یک سری از تصاویر رادار را که توسط ماهواره های آژانس فضایی اروپا دریافت شده بود، برای تهیه تصویری تأثیر گذار از تغییر شکل ناشی از زمین لرزه Landers به بزرگی ۷٫۳ در مقیاس ریشتر، که در ۲۸ ژوئن سال ۱۹۹۲ در ۱۵۰ کیلومتری شرق لس آنجلس رخ داد، به کاربرد. جزئیات بصری قابل ملاحظه در تصویر که معرف الگوی جابجایی با استفاده از مدل های تئوریکی چنین زلزله ای بود، ژئودزین های سراسر دنیا را متعجب نمود.

نخستین پروژه های تعریف شده InSAR در میدان نفتی Belridge توسط مرکز علمی Atlantes انجام شد و در اوایل ۱۹۹۷ به چاپ رسید (Mayer and Van der Kooij, 2002). چندی بعد فرونشست مذکور توسط Fielding و همکارانش در سال ۱۹۹۸ با استفاده از تحلیل داده تداخل سنجی رادار با دریچه مصنوعی که توسط ماهواره های سنجنش از دور آژانس فضایی اروپا (ERS-1 و ERS-2) جمع آوری شده بود، اندازه گیری شد. حداکثر میزان فرونشست به بزرگی ۴۰ میلیمتر در ۳۵ روز و یا بیش از ۴۰۰ میلیمتر در سال بوده است که از طریق تداخل نما هایی با فاصله زمانی ۱ تا ۲۶ ماه به دست آمده اند (Burgmann, 2000).

Wicks و همکارانش در سال ۱۹۹۸ از رادار پهلوونگر با دریچه مصنوعی^۱ برای پایش تغییر شکل تمام سطح کالدرای Yellowstone استفاده نمودند. تداخل نماهای متوالی مشخص نمود که فرونشست در داخل کالدرای طی سه سال از یک گنبد در حال رشد به گنبد دیگر مهاجرت نموده است. در سال چهارم منطقه کالدرای در نزدیک گنبد شمال شرقی متورم شد و بالآمدگی سطحی پس از آن نیز یک سال بعد به گنبد جنوب غربی مهاجرت نمود. ایشان بیان نمودند که داده تغییر شکل به دست آمده با مهاجرت سیال هیدروترمال به داخل یا خارج توده های شبه سیل که تقریباً ۸ کیلومتر در زیر کالدرای قرار گرفته اند، منطبق می باشند (Wicks et al., 1998).

در سال ۲۰۰۶ نیز فرونشست میدان نفتی Burgan در کویت توسط Petrat با بکارگیری روش تداخل سنجی داده SAR مورد مطالعه قرار گرفت و تغییرات ناچیز (۲۷ میلیمتر) توپوگرافی آن طی سه سال به طور دقیق بررسی گردید (Al-Enezi and Petrat, 2006).

لازم به ذکر است که میدان گازی Lacq فرانسه، میدان ژئوترمال Cerro prieto مکزیک، میدان نفتی Ekofisk دریای شمال، Maracaibo ونزوئلا و میدان نفتی آغاچاری در ایران نیز از جمله میادینی هستند که در آنها ارزیابی میزان فرونشست به طریق تداخل سنجی تفاضلی رادار صورت گرفته است (فولادی مقدم، ۱۳۸۹).

پاسخ مکانیکی سازند به استخراج سیال توسط Thomason و Gray مطالعه گردیده است. آنها اظهار نمودند که سنگ های مخزن می توانند تغییر شکلی وابسته به زمان و قابل ارزیابی در چارچوب زمان و وابسته به عملیات تولید سیال داشته باشند. آنها مشاهده نمودند که این رفتار خزشی در هر دو جزء کرنش حجمی و کرنش انحرافی دیده می شود. کاهش تراکم پذیری کل سنگ ها همراه با افزایش تنش مؤثر یا با افزایش کرنش به وسیله چندین محقق و با استفاده از تست آزمایشگاهی اثبات شده است (Rieke et al., 1969; Chilingar et al., 1983; Thompson and Gray, 1983).

^۱ Synthetic Aperture Radar (SAR)

بر اساس خصوصیات ژئومکانیکی مخازن هیروکربوری و لایه های روباره فرونشست سطح قابل پیش بینی می باشد. تا به حال روش های متعددی جهت محاسبه تراکم و فرونشست مخزن به کار گرفته شده است: تحلیلی (Geertsma, 1973a; Knoth, 1953)، نیمه تحلیلی (Fokker, 2002; Fokker and Orlic, 2006)، عددی (Sroka and Hejmanowski, 2006)، روش اختلاف محدود (Donaldson, 1995) و روش های اجزای محدود (Geertsma and van Opstal, 1973; Fredrich et al., 2000).

حل تحلیلی پیش بینی فرونشست و تراکم که توسط Geertsma (1973a) ارائه داده شد، فرض می کند که روباره مخزن همگن و الاستیک است. Geertsma جهت محاسبه اثر تراکم مخزن بر سطح، مخزن را دیسکی شکل و همگن فرض می کند. همچنین مخزن را به عنوان مرکز یا هسته کرنش محیط اطرافش (سنگ پوشش) در نظر گرفت. Holt (1990) روابط Geertsma را بیشتر بررسی نمود. از آنجایی که مخازن به طور کامل دیسک شکل و همگن نمی باشند، Reddish و همکارانش (1994) مخزن را به المان های مکعبی تقسیم نمودند که هر یک ویژگی ژئومکانیکی خود را داراست. در نتیجه تابع تأثیر جهت تخمین فرونشست ناشی از هر کدام از المان های مخزن در سطح بکار برده شد. چندین رابطه تجربی تابع تأثیر در بررسی فرونشست معدن بکارگرفته شده، که معروفترین آنها تابع Knoth (1953) می باشد. Chrzanowski (2006) از این تابع جهت بررسی تأثیر تراکم مخزن بر فرونشست سطح میدان Maracaibo در ونزوئلا استفاده نمود. نتایج بدست آمده از این مدل سازی با نتایج حاصل از مدلسازی با روابط Geertsma مطابقت داشت.

روش اجزای محدود از مدلی ژئومکانیکی جهت شبیه سازی تراکم مخزن و فرونشست بهره می گیرد. Morita و همکارانش در سال ۱۹۸۸ مدلی برای مشخص نمودن فرونشست، تراکم و تنش برجای ایجاد شده به دلیل تغییر فشار منفذی ارائه کرد. آنها به منظور یافتن گروه پارامترهایی که تنش های برجاء، فرونشست و تراکم را کنترل می کنند، به مطالعه پارامترها پرداختند. این گروه پارامترها به منظور آنالیز نتایج محاسبه عددی که به وسیله مدل اجزای محدود، غیر خطی، جامع و

سه بعدی بدست آمده بودند، بکاربرده شدند. مدل علاوه بر داده های خصوصیات مخزن، داده های مربوط به سنگ پوشش مخزن¹ را نیز در نظر می گیرد. این مؤلفین تاکید نمودند که داده های سنگ پوشش بدلیل اینکه بسیاری از مخازن هیدروکربون ضخیم و کم عمق هستند و مدول الاستیسیته آنها متفاوت از سازندهای محصور کننده آنها می باشد، بسیار مهم می باشند (Morita et al., 1988).

Fredrich و همکارانش (2000) جابجایی قائم در مخزن Belridge و روبره اش را با استفاده از مدل اجزای محدود، مدل سازی نمودند. برتری مدل های اجزای محدود توانایی آنها در مدل سازی مخازن با اشکال مختلف و توزیع فشار متغیر می باشد. همچنین در صورت موجود بودن توزیع پارامترهای تغییر شکل تخمینی دقیق از جابجایی قائم ارائه می دهند. Geertsma و Opstal (1973) نیز از روش اجزای محدود جهت مدل سازی تراکم مخزن بهره جستند. Fokker (2000) و Fokker and Orlic (2006) مدلی نیمه تحلیلی برای مدل سازی تراکم و فرونشست ناشی از آن معرفی نمودند. یکی از معایب روش های اجزای محدود وقت گیر بودن آنهاست. اما روش های نیمه تحلیلی همانند روش های عددی وقت گیر نبوده و نسبت به روش های تحلیلی مدل پیچیده تری را استفاده می کنند.

Donaldson (1995) با استفاده از روش اختلاف محدود تراکم مخزن Wilmington کالیفرنیا را براساس میزان تولید هیدروکربن از مخزن و همچنین تزریق سیال به آن بررسی نمود. روش اختلاف محدود به طور وسیعی در صنعت نفت و مهندسی مخزن جهت شبیه سازی مخزن مورد استفاده قرار می گیرد. محاسبات کد اختلاف محدود در عین کارآمدی به حافظه کمی جهت پردازش احتیاج دارند. روش Donaldson با استفاده از پارامترهایی که به سادگی از مخازن بدست می آیند، تخمینی دقیق و سودمند از تراکم مخزن ارائه می نماید.

این پژوهش جزء اولین مطالعات فرونشست و تراکم مخازن هیدروکربوری با استفاده از روش اینترفرومتری در کشور می باشد. در این مطالعه کارآیی این روش در ارزیابی فرونشست سطح میادین

¹ Caprock

واقع در آب های خلیج فارس بررسی گردیده است. همچنین در مطالعه حاضر روش اختلاف محدود Donaldson و کد مورد استفاده وی برای ارزیابی رابطه بین میزان تولید هیدروکربن و میزان تراکم حاصل از آن در میدان درود تصحیح و استفاده شد، و نتایج با استفاده از روش تحلیلی Geertsma تأیید گردید. در این مطالعه نرخ متفاوت تولید در دوره شبیه سازی مورد توجه قرار گرفت و از رابطه تراوایی و تخلخل بدست آمده برای میدان درود استفاده شد. برتری ویژه این روش استفاده از داده هایی است که براحتی در میادین نفتی کشور قابل دست یابی و حصول است. همچنین در این مطالعه برای اولین بار در ایران ایده کالیبراسیون نتایج تداخل سنجی تفاضلی با استفاده مدل سازی های ژئومکانیکی مطرح می گردد. هرچند این ایده با ناکارآمدی روش تداخل سنجی در جزیره خارگ عملی نشد. اما در صورت استفاده از این روش ها در میادین نفتی واقع در مناطق خشک کشور نتایج قابل قبولی حاصل خواهد شد.

۱-۳ اهداف پژوهش

به طور کلی اهداف مطالعه صورت گرفته را می توان در موارد زیر خلاصه نمود.

- بررسی کارآیی روش تداخل سنجی تصاویر SAR در ارزیابی فرونشست میدان درود.
- استفاده از مدل های تحلیلی و عددی جهت محاسبه میزان تراکم و فرونشست مخزن.
- بررسی رابطه بین نرخ تراکم مخزن و فرونشست سطح میدان.
- بررسی رابطه تراکم مخزن فلهلیان با نرخ تولید هیدروکربن از مخزن و تزریق سیال به آن.
- ارائه رابطه بین تخلخل و تراوایی مخزن فلهلیان.
- بررسی میزان تغییرات تراوایی و تخلخل مخزن در نتیجه تراکم مخزن.
- بررسی تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی و هیدروژئولوژیکی بر میزان تراکم مخزن.
- بررسی انواع روش هایی که در مخازن مختلف جهت پایش تراکم و فرونشست مورد استفاده قرار گرفته اند.

۴-۱ ساختار پایان نامه

در این پایان نامه و در فصل دوم به تفصیل به موقعیت جغرافیایی، وضعیت زمین شناسی، چینه شناسی و تکتونیک میدان نفتی درود پرداخته خواهد شد. در فصل سوم مکانیسم تراکم مخزن و فرونشست سطح میدان نفتی ضمن تولید و برداشت سیالات هیدروکربوری از دلایل وقوع تا مدل سازی این پدیده ها تشریح خواهد گردید. از آنجایی که در این پژوهش از روش های متفاوتی جهت ارزیابی میزان تراکم و فرونشست مخزن استفاده می شود، در فصول ۴ تا ۶ این پایان نامه ابتدا اصول هر یک از این روش ها بیان خواهد شد و در ادامه نتایج استفاده از آن ها در میدان نفتی درود تشریح می گردد. در فصل ۴ ابتدا اصول کلی حاکم بر تداخل سنجی تفاضلی رادار به عنوان فن آوری نوینی جهت پایش سریع فرونشست سطح، بررسی شده و سپس نتایج استفاده از این فن آوری در جزیره خارگ (بخش خشکی میدان درود) تشریح می گردد. در انتهای فصل نیز دلایل عدم کارایی این روش در جزیره خارگ عنوان خواهد شد. در فصل ۵ روش تحلیلی پرکاربرد و معتبر هسته کرنش Geertsma معرفی شده و در ادامه نتایج استفاده از ترکیب این روش با روش تابع تأثیر، جهت تخمین تراکم و فرونشست میدان، بررسی خواهد شد. در فصل ۶ نیز نتایج استفاده از روش عددی اختلاف محدود جهت ارزیابی تراکم مخزن مورد بررسی، تحلیل و تفسیر قرار خواهد گرفت. همچنین در این فصل رابطه بین تراکم و تخلخل مخزن فلهلیان مشخص شده و تأثیر تراکم بر تخلخل و تراوایی مخزن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در انتهای فصل نیز نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای تأثیرگذار بر نتایج مدل سازی تشریح می گردد. فصل پایانی نیز به نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات جهت بهبود کار در پروژه های آتی در میدان درود و سایر میادین نفتی ایران می پردازد.

فصل دوم

معرفی منطقه مورد مطالعه

۲ - ۱ حوزه خلیج فارس

خلیج فارس دریایی است که در بین رشته کوههای زاگرس در شمال و صفحه عربی در جنوب واقع گردیده است. طول آن در حدود ۸۰۰ کیلومتر و عرض آن ۱۱۵-۱۸۵ کیلومتر بوده و سطحی در حدود ۲۲۶۰۰۰ کیلومتر مربع را می پوشاند. عمق آن به طور متوسط حدود ۳۵ متر و عمیقترین نقطه آن در تنگه هرمز در حدود ۱۰۰ متر است، و فقط از طریق تنگه هرمز با عرض حدود ۵۳ کیلومتر با دریای عمان در ارتباط است.

خلیج فارس محدوده عرض جغرافیایی ۲۴ تا ۳۰ درجه و طول جغرافیایی ۴۸ تا ۵۸ درجه با روند کلی شرقی- غربی را در بر می گیرد و دارای آب و هوایی خشک و نیمه استوایی است. محور طولی خلیج فارس به دلیل عدم تقارن دو ناحیه ریخت شناسی جداگانه را مشخص می کند. کف حوضه در بخش ایرانی که از نظر تکتونیکی ناپایدار است (شیب ۱۷۵ سانتی متر در هر کیلومتر) در حالیکه در بخش عربی پایدار و شیب ملایمی به طرف محور بایومتریک حوضه دارد (۳۵ سانتی متر در هر کیلومتر) و در حال حاضر به صورت یک رمپ کربناته است. لذا این محور بویژه در در نیمه شرقی حوضه به سواحل ایرانی نزدیک است و موقعیت و جهت یافتگی عناصر آن معلول روند های تکتونیکی بخش ایرانی است. خلیج فارس به یک سری ایالت باتومتریکی تقسیم می شود، یک برجستگی مشخص به نام برآمدگی مرکزی^۱ با روند شمال غربی - جنوب شرقی که مربوط به سیستم چین خورده ایرانی یا احتمالاً از منشا رسوبی نیمه ایرانی است حوضه را به دو فرو افتادگی ثانویه تحت عناوین حوضه غربی و حوضه مرکزی تقسیم نموده است.

بخش عربی خلیج فارس توسط Seibold و Vollbrech اساساً بدلیل اقیانوس شناسی تحت عنوان سکوی کم عمق عربی نامیده شده است. بهر حال باید توجه داشت که این بخش توسط kassler هموکلاین عربی نامیده شده است. گرچه شیب هموکلاین عربی ملایم است ولی امواج در طول ساحل عربی آشفته می باشد. (زینالی، ۱۳۸۱)

^۱ Central Swell

۲-۱-۱ زمین شناسی خلیج فارس

خلیج فارس امروزی یک فروافتادگی زمین ساختگی کم عمق است که در اواخر دوران سنوزوئیک در بخش پیشین سلسله جبال زاگرس تشکیل گردیده است. ساحل خشک و پایین افتاده کشورهای عربی و دریای کم عمق مجاور آن بوسیله تاقدیس های با شیب کم و روند شمال - جنوب یا شمال شرقی - جنوب غربی مشخص می گردند که شامل اغلب حوضه های نفتی ناحیه می شود. تعدادی از این تاقدیس ها مانند بحرین و دوخان احتمالاً دارای برجستگی ممتد بوده که بدلیل رشد نمک از زمان مزوزوئیک می باشد. قسمتی از خط ساحلی کشورهای عربی توسط فرآیند های ساختمانی کنترل می شود. بر خلاف سواحل عربی، سواحل ایران اکثراً مرتفع می باشند.

ساختمان های گنبدی شکل موجود در خلیج فارس (جزایر خلیج فارس) را می توان به سه

دسته تقسیم نمود:

۱. دیابیرهای نمکی، که شدت بالآمدگی توده نمک بحدی بوده که تمام طبقات رسوبی را قطع نموده و اغلب بصورت جزایری (موازی روند زاگرس) نمودار می گردند همانند جزایر هرمز، لارک، ابوموسی و هنگام.
۲. ساختمان های تاقدیسی که دارای دامنه شدید بوده و مطالعات ژئوفیزیکی و حفاری های اکتشافی نشان داده است که هیچیک از طبقات زمین شناسی حتی تا افق خوف مورد یورش نمک کامبرین قرار نگرفته اند. از این ساختمان ها فارسی، گلشن، اورنگ، تندر را می توان نام برد.
۳. ساختمان های تاقدیسی شکل که از آرامش نسبی بیشتری برخوردار بوده و دارای دامنه های آرامتری می باشد. اکثر میدان های نفتی فلات قاره ایران در خلیج فارس از این نوع می باشند.

بنابراین جزایر خلیج فارس که در مجاورت سواحل ایران قرار دارد یا به صورت تاقدیس (مانند جزایر خارگ، لاوان، هندورابی و کیش) و یا به صورت گنبد های نمکی (مانند جزایر بنی فارور، تنب بزرگ و کوچک) می باشند.

۲-۱-۲ نوع رسوبات در خلیج فارس

خلیج فارس که از دریا های حاشیه ای^۱ عهد حاضر است، دارای رسوبات کربناته به مقدار زیاد در سواحل جنوبی می باشد. در مناطق عمیق این حوضه، در طول محور خلیج فارس بیشتر رسوبات دانه ریز (گلی) کربنات کلسیم تشکیل می شود که حاوی مقداری پوسته جانوران و ذرات ریز آواری می باشد. میزان مواد ارگانیکی در رسوبات این منطقه زیاد بوده و سنگ حاصله مادستون تیره رنگی است که حاوی فسیل می باشد. این نهشته ها به طرف ساحل به رسوبات دانه متوسط مناطق کم عمق تر تبدیل می شوند. به علت رسوبگذاری آرام، در مناطق عمیق تر این حوضه، دانه های گلوکونیت تشکیل می شود. در نواحی کم عمق این حوضه، ریف های مرجانی و ائید نیز دیده می شود که به سمت ساحل رسوبات دانه ریز کربناته، در محیطی آرام، در پشت سد های ریفی و الیتی و در مناطق مردابی رسوب کرده اند. (گزارش شرکت نفت فلات قاره شماره زش ۱-۱۳۸۲).

بدلیل تغییرات درجه شوری در این حوضه، تنوع موجودات آن کم است. بنابراین سنگ آهک حاصل از ته نشست رسوبات آن به صورت مادستون پلت داری است که بسیار کم فسیل می باشد. در طول ساحل، پهنه های جزر مدی توسط جلبک های سبز - آبی و ورقه های استر ماتولیتی پوشیده است. این پهنه های جزر و مدی دارای ترک های گلی نیز می باشند. در پهنه های بالای جزر و مدی، یا محیط های سبخایی، رسوبات گلی کربناته ای تشکیل می شود که حاوی مقدار کمی بلورهای ریز دولومیت و بلورهایی از ژیپس و انیدریت است. بنابراین سنگ حاصل از ته نشست رسوبات این منطقه مادستون لامینه داری بوده که ممکن است حاوی استروماتولیت، دولومیت و ژیپس باشد.

^۱ Epicontinental

۲-۲ فلات قاره و تقسیمات هیدروکربوری منطقه

فلات قاره ایران در خلیج فارس مابین دو حوضه نفتی عظیم قرار گرفته است: مناطق نفت خیز جنوبی ایران از شمال و نواحی نفت خیز واقع در آب های بین المللی از طرف جنوب. اکتشاف نفت در قسمت جنوبی فلات قاره خلیج فارس در اوایل دهه ۱۹۵۰ و در فلات قاره ایران در اواخر این دهه شروع گردیده است. در سال ۱۹۷۵ برای اولین بار قرار داد نفتی جهت اکتشاف و بهره برداری از منابع نفتی فلات قاره ایران بین شرکت ملی نفت ایران و شرکت ایتالیایی آجیپ و شرکت نفتی آمریکایی پان آمریکن منعقد گردید. میدان نفتی بهرگانسر اولین میدان نفتی است که در فلات قاره ایران در سال ۱۹۶۰ کشف شده. در سال ۱۹۶۲ میدان نفتی درود (داریوش) و متعاقباً میادین دیگر کشف گردید (زینالی، ۱۳۸۱). پراکندگی مکانی میدان های نفتی شرکت نفت فلات قاره ایران در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.

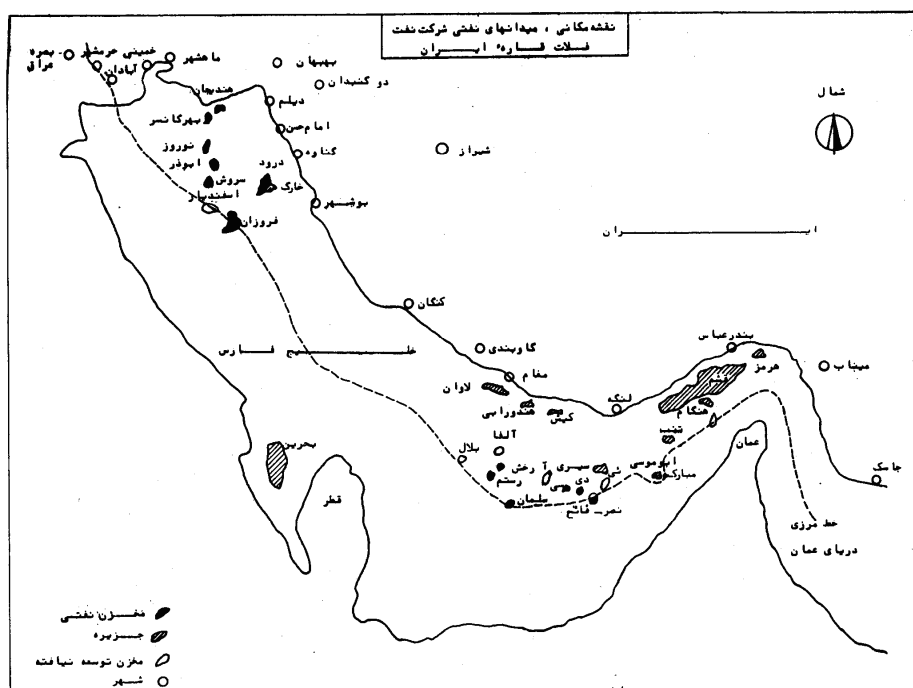
فلات قاره ایران در خلیج فارس بر اساس ویژگی های چینه ای، ساختمانی، سنگ منشاء سنگ مخزن و سنگ پوشش به پنج ناحیه تقسیم شده است. (زینالی، ۱۳۸۱).

ناحیه اول: شامل غرب فلات قاره ایران در خلیج فارس است و از نظر منابع هیدروکربور غنی ترین ناحیه است. سنگ مخزن در این ناحیه بیشتر از نوع ماسه سنگی و شامل سازندهای کژدمی (Burgun)، بخش ماسه سنگی اهواز (غار) و گدوان یا (Zubair) است، سنگ مخزن های آهکی بیشتر در سازندهای آسماری داریان و فهلیان قرار دارند. میادین موجود در این ناحیه شامل میادین ابوذر، اسفندیار، بهرگانسر، خارگ، درود است. بعضی از طاقدیس ها در ناحیه روند شمالی - جنوبی داشته و در راستای ساختمان های زمین شناسی عربستان اند (مانند میادین نروز، درود) بعضی تاقدیس ها (مانند میادین ابوذر و سیری) دارای ساختمان های متفاوت با دامنه کم هستند.

ناحیه دوم: این ناحیه از حوالی بندر بوشهر شروع شده و تا جزیره لاوان را شامل می شود. سنگ مخزن در این ناحیه بر اثر حرکت دیپایر ها است، که با سایر نقاط خلیج فارس و زاگرس متفاوت است. حرکت دیپایر ها موجب کاهش ضخامت در بخش های فوقانی طاقدیس، تضعیف سنگ پوشش و

مهاجرت مواد هیدروکربور به سمت قسمت های سطحی می شود. این حالت در میدان فارسی وجود دارد.

ناحیه سوم: این ناحیه قسمت شمالی و شرقی بلندی قطر (آرک قطر) را در بر می گیرد. بزرگترین مخازن گازی دنیا در سازندهای پرمین - تریاس (میدان پارس جنوبی) در این ناحیه قرار دارد. ناحیه چهارم: این ناحیه بین بلندی قطر و تنگه هرمز قرار دارد. سنگ مخزن این ناحیه کربناته و بیشتر از سازند های سروک، داریان و بخش فوقانی سازند سورمه (زون عرب) می باشد. ناحیه پنجم: این ناحیه تنگه هرمز را در بر می گیرد. مخازن آن بیشتر کربناته و شامل سازندهای سروک و داریان هستند. (زینالی، ۱۳۸۱).



شکل ۱-۲ نقشه مکانی میدان های نفتی شرکت نفت فلات قاره ایران

۲-۲-۱ موقعیت و تاریخچه میدان درود

ساختمان میدان نفتی درود طاقدیس نامتقارنی است که از شرق به سمت جنوب غربی امتداد یافته است این ساختمان بین مختصات $X = 2017000$, $Y = 830000$, $X = 2005000$, $Y = 804000$

در سیستم مختصات لامبرت قرار گرفته است و وسعتی بالغ بر ۱۲۵ کیلومتر مربع را دارا می باشد. این میدان یکی از میداین نفتی مهم حوضه خلیج فارس محسوب می گردد که بخش جنوبی آن در آب های خلیج فارس و بخش شمالی آن در جزیره خارگ واقع گردیده است. امتداد محوری این میدان با امتدادهای معمول زاگرس در تضاد است و معمولاً به این امتداد روند عربی می گویند که کم و بیش شمالی - جنوبی است. این میدان نفتی در سال ۱۳۴۰ بوسیله شرکت IPAC (Iran pan American Company) کشف گردید و یکسال پس از کشف، حفاری در آن آغاز گردیده و از سال ۱۳۴۳ بهره برداری از آن شروع شده است. از سال ۱۳۵۷ به سبب شکل گیری انقلاب اسلامی بهره برداری از آن موقتاً به تعویق افتاد. مخازن این میدان شامل قسمت بالایی بخش ماسه ای اهواز (آسماری) دارای نفت ۲۲ درجه API (نفت نسبتاً سنگین) و سازند فهلیان (پاماما و منیفا) دارای نفت ۳۴ درجه API (نفت سبک) می باشد که تولید از این سازند صورت می گیرد و تا همان سال مجموع کل تولید تقریباً ۴۲۱ میلیون بشکه بوده است.



شکل ۲-۲ موقعیت میدان دردور و جزیره خارگ در خلیج فارس

۲-۲-۲ زمین شناسی عمومی میدان دردور

اطلاعات بدست آمده درباره زمین شناسی عمومی میدان نفتی دردور بر اساس نمونه های حاصل از چاه، مطالعات فسیل شناسی و چینه شناسی انجام شده بر روی چاه های تولیدی، سرعت حفاری،

تغییرات نمودارهای الکتریکی و مقایسه هر یک از موارد فوق الذکر در چاه های مجاور یکدیگر می باشد.

به طور کلی توالی سازندهای ذیل به ترتیب افزایش عمق در چاههای حفاری شده در این میدان قابل پیگیری می باشد

سازندهای آغاچاری - میشان - گچساران (گروه فارس)

این سازند ها بطور غیر قابل تفکیک مشاهده شده و شامل سنگ آهک مارنی، مارن، انیدریت، شیل، ماسه سنگ و سیلت استون می باشد.

سازند آسماری

پیش از این، به سازند آسماری آهک های فرات، آهک های خمیر و آهک های کلهر گفته می شد. برش نمونه ی این سازند اولین بار توسط ریچاردسون در تنگ گل ترش روی دامنه ی غربی تاقدیس کوه آسماری بررسی شد. توماس در سال ۱۹۵۰ به طور مفصل برش اصلی این سازند را مطالعه کرد.

سنگ شناسی این سازند از ۳۱۴ متر آهک های کرم رنگ تا قهوه ای حاوی فسیل های صدف تشکیل شده است. سازند آسماری به طور هم شیب بین سازند پابده (در زیر) و سازند گچساران (در بالا) قرار دارد. در برش نمونه فقط قسمت میانی و بالایی سازند آسماری وجود دارد و قسمت پایین به طور جانبی با سازند شیلی پابده هم ارز است. این سازند دو بخش را شامل می شود. در منطقه نفتی اهواز و منصوری قسمت پایینی سازند آسماری از ۲۱۴/۵ متر ماسه سنگ های آهکی، آهک ماسه دار و کمی شیل تشکیل شده است و بخش ماسه سنگی اهواز نامیده می شود و در قسمت جنوب غرب لرستان بخش آهکی کلهر نامیده می شود. سن نسبی این سازند الیگومیوسن و از نظر سنگ شناسی شامل تناوبی از ماسه سنگ، انیدریت، همراه با شیل در قسمت فوقانی و دولومیت و سنگ آهک مارنی می باشد. در این سازند آثاری از نفت نیز مشاهده شده و تشکیل دهنده سنگ مخزن یکی از مخازن میدان درود می باشد.

سازند جهرم (سازند ائوسن)

تناوبی از سنگ آهک، دولومیت وانیدریت همراه با چرت می باشد.

سازند تیارات

شامل سنگ آهک مارنی رخساره گچی و سنگ آهک دولومیتی متخلخل می باشد.

سازند رومیلا از گروه بنگستان

سازند رومیلا که هم ارز میشریف از کرتاسه میانی می باشد از نظر سنگ شناسی از سنگ آهک دولومیتی و سنگ آهک مارنی سخت به طور متناوب تشکیل شده است.

سازند احمدی

الف) بخش احمدی فوقانی

این بخش شامل دولومیت های دانه شگری می باشد.

ب) بخش احمدی تحتانی

شامل آهکهای خاکستری و سفید دانه ریز رخساره گچی همراه با دانه های پیریت و همچنین با میان لایه های شیل پیریت دار می باشد.

سازند مادود

از سنگ آهک تیره رنگ آرژیلی و دانه ریز همراه با لایه های شیل پیریت دار تشکیل شده است و سن نسبی آن کرتاسه میانی می باشد.

سازند نهرامر

این سازند تشکیل شده از آهک های سفید تا کرم ریز دانه همراه با مارن و شیل های پیریت دار و ماسه سنگ و همچنین سنگ آهک های تیره رسی. این سازند هم ارز سازند کژدمی در خوزستان و از نظر سن معادل اشکوب آلبین از کرتاسه میانی است.

سازند شعیبا (داریان)

این سازند در برش نمونه از ۲۸۶/۵ متر آهک های حاوی اربیتولیناهای فراوان به رنگ خاکستری تا قهوه ای با لایه بندی ضخیم ساخته شده است. محل جغرافیایی برش نمونه سازند داریان در کوه گدون ، در شمال دهکده داریان قرار دارد. سن سازند داریان آپسین است. سازند داریان بالاترین سازند گروه خامی را تشکیل می دهد. این واحد عموماً یک واحد آهکی است که در سراسر جنوب غرب ایران وجود دارد. در جنوب غرب لرستان به سازند گروه تبدیل می شود . به طرف خلیج فارس مارن و شیل های زیرین مربوط به سازند گدون به آهک تبدیل و سازند داریان و فهلیان به صورت یک واحد مشخص می شوند. در میدان درود سازند شعیبا (داریان) از دو بخش تشکیل شده است

الف) بخش شعیبا فوقانی

از سنگ آهک پلتی و همچنین سنگ آهک رسی و با تناوبی از شیل و مارن تشکیل شده است.

ب) بخش شعیبا تحتانی

از تناوب سنگ آهک چرت دار و شیل های پیریت دار تشکیل شده است و معادل سازند داریان در خوزستان و فارس می باشد.

سازند زوبیر

تناوبی از سنگ آهک و سنگ آهک گچدار و شیل پیریت دار می باشد.

سازند دیکتیوکنوس عربیکوس

تناوبی از سنگ آهک رخساره گچی همراه با پیریت و نیز شیل و مارن می باشد.

سازند رتاوی

تناوبی از سنگ آهک، شیل و مارن همراه با پیریت، پلت و سیلت می باشد.

سازند خامی

نام این گروه توسط Falcon و Strong از بیرون زدگی های کوه خامی، در شمال شرقی گچساران گرفته شده است. این رسوبات بیشتر آهک های توده ای را شامل می شوند و سن آن ها ژوراسیک پایینی تا آلبین است. سازندهای مربوط به گروه خامی از قدیم به جدید عبارتند از

۱- سازند سورمه

۲- انیدریت هیث

۳- سازند فهلیان

۴- سازند گدون

۵- سازند داریان

به طور کلی سازند خامی از سنگ آهک و شیل های متوسط و نازک لایه تشکیل شده است.

سازند فهلیان

این سازند در گروه خامی پس از انیدریت هیث قرار دارد و از نظر جغرافیایی، برش نمونه در نزدیکی دهکده فهلیان از ۳۶۰ متر آهک های خاکستری تا قهوه ای رنگ تشکیل شده که عموماً توده ای آلیتی و همچنین در قسمت قاعده قدری برشی است. این سازند در قاعده با دولومیت های قهوه ای تیره رنگ و دانه شکری متعلق به سازند سورمه و در رأس با رسوبات مارنی و آهک های نازک لایه ی سازند گدوان (گدایون) هم شیب است. از حفاری ها چنین بر می آید که در قسمتی از لرستان و خوزستان هم ارز جانبی سازند سورمه (ژوراسیک) از رسوبات انیدریت، آهک، آهک مارنی، شیل و دوباره در قسمت بالایی انیدریت تشکیل شده است. این قبیل رسوبات در دوره ی ژوراسیک عراق نیز وجود دارند و به نام سازند عدیه (Adaiyah)، موس (Mus)، علن (Alan)، سرگلو (Sargelu)، نجمه (Najmeh) و قوتنیا (Gotnia) معروف هستند (خسرو تهرانی، ۱۳۸۴).

سازند فهلیان در نواحی فارس و شمال شرقی خوزستان مشاهده شده است، اما در جنوب غربی

خوزستان و لرستان این سازند به شیل و آهک های خاکستری رنگ سازند گرو تبدیل می شود.

در حاشیه ی نواحی فارس، سازند فهلیان از سازند سورمه و به وسیله ی انیدریت هیث جدا می شود. با در نظر گرفتن فسیل های شناخته شده در سازند فهلیان سن آن نئوکومین است سازند فهلیان یک واحد آهکی در گروه خامی است. در فارس ساحلی سازند فهلیان از سازند زیرین خود (سورمه) توسط رسوبات تبخیری انیدریت هیث جدا می شود. در منطقه ای که هیث دیده نمی شود، آهک های فهلیان با دولومیت های تیره ی سازند سورمه همبر هستند. بیشتر گستردگی سازند فهلیان در استان فارس است، همچنین در شمال شرق خوزستان و لرستان نیز این سازند وجود دارد. از این منطقه به طرف جنوب غرب لرستان و خوزستان، فهلیان با شیل ها و آهک های سازند گرو به صورت بین انگشتی قرار دارد. وجود یک ناپیوستگی در همبری سازندهای فهلیان و سورمه مشکوک به نظر می رسد اما این دگرشیبی به جز در تعدادی از برش ها در بندرعباس هنوز از نظر دیرینه شناسی ثابت نشده است.

در میدان درود سازند فهلیان از دو بخش یاماما و منیفا تشکیل می گردد.

الف) سازند یاماما

به طور کلی از سنگ آهک متخلخل و با نفوذپذیری بالا تشکیل شده است و مخزن اصلی در میدان نفتی درود به شمار می رود.

ب) سازند منیفا

از سنگ آهک دانه متوسط تا دانه درشت با تخلخل و نفوذپذیری بالا تشکیل شده است. این سازند قاعده سازند یاماما محسوب شده و دارای هیدروکربور می باشد.

سازند هیث

این واحد چینه شناختی که خصوصاً در نواحی فارس ساحلی اهمیت دارد در سال ۱۹۵۲ توسط استنیک و برامکمپ در عربستان سعودی نامگذاری شده است. در نواحی فارس ساحلی ضخامت انیدریت هیث به ۴۵ متر می رسد که بین سازند سورمه و فهلیان قرار دارد و سن آن

ژوراسیک پسین است. در میدان درود این سازند از انیدریت توده ای به همراه سنگ آهک و در صد کمی دولومیت تشکیل شده است (خسرو تهرانی، ۱۳۸۴).

۲ - ۲ - ۳ تکتونیک میدان درود

میدان درود به لحاظ ساختاری تاقدیسی است که شیب تندی در قسمت های شمالی دارد و شیب آن به سمت جنوب و صفحه خلیج فارس ملایم تر می گردد. شیب تند ساختار به دلیل گسترش حوضه به جلو آمده زاگرس قبل از چین خوردگی منطقه می باشد.

حرکات کوهزایی زاگرس در دوره پلیوسن - پلیستوسن چین کشیده سطحی را در راستای SE-NW ایجاد کرده که باعث ایجاد صفحه جدایشی در بالای سازند Ghar (میوسن پایینی) شده است.

مکان و امتداد این چین متقاطع^۱ تقریباً مطابق با منطقه ای است که در آن ضخامت زون ترشیاری به سمت شرق - شمال - شرق افزایش می یابد (با توجه به نقشه های ناحیه ای). در همان دوره زمانی، تاقدیس درود با شدت کمتری نسبت به فاز کرتاسه بالایی دوباره دچار چین خوردگی می شود. این تغییر شکل در سری های کواترنری و ترشیاری ثبت شده است. همچنین در این دوره دسته گسل های برونسوی پیشین، دوباره فعال شده و بدرون این سری ها نفوذ کرده اند. در نتیجه در قسمت شمالی میدان چین NW - SE و چین NNE - SSW به سری های بعد از Ghar اضافه شده اند.

در کرتاسه بالایی منطقه درود در طی فاز تکتونیک فرورانش افیولیت های عمان دچار چین خوردگی شده است. در پوسته ساختار، سازندهای قبل از ترونین به صورت پی در پی دچار فرسایش شده اند و دوباره رسوب گذاری در آنجا صورت گرفته است. رسوبات ترونین و نهشته های جوان تر بر روی دامنه های تاقدیس قرار گرفته اند. این فاز تکتونیک قبل از ترشیاری به پایان می رسد (سازند ایلام) و نهشته ها به طور فزاینده به چین اضافه می گردند.

^۱ Transverse fold

چین خوردگی، ساختاری برونسو با گروهی از گسل های نرمال ایجاد کرده که موازی با محور چین می باشند. تعداد کمی از گسل ها با پروفیل های لرزه ای و داده های چاه تفسیر شده اند. (Dorood- Structural update, 1999).

در ارزیابی ساختار تاقدیس درود، هندسه سازند در کل سری چینه شناسی با انحراف به شرق قله چین از سازندهای قدیمی به سمت سازندهای جوان تر، تفسیر می شود. امکان وجود گسل عرضی جنوب شرق - شمال غرب که بخش مرکزی ساختار را قطع کرده باشد، وجود دارد. اما ارزیابی آن با توجه به داده های لرزه ای، زمین شناسی و داده های مخزن (فشار مخزن) بسیار مشکل می باشد. برخی از نشانه هایی که موافق با این فرضیه می باشند در زیر بیان شده است.

۱. خط انحاء NW - SE کم یا زیاد، افزایش ضخامت سری های ترشیاری را به سمت

شرق محدود می کند.

۲. در شمال غربی ساختار، بر روی پروفایل لرزه ای 92PGHEY01، به طور آشکار می توان

وجود گسل نرمالی را در پهلوی غربی درود و در دوره ابتدایی ترشیاری تفسیر نمود.

۳. تفسیر چندین پروفایل چاه در منطقه وقوع گسل های نرمال و حتی حضور گسل

معکوس را نشان می دهد. در بخش بالایی ستون چینه شناسی (ابتدای ترشیاری و

انتهای کرتاسه) سن یابی^۱ سازند ها در بعضی مواقع دقیق نمی باشد. همچنین منشاء

رسوبی ساختار میدان باعث متفاوت شدن ضخامت سازندها در بعضی قسمت ها می

شود که این پدیده دال بر عبور گسل از آن ناحیه نبوده و برای کم نمودن شک و شبهه

در این باره می توان از اطلاعات چاه های بسته شده استفاده نمود.

این مشاهدات دلایلی بر وجود گسل های معکوس امتداد لغز می باشند. با این حال، باور بر این است

که تولید چاه ها هیچگونه مدرکی دال بر تغییر شکل جریان سیال در ناحیه و انقطاع دینامیکی بخش

¹ Dating

های غربی و شرقی میدان در اختیارمان قرار نمی دهد. بنابراین چنانچه یک گسل معکوس امتداد لغز در منطقه موجود باشد، پیوستگی مخزن نمی تواند آسیب جدی دیده باشد.

فصل سوم

مکانیک محیط های متخلخل (بررسی مکانیسم
های ایجاد تراکم و فرونشست در مخازن نفتی)

۳ - ۱ مقدمه

تراکم مخازن در اثر استخراج سیال پدیده ای شایع در تولید مواد هیدروکربوری است که می تواند باعث فرونشست سطح میداین هیدروکربوری گردد. در این بخش توصیف ریاضی و آزمایشگاهی از تراکم سازند سنگ مخزن بیان می گردد. همچنین طبقه بندی انواع فرونشست طبیعی و غیر طبیعی ارائه شده و مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بر اساس روابط میان تنش روباره، تنش مؤثر، تنش سیال منفذی و خصوصیات فیزیکی سنگ ها، مفهومی کمی از مکانیسم تراکم پذیری و فرونشست مخازن هیدروکربوری ارائه می گردد. در انتهای فصل نیز مختصری درباره روش های عددی موجود برای حل معادلات تحلیلی حاکم بحث خواهد شد.

۳-۲ تراکم مخازن هیدروکربوری

۳-۲-۱ تراکم

استخراج سیالات موجود در فضاها ی خالی سنگ مخزن هیدروکربور می تواند باعث کاهش حجم کلی لایه های زیر سطحی و تراکم یا فشرده شدگی^۱ مخزن گردد. در طول بهره برداری از مخزن، حجم و فشار سیال درون منافذ سنگ مخزن کاهش می یابند. این در حالی است که وزن پوسته زمین در بالای مخزن، وضعیت تقریباً ثابتی از تنش فشاری عمودی بر روی مخزن ایجاد می کند، که باعث بوجود آمدن کرنش فشاری درون سنگ مخزن می گردد. فشردگی در مخزن چاه می تواند باعث بوجود آمدن فرونشست قابل توجهی در سطح و لایه های بالایی سنگ مخزن گردد. در صورتی که مخازن گسترش محلی زیاد و ضخامت بیش از ۵۰ متر داشته باشند احتمال اینکه تراکم زیادی را متحمل شوند، افزایش می یابد. اگر مخازن کم عمق فشار روباره را به مدت زیاد و به طور عمده توسط تنش دانه به دانه تحمل کنند دچار خزش ویسکوز، جابجایی افقی و جابجایی قائم خواهند شد. اما چنانچه شرایط رسانایی هیدرولوژیکی در مخازن ضخیم و با گسترش محلی زیاد وجود نداشته باشد،

^۱ Compaction

حتی مخازن کم سیمانی شده نیز قادر به تحمل تراکم بوده و در نتیجه می توان از بررسی تراکم این گونه زون ها صرف نظر نمود.

لایه های شیلی و رسی موجود در میان لایه های یک زون تولیدی می توانند سهم عمده ای در تراکم کل مخزن داشته باشند. در مخازن نسبتاً جوان و کم عمق نفت این لایه ها عموماً تحت تراکم اند و تراکم پذیری زیادی را از خود نشان می دهند. تراکم طی مدت زمانی طولانی صورت می گیرد، زیرا خروج سیال در این فرآیند، توسط مکانیزم نفوذ^۱ کنترل می شود (Dusseault, 1983 ; Geertsma, 1973a).

لایه های ماسه و رس تقریباً به یک اندازه متراکم می شوند. تفاوت عمده آنها در رفتار پلاستیک رس می باشد، زیرا رس نفوذپذیری مؤثر بسیار کمتری نسبت به ماسه دارد. خروج سیال منفذی جهت به وقوع پیوستن تراکم امری ضروریست (Van der Knaap and Van der Vlis, 1967). در ارزیابی تراکم و فرونشست یک ناحیه، نواحی که به لحاظ هیدرولوژیکی به هم مرتبط هستند، اهمیت ویژه ای دارند. در هر کدام از طبقه بندی های تراکم و فرونشست، پتانسیل فرونشست به طور نمایی با عمق کاهش پیدا می کند. بنابراین، نهشته های رسوبی کم عمق که در آنها کل ضخامت مخزن بدون بالآمدگی و فرسایش حفظ شده است، در اثر استخراج سیال بالاترین پتانسیل را برای تجربه فرونشست خواهند داشت (Prokopovich et al., 1983 ; Chilingarian et al., 1983).

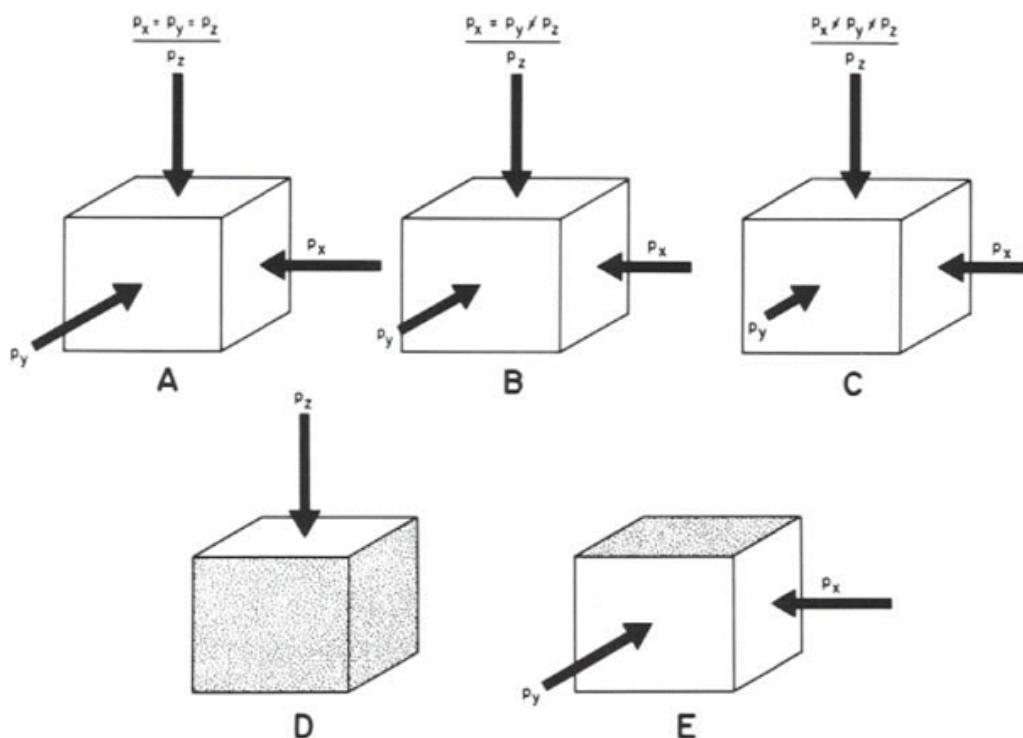
۳-۲-۲ آنالیز های ریاضی و آزمایشگاهی تراکم

مشاهدات آزمایشگاهی از تراکم را می توان به دو گروه تقسیم نمود: اولی شامل نتایج آزمایش های مختلف تراکم است که در فشارهای کم و زیاد بر روی مواد انجام گرفته اند و نوع دوم داده ها از طریق اندازه گیری پارامتر های نمونه های رسوبی بدست آمده از مخازن نفت و گاز تهیه شده اند (Rieke and Chilingarian, ۱۹۷۴). متأسفانه به دلیل اینکه برخی فاکتور ها شناخته شده نیستند، و یا به طور کامل در آزمایشهای آزمایشگاهی اندازه گیری نشده اند، نمی توان اطمینان یافت که نتایج با

^۱ diffusion

سیستم زمین شناسی هبستگی کامل دارند. انواع تجهیزات آزمایشگاهی جهت اندازه گیری ویژگی های فیزیکی مختلف نمونه های رسوبی اشباع شده تحت تنش های تک محوری و سه محوری ایجاد شده اند، اما این تجهیزات تنها جزئی از شرایط موجود در زیر سطح را شبیه سازی می کند. شکل (۱-۳) طبقه بندی انواع بارگذاری در شرایط تراکم را نمایش می دهد.

شکل (۳-۱) بارگذاری هیدرواستاتیکی را نمایش می دهد که در آن سه تنش اصلی با هم برابرند ($p_x = p_y = p_z$). تحت شرایط هیدرواستاتیکی در سیالات منفذی تنش برشی وجود ندارد زیرا سیال نمی تواند نیروهای برشی را در حالت تعادل استاتیکی تحمل کند.



شکل ۱-۳ طبقه بندی بارگذاری تراکم. (A) بارگذاری هیدرواستاتیکی ($p_x = p_y = p_z$). (B) بارگذاری سه محوری ($p_x = p_y \neq p_z$)، که برخی محققان دو محوری می نامند. (C) بارگذاری چند محوری ($p_x \neq p_y \neq p_z$)، که برخی محققان سه محوری می نامند. (D) بارگذاری تک محوری (چهار ضلع موازی با تنش p_z ثابت نگه داشته شده اند)، که برخی محققان به آن بارگذاری دوماحوری می گویند. (E) بارگذاری دو محوری ($p_x = p_y$) و ضلع های موازی با این دو تنش ثابت نگه داشته شده اند (Sawabini et al., 1974).

این موضوع برای آبی که جذب سطحی شده بدلیل طبیعت شبه متبلور آن صدق نمی کند. اگر یک سیال ویسکوز فضای منافذ را پرکند، ممکن است برخی تنش های برشی در مقیاس میکروسکوپی بروز کند که به طور موضعی برخلاف مرز های سیال جامد عمل می کنند. بنابراین تنها اثر ماکروسکوپی، انتقال باقیمانده نیروی وارد شده به ماتریکس جامد است. با تنش برشی معادل صفر، تانسور تنش هیدرواستاتیک برای یک محیط متخلخل، (در هر دو حالت سیال متحرک و سیال ساکن) به صورت زیر است

$$\mathbf{P} \equiv \begin{bmatrix} \bar{\sigma}_w & 0 & 0 \\ 0 & \bar{\sigma}_w & 0 \\ 0 & 0 & \bar{\sigma}_w \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

و متوسط تنش هیدرواستاتیک، $\bar{\sigma}_w$ ، برابر است با

$$\mathbf{P} = (3 \times \bar{\sigma}_w) / 3 \quad (2-3)$$

شکل (B1-3) بارگذاری سه محوری را نشان می دهد که در آن دو تنش از سه تنش اصلی با هم برابرند ($p_x = p_y \neq p_z$). تجهیزات آزمایشگاهی عموماً فشار هیدروستاتیکی را بر روی نمونه هایی که با روکش لاستیکی پوشیده شده اند اعمال می کنند (Rieke and Chilingarian, 1974; Donaldson et al., 1980). از این تجهیزات جهت مطالعه تأثیر تراکم پذیری بر تخلخل، نفوذ پذیری و مقاومت ماتریکس سنگ، در دماهای مختلف اندازه استفاده می شود. با شبیه سازی شرایط دمایی و عمق مخازن Donaldson و همکارانش (1988) از تجهیزات آزمایشگاهی برای اندازه گیری نفوذپذیری نسبی و مطالعه بازیافت نفت استفاده کردند.

تراکم پذیری بالک نمونه ها که تحت شرایط بارگذاری سه محوری اندازه گیری شده به صورت رابطه زیر است

$$C_b = - \left(\frac{1}{V_b} \right) \times \left(\frac{dV_b}{d\sigma_z} \right) \quad (3-3)$$

از آنجایی که تراکم پذیری بالک تغییر شکل افقی را نیز به عنوان تابعی از تنش عمودی در بر می گیرد، می توان نتیجه گرفت که تغییرات بوقوع پیوسته در سازندهای زیر سطحی، به دلیل تغییر

تعدادل تنش با افزایش عمق رسوبات در طول رسوب گذاری حوزه می باشد. تغییر تعادل تنش همچنین با کاهش فشار منفذی در نتیجه استخراج سیالات روی می دهد. حرکات جانبی (خزش افقی) مخازن زیر سطحی طی فرآیند خروج سیالات، بسیار کند است. با این فرض که تغییرات وابسته به زمان ابعاد افقی در مقایسه با تغییرات عمودی در ابعاد مخزن (تراکم) ناچیزاند، می توان از تراکم پذیری تک محوری برای آنالیز های تراکم استفاده نمود. Geertsma (1957) اثبات کرد که تراکم پذیری حجم توده و منافذ در رسوبات سیمانی شده تابع تغییر شکل ویسکوز و الاستیک ماتریکس سیمانی شده، مواد توده سنگ، و تخلخل می باشد. او همچنین بر پایه آنالیزهای ریاضی نشان داد که برای بسیاری از ماسه های نفتی که رفتار الاستیک مشابه نشان می دهند، تراکم پذیری حجم منافذ اندازه گیری شده در آزمایشگاه تحت فشار ثابت و یکسان، تقریباً دو برابر تراکم پذیری در مخزن می باشد. Fatt (1958) تعدادی ماسه سنگ تحکیم یافته با تخلخل پایین را در زیر دستگاه تراکم سه محوره (هیدروستاتیکی) متراکم کرد و مشاهده نمود که تراکم پذیری آنها بسیار کم و در حد 345 MPa (psi) 5000 است. او نمونه ها را با توجه به ترکیب و بافتشان طبقه بندی کرد و متوجه شد که تراکم پذیری نمونه های با جور شدگی کم، بسیار بیشتر از نمونه هایی است که جور شدگی بالایی دارند.

شکل (۳-۱) بارگذاری چند محوری را نشان می دهد که در آن سه تنش اصلی مقادیر متفاوتی دارند $(p_x \neq p_y \neq p_z)$. این شرایط در ساختارهای زیر سطحی بخصوص زمانی که ساختارهای زمین شناسی منطقه به دلیل نیروهای تکتونیکی در حال حرکت هستند، ایجاد می شود. تکرار این شرایط در آزمایشگاه بخاطر دشواری های حمل نمونه ها و انجام اندازه گیری ها مشکل می باشد.

چنانچه نیروی تراکم در یک جهت بر روی سیستم اعمال گردد، در حالی که جوانب صفحه عمود به نیروی اعمال شده ثابت نگاه داشته شوند، سیستم تراکم، تک محوری خواهد بود (شکل ۳-۱). تراکم تک محوره در واقع تغییرات طول هر واحد طول به عنوان تابعی از تغییرات تنش قائم می باشد. و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود

$$C_m = -\frac{1}{z} \left(\frac{\delta z}{\delta \sigma_z} \right) \quad (4-3)$$

Geertsma (1973 a,b) روشی برای ارزیابی سریع اندازه تراکم بر اساس تراکم پذیری تک محوره ارائه داد. وی با ثابت در نظر گرفتن تراکم پذیری در کل مخزن و با احتساب تغییرات فشار مخزن، تغییرات ضخامت مخزن در جهت قائم (تراکم مخزن)، را به صورت زیر محاسبه نمود

$$\Delta h = C_m \times \Delta p \times h \quad (5-3)$$

در این رابطه h ضخامت مخزن و ΔP افت فشار مشاهده شده در مخزن می باشند. بسیاری از محققین با استفاده از داده های آزمایشگاهی روابطی میان تخلخل و تراوایی مخزن ارائه داده اند. با استفاده از چنین داده هایی بخصوص داده هایی که از سازند خاصی بدست آمده اند، می توان اندازه تغییرات تخلخل و تراوایی را محاسبه نمود

$$\phi_2 = \frac{\phi_1 \times h_1 - \Delta h}{h_2} \quad (6-3)$$

$$k = A \times 10^{B\phi} \quad (7-3)$$

در این روابط A و B ضرایب ثابت هستند که با استفاده از تخلخل و تراوایی مخزن مشخص می شوند. h ضخامت سازند، k تراوایی سازند و ϕ تخلخل است.

در صورتی که سیال از محیطی حساس استخراج شود، این آنالیزها می توانند لزوم بررسی

بیشتر مسأله با شبیه سازی های کامپیوتری را مشخص سازند. Van Der Knaap و Van Der Vlis

(1967) مغزه های شیل و ماسه ای بدست آمده از چاه های میدان Maracaibo، (واقع در ونزوئلا) را

با اعمال فشار ۴۱،۴ Mpa (۶۰۰۰ psi) به صورت تک محوره تحت فشار قرار دادند. این محققین

عنوان نمودند که ماسه و شیل هردو تراکم پذیرند (شکل ۳-۲) و تخمین زدند که سهم آنها در تراکم و

فرونشست وابسته به آن، تقریباً یکسان می باشد. همچنین نشان دادند که تراکم شیل در مقایسه با

ماسه های تحکیم نیافته، تحت بارگذاری یکسان، بسیار آهسته تر صورت می گیرد. این تفاوت در نرخ

تراکم به دلیل نفوذپذیری کمتر شیل ها و ساختار داخلی نسبتاً قوی آنهاست. Roberts (1969) تعداد

زیادی از مغزه های ماسه نفتی، ماسه ساحلی و مخلوطی از ماسه کوارتزی و مواد دیگر را در آزمایشگاه، تحت تراکم تک محوره قرار داد. مقایسه این آزمایشات نشان داد که ماسه ها در رنج فشار (7 تا 70) Mpa یا (1000 تا 10000) psi تراکم پذیرتر از رس ها هستند و یا تراکم پذیری برابری با رس ها دارند.

Robert و Desouza (1958) و Roberts (1969) به این نتیجه رسیدند که در نهشته های رسوبی عمیق، تراکم پذیری ماسه ها بیش از رس ها است و یا تراکم پذیریشان برابر با رس ها می باشد. Roberts انفصال موجود در بعضی از نمودارهای تراکم ماسه (که در آنها ضریب پوکی بر حسب لگاریتم فشار رسم شده اند) را، به عنوان نقطه آغاز خرد شدگی ماسه ها تفسیر می کنند (شکل 3-3). فشار نقطه خردشدگی¹ بستگی به دانسیته اولیه، ضریب زاویه داری²، و سایز دانه ها در این ماسه های تحکیم نیافته دارد. دانه های به خوبی گرد شده، کوچک و به خوبی متراکم شده فشار نقطه شکست بالایی دارند. در حالی که ماسه های کمتر تراکم یافته، زاویه دار و با دانه بندی درشت، فشار نقطه شکست پایین تری دارند.

انفصال دیگری در منحنی ضریب پوکی بر حسب لگاریتم فشار رس و جامدات وجود دارد. این انفصال نشانه ای از بزرگی بار روباره قبلی است، و فشار قبل از تحکیم نامیده می شود. به بخشی از منحنی تراکم که در فشار های بالاتر از این نقطه قرار دارد بازه دست نخورده³ گفته می شود؛ این بدین معنیست که نمونه هرگز تحت بارهایی به بزرگی بارهای این بازه قرار نگرفته است (شکل 3-3).

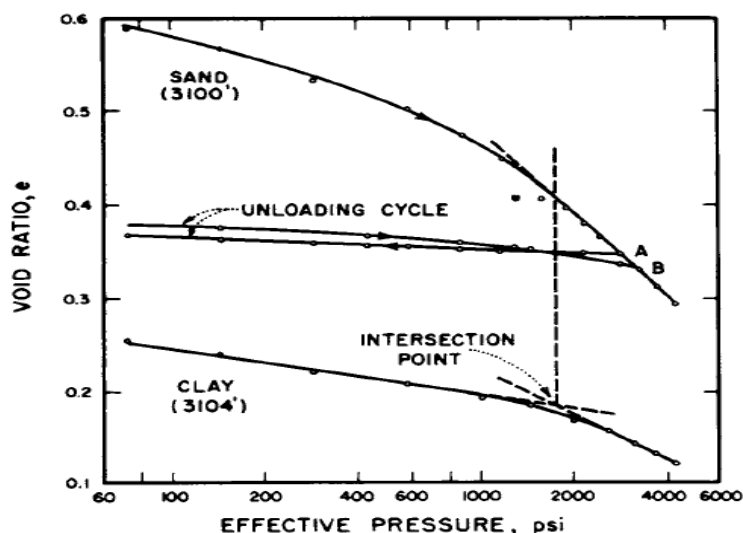
Allen و Mayuga (1969) داده های تراکم تک محوره ماسه های آرکوزیک، سیلت استون بدست آمده از چاه های نفت را با اطلاعات بدست آمده از سیلت و رس های کم عمق مقایسه نمودند. آنها نتیجه گرفتند که فرونشست سطح به دلیل تراکم مخزن روی داده است و ماسه ها بیشترین نقش را در تراکم میدان نفتی Wilmington، واقع در کالیفرنیا داشته اند (شکل 3-4). شیل و سیلت استون

¹ Shattering point

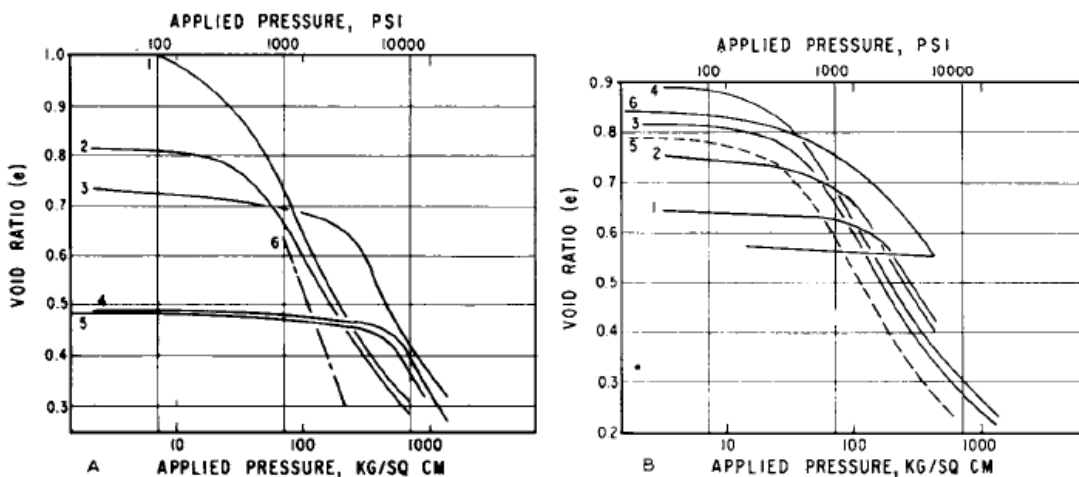
² Angularity

³ Virgin range

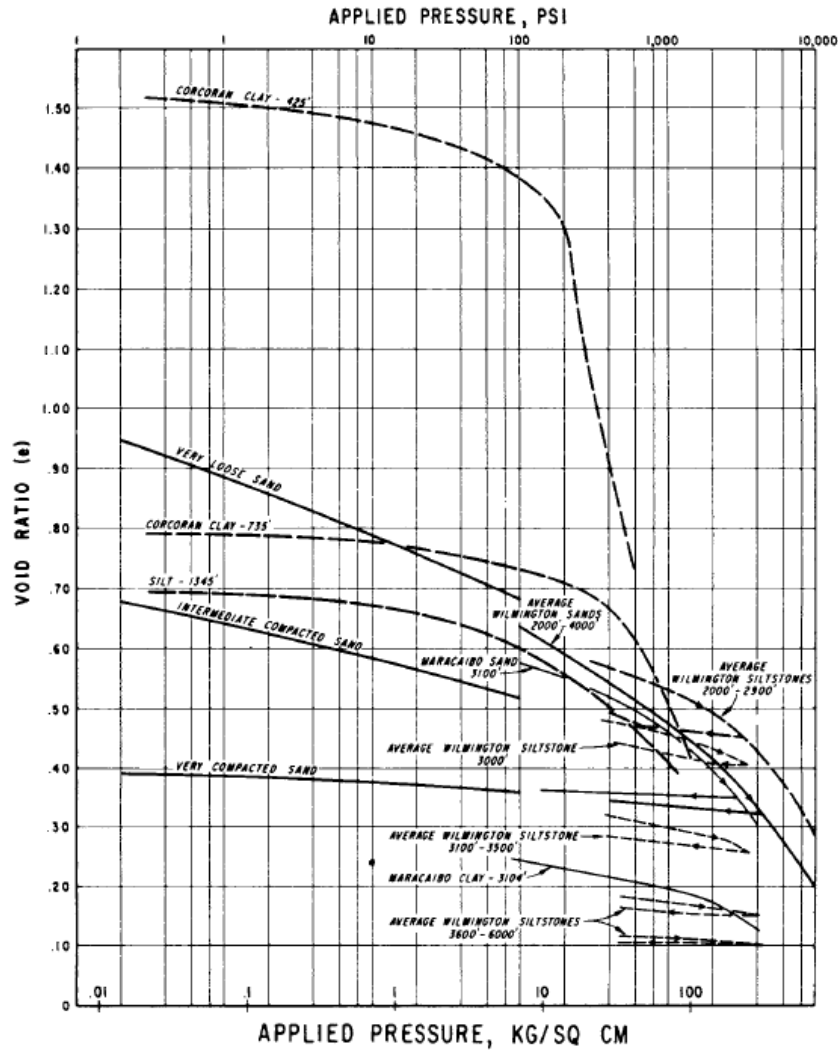
ها در ابتدا نسبت به ماسه های کم عمق حالت پایدارتری دارند، اما با گذشت زمان، سهم شیل ها در تراکم به یک سوم کل تراکم حجمی خواهد رسید. شایان ذکر است که در عمق یکسان تخلخل شیل و ماسه به یک اندازه می باشد، در حالی که مقاومت ساختاری شیل ها بسیار بیشتر از ماسه ها می باشد (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۲ روابط میان تنش مؤثر و ضریب پوکی در نمونه های ماسه و رسی که از سازند های پس از ائوسن میدان Cost Bolivar واقع در ونزوئلا بدست آمده اند (Van Der Vlis and Van Der Knaap, 1967).



شکل ۳-۳ رابطه میان ضریب پوکی و فشار اعمال شده برای کوارتز آسیاب شده، فلدسپار آسیاب شده، دولومیت آسیاب شده، و انواع ماسه های طبیعی. (A) منحنی ۱= کوارتز ۲۰-۴۰ (سست)؛ ۲= کوارتز ۲۰-۴۰ (متراکم)؛ ۳= ماسه Ottawa ۲۰-۴۰ (سست)؛ ۴= ماسه Ottawa ۲۰-۴۰ (متراکم)؛ ۵= ماسه Ottawa مخلوط؛ ۶= مغزه ماسه نفتی کالیفرنیا. (B) منحنی ۱= ماسه جزیره Rhode؛ ۲= ماسه جزیره Pulm؛ ۳= کوارتز ۲۰-۴۰؛ ۴= فلدسپار ۲۰-۴۰؛ ۵= دولومیت ۲۰-۴۰؛ ۶= کوارتز ۱۰۰-۳۲۵. اعداد استفاده شده مانند (۲۰-۴۰) سایز مش بندی مواد مورد آزمایش است (Roberts, 1969).



شکل ۳-۴ مقایسه نتایج تست تراکم بر روی ماسه ها و شیل های میدان نفتی Wilmington، رسوبات کم عمق از لایه های اشباع از آب، و شیل و ماسه نفتی دریاچه Maracaibo، ونزوئلا. در این نمودار ضریب پوکی بر حسب فشار اعمال شده، رسم شده است (Mayuga and Allen, 1969).

۳-۳ فرونشست حوزه های رسوبی

۳-۳-۱ منشأ فرونشست

Prokovich (1978) یک طبقه بندی ژنتیک برای پدیده فرونشست ارائه نمود. این طبقه بندی بر

اساس منشأ انواع مختلف فرونشست می باشد و به دو بخش اصلی فرونشست درون زا^۱ و برون زا^۲

¹ Endogenic

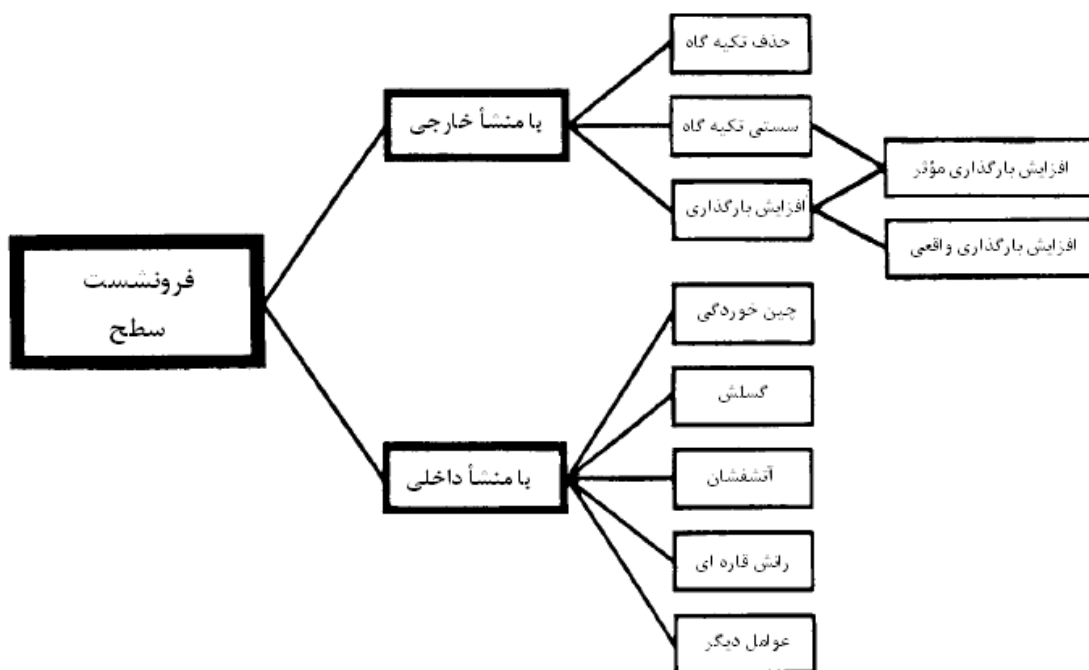
² Exogenic

تقسیم می شود (شکل ۳-۵). فرونشست برون زا مربوط به فرآیندهایی است که از روی سطح زمین سرچشمه گرفته اند و شامل فعالیت های بشر می باشد. فرونشستی که در اثر استخراج سیال ایجاد می شود، از این نوع است. فرونشست درون زا در اثر فرآیندهایی که درون پوسته زمین روی می دهد، ایجاد می شود (Prokopovich, 1983). فرونشست طبیعی (درون زا) در نتیجه مکانیسم هایی همچون چین خوردگی، گسلش، ولکانیسم، دریفت درون قاره ای و غیره رخ می دهد.

Evans (1983) انواع فرونشست را بر حسب تئوری تحکیم طبقه بندی نمود. او فرونشست را با

توجه به (۱) تئوری تک بعدی Terzaghi (۲) تئوری تحکیم سه بعدی کاذب بر اساس معادله

دیفیوژن و (۳) تئوری تحکیم سه بعدی بر اساس معادلات Biot، به سه قسمت تقسیم نمود.



شکل ۳-۵ طبقه بندی ژنتیک فرونشست سطح زمین (Prokopovich, 1983)

تغییرات فیزیکی رسوبات که در طی فرونشست حوزه های رسوبی اتفاق می افتد به طور مستقیم با تکامل تنش های حوزه در ارتباط است. اطلاعات درباره ضخامت رسوبات، تغییرات ریختی، پدیده

حرکت سیالات، پراکندگی ناپیوستگی ها، هندسه ساختاری، روابط تنش - کرنش، و مکان زون های با فشار غیر عادی و بالای سیالات، برای آنالیز های فرونشست مورد نیاز هستند. علی رغم آنکه اندازه گیری پراکندگی تنش در سنگ ها ممکن است به پیش بینی ویژگی های ساختاری کمک کند، (به عنوان مثال، یک سیستم شکستگی باعث افزایش میزان نفوذ پذیری می گردد)، رفتار این شکستگی ها در آینده غیر قابل پیش بینی است (Currie, 1967). ممکن است نفوذپذیری و تخلخل در نتیجه تغییرات ساختاری سازند، همانند چین خوردگی ها، گسل ها، و یا توسط رویدادهای فیزیکوشیمیایی همانند تبلور مجدد، انحلال و سیمانی شدن، تغییر نماید. این تغییرات ظرفیت رسوبات را در انتقال سیال تحت تأثیر قرار خواهد داد. در طی فرونشست، شرایط هیدرودینامیکی می تواند مکانیزم های فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر مهاجرت سیالات درون رسوبات را کنترل نماید.

۳-۳-۲ فرونشست در اثر استخراج سیالات

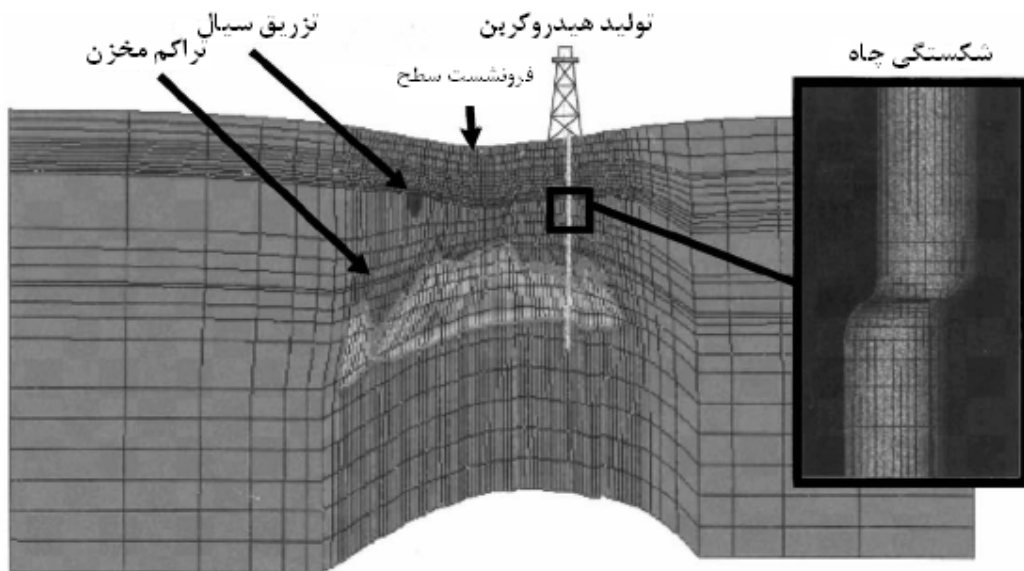
امروزه فرونشست زمین معمولاً به دلیل استخراج سیالات (آب، گاز یا نفت) رخ می دهد. معمولاً مخازن مستعد فرونشست، تجربه تحمل تنشی بیش از تنشی که معمولاً بر آنها وارد می شود را ندارند و در مراحل اولیه دیاژنز می باشند (Dusseault, 1983). مخازن کم عمق، ضخیم، با گسترش عرضی زیاد، رسی، مخازن سیمانی نشده که کمبود فابریک دیاژنتیک دارند، مخازن با تخلخل بالا (بیش از ۳۹٪) و مخازنی که سن زمین شناسی کمی دارند، مستعد ترین مخازن برای فرونشست می باشند. تراکم مخزن که در نتیجه استحصال سیال ایجاد می شود باعث تغییر شکل سنگ مخزن و سازندهای بالای آن شده و می تواند مکانیسم مهمی در کاهش تولید نفت باشد. چنانچه مخزن عمیق و گسترش فضائی آن محدود باشد، احتمالاً میزان فرونشست کم بوده و در مساحت وسیعی توزیع خواهد شد (Dusseault, 1983). ویژگی های عمده سنگ شناسی و ساختاری نواحی تحت فرونشست شامل موارد زیر است (Donaldson et al., 1995).

(۱) رسوبات تحکیم نیافته اند و سیمان شدگی پایینی دارند.

- (۲) ضخامت رسوبات زیاد است.
 - (۳) تخلخل سنگ مخزن بالاست (۲۰-۴۰٪).
 - (۴) رس، سیلت نرم و/یا سیلتستون، و شیل در بین لایه های رسوبات قرار گرفته اند.
 - (۵) استخراج سیالات زیاد است.
 - (۶) سطح ایستایی سیالات در چاه ها دچارافت شدیدی می شود.
 - (۷) در نواحی که استخراج آب صورت می گیرد، سفره های آب زیرزمینی ناحیه بزرگی را پوشش می دهند، همچنین این سفره ها سطحی و دارای شیب بسیار کمی هستند.
 - (۸) نرخ فرونشست دوره ای است و توسط نوسانات فصلی سطح سیالات کنترل می شود.
 - (۹) سن رسوبات در افق هایی که از آنها استخراج آب صورت می گیرد مربوط به دوره پلیوسن است و یا رسوبات جوان تر از این دوره می باشند. در نواحی که استخراج نفت از آنها صورت می گیرد رسوبات مربوط به دوره میوسین و یا جوان تر می باشند.
 - (۱۰) سازندهای مولد هیدروکربور در عمق کمی قرار دارند، ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ متر (۱۰۰۰ تا ۳۳۰۰ فوت).
 - (۱۱) روبراه از رسوباتی با ساختار ضعیف تشکیل شده است.
 - (۱۲) در نواحی که از آنها استخراج نفت صورت می گیرد، لایه های مخزن شیب هموار یا ملایمی دارند.
 - (۱۳) در این مناطق معمولاً گسلش کششی همراه با فرو افتادگی (گرابن) بلوک مرکزی مشاهده می شود.
- اغلب در نواحی که دچار فرونشست می شوند، حرکات افقی سطح نیز مشاهده می شود. سطح مناطق در حال فرونشست، در مرکز تحت فشار و در نقاط پیرامونی خود تحت کشش قرار دارد. این تنش، حرکات افقی نقاط پیرامونی را به سمت مرکز فرونشست موجب می شود. میزان جابجایی افقی تابعی از عمق، ضخامت لایه های در حال تراکم و شدت فرونشست است.

فرونشست ناشی از استخراج سیالات هنگامی اتفاق می افتد که (۱) فشار سیالات مخزن کاهش پیدا کند، (۲) سنگ های مخزن تراکم پذیر باشند (معمولاً سیمانی نشده) و/یا دانه های سنگ مخزن قادر به تحمل باری که قبلاً سیال منفذی متحمل می شد، نباشند و (۳) روبراه استحکام درونی کمی دارد، و به آسانی به طرف پایین حرکت می کند (Allen et al., 1971).

با کاهش هد هیدرواستاتیکی مخزن و کاهش فشار منفذی، تکیه گاه روبراه کم شده و بار دانه به دانه افزایش می یابد. در نتیجه، آرایش ماتریکس سنگ مخزن به هم خورده و مخزن دچار تراکم و فشارش می شود. سهم نسبی ماسه و رس در تراکم، با عمق و تاریخچه زمین شناختی تغییر می کند. به عقیده Allen و همکاران (1971)، در عمق های کم معمولاً سیلت و رس عمده ترین مواد متراکم هستند، در حالی که در عمق های بیشتر ماسه عمده ترین مواد متراکم را تشکیل می دهد. در شکل (۳-۶) تصویری از تراکم مخزن که منجر به فرونشست سطح و شکستگی چاه های تولیدی می گردد، نمایش داده شده است.



شکل ۳-۶ تصویری از تراکم مخزن که منجر به فرونشست سطح و شکستگی چاه ها می گردد (Brun and Hilbert, 2003).

حساسیت یک سازند به فرونشست به عوامل زیادی وابسته است. درجه تراکم که خود معلول عمق نهشته شدن سنگ مخزن در طی دوران زمین شناسی است، نوع رسوبات و نوع سنگ مخزن، اندازه و شکل دانه های سنگ مخزن، و مقدار نسیبی ماسه و رس موجود در بین لایه های سازند از جمله این عوامل می باشند. با پایین آمدن سطح سیالات انتقال بار¹ از سیال درون منافذ به دانه بندی ماتریکس سنگ صورت می گیرد. دو اصلی که در محاسبه بار روباره استفاده می شود به شرح زیراند:

(۱) تنش موثر با نشست سطح سیالات درون روباره، در یک شرایط دینامیک عمل می کند

(Klausing and Lofgren., 1969); و

(۲) بار استاتیکی، معرف وزن مؤثر مواد روباره است.

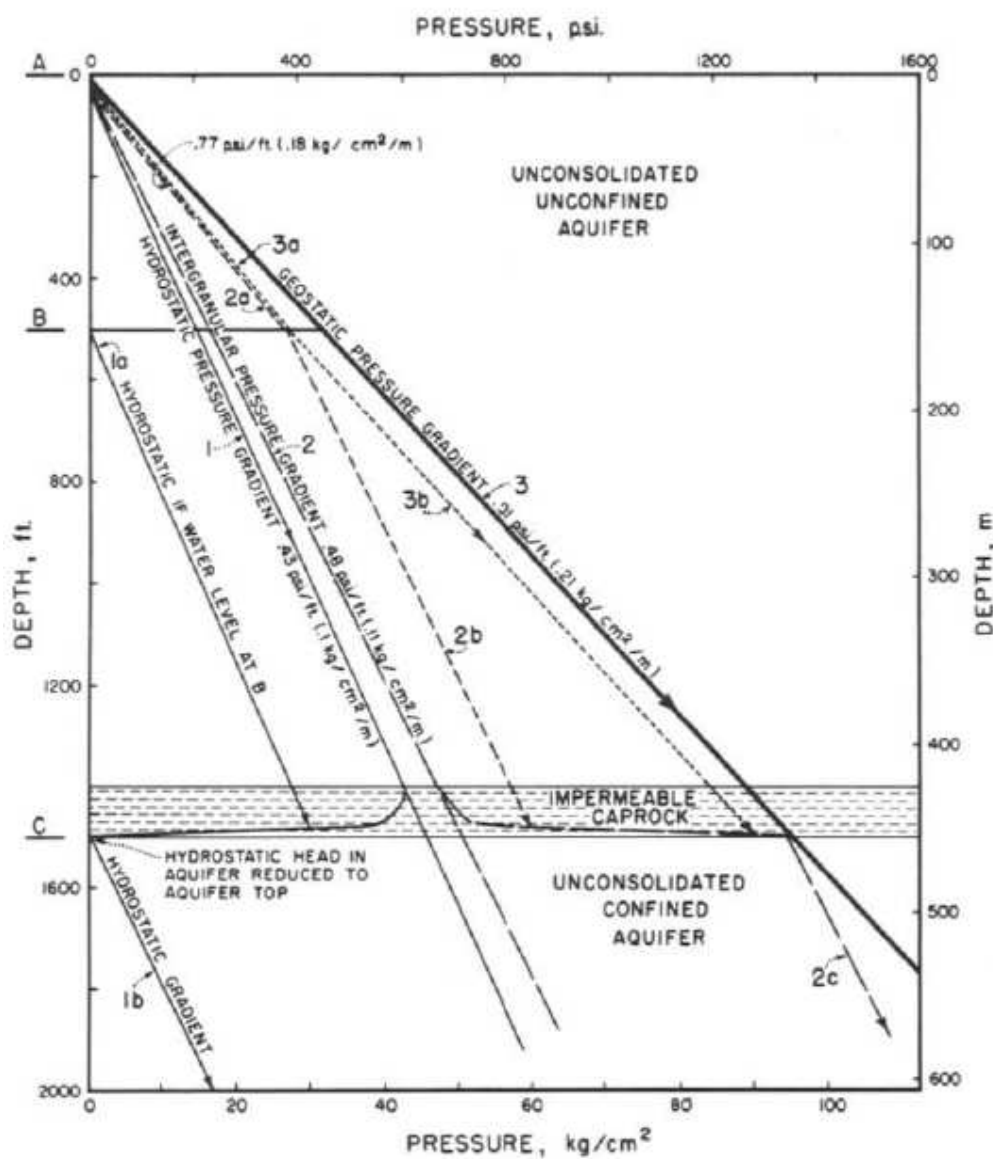
استفاده از اصل دوم آسان تر است، زیرا روش اول نیاز به دانستن بزرگی نرخ حجمی جریان سیال و نفوذپذیری رسوب دارد.

مفهوم بار روباره و انتقال بار بسیار مهم می باشد، زیرا با استخراج سیالات فرونشست اتفاق نخواهد افتاد، مگر اینکه انتقال بار وجود داشته باشد. اصل بار روباره استاتیک (فشار ژئو استاتیکی) تا حد زیادی قابل قبول بوده است. مقدار بیشینه امکان انتقال بار در یک عمق مشخص با فشار سیالات در آن نقطه (فشار هیدرواستاتیکی) برابر است (Allen et al., 1971).

حالتی که در آن استخراج سیال منجر به تغییر بار می شود در شکل (۳-۷) بررسی شده است. در ابتدا، گرادیان فشار ژئواستاتیکی (۰,۹۱ psi/ft یا ۲۰,۶ kPa/m) با مجموع گرادیان فشار بین دانه ای (۰,۴۸ psi/ft یا ۱۰,۹ kPa/m) و گرادیان فشار هیدرواستاتیکی (۰,۴۳ psi/ft یا ۹,۷ kPa/m) برابر است. فرض می شود که سیال باقیمانده ای درون منافذ وجود ندارد، همچنین اثر شناوری آب (buoyant) نادیده گرفته می شود، با کم شدن سطح سیال از نقطه ای به نقطه دیگر (به عنوان مثال از A به B) بار بین دانه ای افزایش می یابد. با استخراج آب، بار ژئواستاتیکی کاهش می یابد (منحنی

¹ Load transfer

۳ به منحنی ۳b تغییر می یابد، شکل ۷-۳). چنانچه منافذ خشک باشند بار ژئوستاتیکی و بار بین دانه ای برابرند (منحنی ۲b، شکل ۷-۳). اگر بار بین دانه ای افزایش یابد تراکم می تواند اتفاق بیافتد. در مورد سفره های آب زیرزمینی محصور، که پوشش (سنگ پوشش) نسبتاً نفوذ ناپذیری دارند، با پایین آمدن سطح سیال (برای مثال A به C) بار بین دانه ای به تدریج افزایش می یابد تا وقتی که با بار ژئوستاتیکی برابر شود و منحنی ۲ به منحنی ۲c تغییر یابد (شکل ۷-۳).



شکل ۷-۳ انتقال بار بدلیل افت سطح ایستایی آب یا کاهش در فشار آب منفذی در سفره های محصور و آزاد آب زیر زمینی. گرادپان فشار ژئوستاتیک، هیدرواستاتیک و بین دانه ای رسم شده اند. تخلخل ۰.۳۵ و وزن مخصوص ماتریکس جامد و آب به ترتیب ۲.۷ و ۱ فرض شده است (Allen et al., 1971).

اگر در فضاهای منفذی هنوز مقداری آب باقی مانده باشد، بار بین دانه‌ای و بار ژئوستاتیکی در زیر سطح C برابر نخواهند بود. به محض کاهش فشار آب منفذی و انتقال بار ناشی از آن در سفره های آب زیرزمینی، گرادیان های فشار در فصل مشترک لایه ها (سیلت استون، شیل و رس) ایجاد می شود. در نتیجه، جابجایی آب از این بستر های ریزدانه به آبخوان های با دانه بندی درشت صورت می پذیرد. نرخ حجمی جریان سیال q ، به نفوذ پذیری، K ، مساحت مقطع عرضی، A ، افت فشار آب منفذی، ΔP ، ویسکوزیته آب، μ ، و طول مسیر زهکشی، L ، بستگی دارد.

$$q = \frac{KA\Delta P}{\mu L} \quad (11-3)$$

۳-۴ اصول اساسی در مدل سازی تراکم و فرونشست مخزن

مدل سازی استخراج سیال از محیط متخلخل تراکم پذیر و انیزوتروپ شامل اصول اساسی زیر است (Evans, 1983).

- (۱) معادله پیوستگی برای ماتریکس جامد سنگ و برای فازهای سیال درون خلل و فرج.
- (۲) معادله ای برای کشیدگی ویسکوز^۱ میان سیال منفذی و ماتریکس جامد.
- (۳) معادله تنش مؤثر.
- (۴) معادلات ترکیبی برای اجزاء ماتریکس سنگ و برای فازهای سیال منفذی.
- (۵) معادلات و روابط بین تخلخل، تنش مؤثر، زمان و تراوایی محیط متخلخل.
- (۶) یک معادله انرژی که انتقال انرژی گرمایی محیط متخلخل را بین ماتریکس سنگ و فاز های سیال بررسی می کند.

(۷) معادله تعادل که میدان تنش در ماتریکس سنگ را به میدان جریان سیال درون منافذ ارتباط می دهد.

این شرایط همانند شرایطی هستند که توسط Smith (1971a, b, 1977) و Sharp (1974, 1976) به منظور مدل سازی تراکم طبیعی رسوبات بکار گرفته شده است.

¹ Viscous drag

Evans (1983) یک روش مدل سازی برای شبیه سازی مرتبه اول فرونشست و تراکم مخزن ارائه داد که شامل معادلات زیر می باشد.

معادلات پیوستگی

(a) ماتریکس سنگ:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho_s \phi_s) + \nabla \cdot (\rho_s \phi_s \bar{v}_s) = 0 \quad (12-3)$$

(b) فاز سیال:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho_f \phi) + \nabla \cdot (\rho_f \phi \bar{v}_s) + \nabla \cdot (\rho_f \phi \bar{v}_{fs}) \pm Q = 0 \quad (13-3)$$

که ϕ تخلخل، ρ چگالی ماده، v سرعت و Q ترم تولید یا تزریق می باشد. زیر نویس های s ، f و fs به ترتیب نشان دهنده فاز سیال، فاز جامد و سرعت سیال نسبت به جامد می باشند (Evans, 1983).

معادله تنش مؤثر

$$p = p_c - p_f \quad (14-3)$$

که p فشار مؤثر، p_c فشار همه جانبه¹ مخزن و p_f فشار سیال منفذی می باشد.

رابطه تخلخل: فرض می شود که فشار همه جانبه ثابت است و p_f فشار سیال منفذی می باشد. در

این صورت تغییر تخلخل با زمان به صورت زیر می باشد (Evans, 1983)

$$\frac{d\phi}{dt} = \phi(1-\phi)(c_f - c_s) \frac{dp_f}{dt} \quad (15-3)$$

که C_s و C_f به ترتیب تراکم پذیری ایزوترمال برای ماتریکس سیال و جامد هستند.

معادله کشش ویسکوز: قانون Darcy جهت توصیف کشش ویسکوز بین ماتریکس سنگ و سیال منفذی استفاده شده است.

$$\bar{v}_{fs} = -\frac{\bar{K}}{\mu_f} \cdot (\nabla p_f + \rho_f \bar{g}) \quad (16-3)$$

¹ Confining pressure

\bar{K} تانسور تراوایی است که انیزوتروپی هیدرولیک را می سنجد، μ_f ویسکوزیته سیال و g بردار گرانش می باشد (Evans, 1983).

معادله حالت: معادله حالت توسط Evans (1983) برای فاز سیال و ماتریکس جامد معین شده است. در هر مورد، سیال و ماتریکس را می توان به عنوان تراکم ناپذیر، کمی تراکم پذیر و یا کاملاً تراکم پذیر در نظر گرفت

(a) تراکم ناپذیر:

$$\rho_f = \text{constant}, \rho_s = \text{constant} \quad (17-3)$$

(b) کمی تراکم پذیر:

$$\rho_f = \rho_{of} e^{c_f(p_f - p_{os})}$$

$$\rho_s = \rho_{os} e^{c_s(p_s - p_{os})} \quad (18-3)$$

(c) کاملاً تراکم پذیر:

$$p_f = f(p),$$

$$p_s = f(p) \quad (19-3)$$

معادلات تعادل: سرعت ماتریکس سنگ \bar{v}_s نسبت به بردار جابجایی \bar{u} مطابق معادله زیر است:

$$\nabla \cdot \bar{v}_s = \frac{\delta}{\alpha} / (\nabla \cdot \bar{u}) \quad (20-3)$$

که، انبساط حجمی $\nabla \cdot \bar{u} = E = E_{xx} + E_{yy} + E_{zz}$ است. می باشد. E_{zz}, E_{yy}, E_{xx} مؤلفه های اصلی تانسور کرنش در حال افزایش، \bar{E} ، هستند.

Evans (1983) اظهار نمود که برای یک محیط الاستیک خطی، رابطه میان تانسور کرنش

افزایشی، \bar{E}_{ij} ، تانسور تنش $\bar{\sigma}_{ij}$ و فشار سیال p_f ، به صورت معادله زیر می باشد:

$$\bar{\sigma}_{ij} \cdot \nabla = \nabla p_f \quad (21-3)$$

$$\bar{\sigma}_{ij} = C_{ij} E_{ij} \quad (22-3)$$

که C_{ij} ها ضرایب ماتریکس سنگ الاستیک انیزوتروپ می باشند.

معادلات انرژی: معادلات انرژی، جریان غیر ایزوترمال را درون محیط متخلخل محاسبه می نمایند.

(a) معادله انرژی جامد:

$$\rho_s (1-\phi) \hat{c}_{vs} \frac{dT_s}{dt} = \nabla \cdot [(1-\phi) \hat{k}_s \nabla T_s] - \rho_f \phi w \quad (23-3)$$

(b) معادله انرژی سیال:

$$\rho_f \phi \hat{c}_{vf} \frac{dT_f}{dt} = \nabla \cdot [\phi \hat{k} \nabla T_f] - \phi T_f \left[\frac{\delta p_f}{\delta T_f} \right]_{pf} \nabla \cdot \bar{v}_{fs} + \rho_f \phi w \quad (24-3)$$

که T دما، \hat{c}_v گرمای ویژه^۱ ماده در حجم ثابت، \hat{k} رسانندگی حرارتی ماده^۲ و w انرژی اضافه شده در اثر منابع گرما به هر واحد جرم می باشد، که اشاره به گرمای اضافه شده توسط ماتریکس به سیال با دمای پایین تر می باشد (Evans, 1983). در هر دوی معادلات (۲۳-۳) و (۲۴-۳) فرض شده است که بردارهای جریان گرما را می توان با قانون های هدایت حرارت فوریه بیان نمود. Kassay ثابت نمود که این فرض تنها زمانی کاملاً درست است که ترم های انرژی همرفت صفر باشند (Donaldson et al, 1995).

مدل نفوذ محدود

Evans به منظور ارائه معادله نفوذی که فرونشست را کنترل می کند این فرضیات را در نظر گرفت:

(۱) جریان سیال ایزوترمال است، ماتریکس تراکم می یابد و فرونشست تنها در جهت قائم روی می

$$v_s = \bar{v}_{zs} \bar{i}_z, \bar{u} = u_{zs} \bar{i}_z. \therefore \text{داده بنابراین داریم}$$

(۲) دانه های ماسه ای ماتریکس تراکم ناپذیرند.

(۳) سیال کمی تراکم پذیر است.

(۴) ماتریکس سنگ ایزوتروپیک است و رفتار الاستیک خطی دارد.

$$\frac{\delta p_f}{\delta t} \gg \bar{v}_s \cdot \nabla p_f \quad (5)$$

¹ Specific heat

² Thermal conductivity

$$\nabla \cdot \left[\frac{\overline{K_f}}{\mu_f} (\nabla p_f + \rho_f \vec{g}) \right] \gg 2\rho_f c_f \overline{K} \nabla p_f + c_f \overline{K} \nabla^2 p_f \quad (۶)$$

فرضیات Evans باعث حذف شدن معادلات (۳-۲۳) و (۳-۲۴) می گردد. بنابراین با ترکیب سایر معادلات و ساده سازی آنها او معادلات زیر را بدست آورد

$$\nabla \cdot \left[\frac{\overline{K_f}}{\mu_f} (\nabla p_f + \rho_f \vec{g}) \right] \pm q = (c_s + \phi c_f) \frac{\delta p_f}{\delta t} \quad (۳-۲۵)$$

بنا بر فرض های (۱) و (۵)

$$\nabla \cdot \vec{v}_s = c_s \frac{\delta p_f}{\delta t} \quad (۳-۲۶)$$

معادله (۳-۲۵) را می توان بر حسب p_f و سپس معادله (۳-۲۶) را بر حسب سرعت جامد \vec{v}_s حل نمود. از آنجایی که مقدار \vec{v}_s مشخص است، با استفاده از معادله (۳-۲۰) بردار جابجایی فرونشست، \vec{u} ، را می توان معین نمود (Evans, 1983). معادلات بالا در مدل Evan را می توان با کمی تغییر به حالت جریان چند فازی تعمیم داد.

۳-۵ حل عددی معادلات حاکم

روش های عددی معمول در شبیه سازی مخازن روش حجم محدود^۱، روش اجزای محدود و روش اختلاف محدود می باشند. هر کدام از این روش ها مزایا و معایب خاص خود را دارند.

۳-۵-۱ روش اجزای محدود

روش اجزای محدود یک دستورالعمل عددی جهت حل مسائل فیزیکی تعریف شده توسط معادلات دیفرانسیلی می باشد. این روش دارای دو ویژگی است که آن را از سایر روش های عددی متمایز می سازد. (۱) در این روش از یک فرمول بندی انتگرالی جهت ایجاد یک دستگاه معادلات جبری استفاده می شود. (۲) در این روش از توابع هموار به طور قطعه ای پیوسته جهت تقریب کمیت

^۱ Finite volume methods (FVM)

های مجهول استفاده می شود. مشخصه دوم، روش اجزاء محدود را از سایر روش های عددی که فرمولبندی انتگرالی دارند، متمایز می کند.

۳-۵-۲ روش اختلاف محدود

برای دست یابی به حل تقریبی معادلات اختلاف جزئی^۱ در همه جنبه های مهندسی، روش اختلاف محدود^۲ از روش های عددی است که بخصوص در دینامیک سیالات، انتقال گرما، مکانیک جامدات و مهندسی مخازن استفاده می شود. اساس روش FDM بر پایه جایگذاری مشتقات جزئی معادلات حاکم با اختلاف هایی است که بر روی فواصل فضائی معینی در جهات مختصاتی d_x ، d_y و d_z تعریف می شوند؛ و یک سیستم معادلات جبری از معادلات حاکم در نقاط مش بندی بکاررفته تشکیل می شود. با تعریف شرایط مرزی در نقاط مرزی، حل سیستم معادلات جبری پاسخ را در هر نقطه از شبکه محاسبه می نماید. گسسته سازی معادلات با استفاده از روش اختلاف محدود به راحتی صورت می گیرد، اما این روش احتیاج به شبکه بندی ساختاریافته دارد. محاسبات کد اختلاف محدود در عین کارآمدی به حافظه کمی جهت پردازش احتیاج دارند. از معایب این روش محدودیت های آن در شبکه بندی و تعیین نقاط مرزی در مدل سازی محیط های با شکل هندسی پیچیده می باشد. به عنوان مثال مدل سازی ساختارهای پیچیده زمین شناسی همچون گسل ها، شکستگی ها و سیل ها از چالش های مهم در این روش می باشد. از آنجایی که لازم است تا خطوط شبکه با این شکل ها منطبق گردند، کوچک تر انتخاب کردن مش ها می تواند راه حلی برای این مشکل باشد. روش FDM به طور وسیعی در صنعت نفت مورد استفاده قرار می گیرد. در نرم افزار Eclipse که یکی از قویترین نرم افزارهای شبیه سازی مخزن است، از این روش استفاده می شود (Eclipse, 2005).

در این بخش با توجه به اینکه معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی به دو یا چند متغیر وابسته اند از علامتگذاری مطابق رابطه زیر استفاده می کنیم.

¹ Partial difference equations (PDEs)

$$u(x, y, z) = u(i, j, k) = u_{i,j,k}$$

و در حالی که زمان هم مطرح شود

$$u(x, y, z, t) = u_{i,j,k,n}$$

در حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی مثل روش تفاضل محدود برای معادلات دیفرانسیل معمولی عبارت مشتق را با معادل تفاضل خارج قسمتی خودش جایگزین می کنیم.

در این روش برای جایگزینی $\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{i,j,k}$ از سه روش زیر می توان استفاده نمود.

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{i,j,k} = \frac{u_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}}{h} + O(h) \quad \text{تفاضل پیشرو:}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{i,j,k} = \frac{u_{i,j,k} - u_{i-1,j,k}}{h} + O(h) \quad \text{تفاضل پسرو:}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{i,j,k} = \frac{u_{i+1,j,k} - u_{i-1,j,k}}{2h} + O(h^2) \quad \text{تفاضل مرکزی:}$$

و برای $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_{i,j,k}$ داریم

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_{i,j,k} = \frac{u_{i+2,j,k} - 2u_{i+1,j,k} + u_{i,j,k}}{h^2} + O(h) \quad \text{تفاضل پیشرو:}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_{i,j,k} = \frac{u_{i,j,k} - 2u_{i-1,j,k} + u_{i-2,j,k}}{h^2} + O(h) \quad \text{تفاضل پسرو:}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_{i,j,k} = \frac{u_{i+1,j,k} - 2u_{i,j,k} + u_{i-1,j,k}}{h^2} + O(h^2) \quad \text{تفاضل مرکزی:}$$

به همین ترتیب برای مشتقات اول و دوم در جهات دیگر و مشتقات بالاتر هم می توان معادلات خارج قسمت تفاضل را نوشت. در معادلات دیفرانسیل سهموی که متغیر زمان هم وارد می شود روش حل

بسته به اینکه مشتقات را در زمان n در نظر بگیریم یا $n+1$ ، فرق می کند و دو روش صریح^۱ و ضمنی^۲ را خواهیم داشت.

روش صریح

در این روش مشتقات مکانی را در زمان گذشته (n) در نظر می گیریم. در این حالت محاسبات ساده تر است و هر معادله ای که تشکیل می شود دارای یک مجهول است و نیازی به حل همزمان دستگاه

معادلات نیست. برای مثال معادله تفاضل معادله $\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ برابر خواهد بود با

$$\frac{u_{i,n+1} - u_{i,n}}{\Delta t} = \alpha \frac{u_{i+1,n} - 2u_{i,n} + u_{i-1,n}}{\Delta x^2}$$

یکی از مشکلات روش تفاضل محدود صریح محدودیتی است که شرایط پایداری ایجاد می کند ولی در عوض محاسبات ساده تر است. یکی از مزایای روش تفاضل محدود صریح این است که ناهمگن بودن معادله دیفرانسیل باعث پیچیدگی حل آن با این روش نمی شود.

روش ضمنی

در این روش مشتقات مکانی را در زمان $n+1$ که مجهول است در نظر می گیریم. در این روش دستگاه معادلات حاصل شده باید به صورت همزمان حل شود. این روش بدون قید و شرط پایدار است

و حل معادله $\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ با این روش به صورت زیر خواهد بود

$$\frac{u_{i,n+1} - u_{i,n}}{\Delta t} = \alpha \frac{u_{i+1,n+1} - 2u_{i,n+1} + u_{i-1,n+1}}{\Delta x^2}$$

۳-۶ روش های ارزیابی تراکم و فرونشست مخزن

تکنیک های مختلفی جهت نظارت بر آشکارسازی و پایش اثرات تراکم و فرونشست مخازن هیدروکربور وجود دارند که از جمله این تکنیک ها می توان از مدل سازی های تحلیلی و عددی،

¹ Explicit

² Implicit

تست های آزمایشگاهی بر روی نمونه های سنگ، ارزیابی تغییر شکل لوله جداری و پایش زیر سطحی و برجای تراکم بر اساس تکنیک های ژئوفیزیکی کابلی¹، چاه نگاری رادیواکتیو، چاه نگاری میزان تخلخل، پایش میکروسایسمیک، تیلتمتر سطحی و درون چاهی، لرزه نگاری چهاربعدی و انبساط سنج ها نام برد. همچنین روش های مختلف نقشه برداری، استفاده از GPS و تداخل سنجی تصاویر رادار از دیگر روش های مرسوم می باشند. محدودیت مهم استفاده از این روش ها در میادین نفتی نبود امکانات و وسایل لازم جهت اندازه گیری پارامترهای مورد نیاز برای هر یک از این روش ها می باشد. با توجه به امکانات موجود تکنیک تداخل سنجی رادار و مدل سازی های تحلیلی و عددی جهت ارزیابی تراکم و فرونشست میدان درود استفاده شده اند که در فصل های بعدی بررسی خواهند شد. سایر روش هایی که در مخازن مختلف جهت پایش تراکم و فرونشست مورد استفاده قرار گرفته اند، در بخش پیوست معرفی و بررسی شده اند.

¹ Geophysical wireline techniques

فصل چہارم

تداخل سنجی تفاضلی تصاویر SAR

۴-۱ مقدمه

تکنیک تداخل سنجی تصاویر SAR (رادار با گشودگی مصنوعی)، روشی بسیار ارزشمند جهت اندازه گیری تغییر سطح زمین با دقتی در حد میلی متر است. این روش جایگزینی مناسب برای روش‌های مرسوم استخراج توپوگرافی و اندازه گیری تغییر شکل سطح زمین می باشد. از آن جا که آب مانع از ایجاد تصاویر با همدوسی مناسب جهت بررسی بیشتر خواهد شد (Richards, 2009)، در این فصل از این روش تنها جهت بررسی تغییرات سطح بخش خشکی میدان نفتی درود (جزیره خارگ) استفاده خواهیم نمود.

به طور کلی می توان مطالب این فصل را به سه بخش عمده تقسیم نمود. در بخش اول کلیات و مفهوم روش تداخل سنجی تفاضلی تصاویر SAR بیان می شود. در قسمت دوم نتایج بکارگیری این روش در جزیره خارگ مورد بررسی قرار می‌گیرد و در بخش آخر دلایل عدم کارآیی این روش در جزیره خارگ عنوان خواهد شد.

۴-۲ سیستم راداری

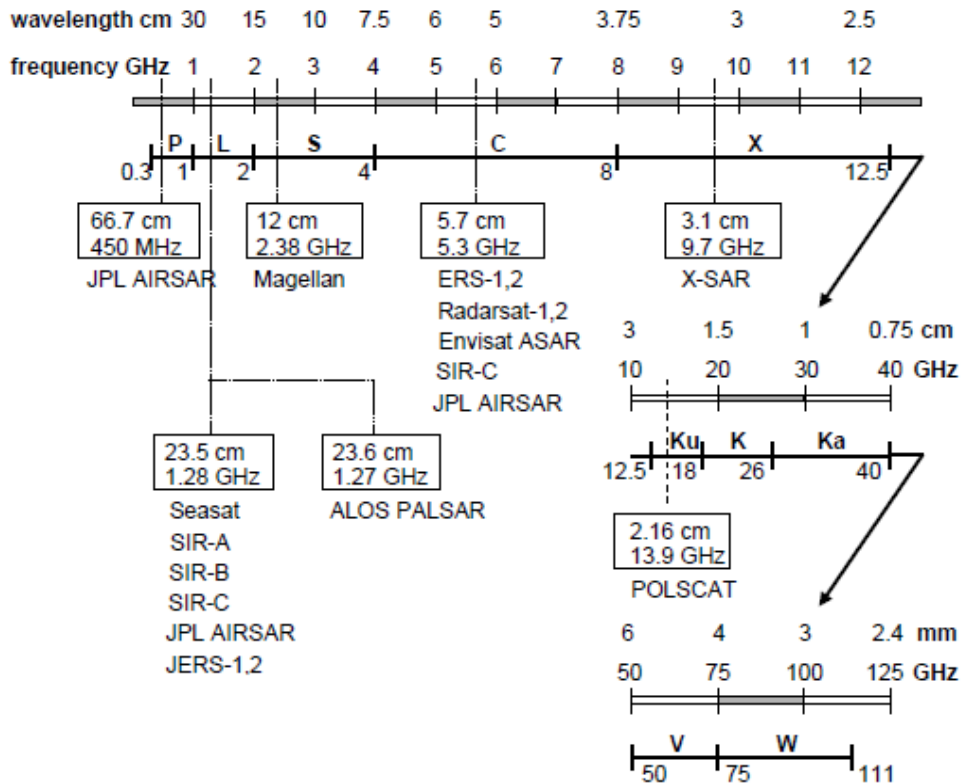
رادار (Radar) مخفف Radio Detection And Ranging می باشد. در حقیقت سنجش از دور راداری زمانی مورد توجه واقع گشت که سیستم های راداری در آشکار سازی هواپیماها و کشتی ها طی جنگ جهانی دوم بسیار موفق عمل کردند. دهه ۱۹۶۰ را می توان زمان شروع به کار سنجنده های تصویر بردار راداری برای مقاصد غیر نظامی در نظر گرفت. پس از چند آزمایش موفق، سنجنده های راداری در هواپیما، شاتل و یا ماهواره به کار گرفته شدند. SIR-A، SIR-B، SEASAT، PL، Radarsat، AirSAR، ERS-1، 2، STR-C، ENVISAT از جمله پروژه های تصویر برداری راداری بوده اند. یک سنجنده راداری امواج مایکروویو را تولید و به سمت زمین ارسال می کند. بخشی از این انرژی توسط اشیا به سمت سنجنده بازگردانده شده و سنجنده آنها را دریافت، اندازه گیری و ثبت می کند. این اندازه گیری ها به سمت ایستگاه زمینی ارسال شده و در آنجا مورد پردازش قرار می

گیرند تا به شکل یک تصویر معمولی تبدیل شوند. هر چه مقدار انرژی بازگشتی از یک شیء بیشتر باشد بر روی تصویر راداری روشن تر دیده شده و بر عکس اگر شیء به هر علتی انرژی کمی را به سمت سنجنده بازگشت دهد، تیره تر به نظر خواهد رسید، بنابراین یک تصویر راداری بیشتر شامل نقاطی روشن و تاریک (و گاه خاکستری) است که اگر در کنار هم الگویی قابل تفسیر را تشکیل دهند می توان اطلاعات جالب توجهی را از آنها به دست آورد (ITC, 1999).

۴-۳ خصوصیات و پارامترهای سیگنال راداری

همانطور که گفتیم در سیستم های راداری، سنجنده خود وظیفه تولید امواج الکترومغناطیس را بر عهده دارد. حرکت امواج الکترومغناطیس به صورت سینوسی و با سرعت نور فرض می شود. از مهمترین مشخصات آن عبارتند از: طول موج، فرکانس، دامنه، فاز و قطبش^۱. طبق نظریه موجی بودن انرژی الکترومغناطیس، هر موج الکترومغناطیس از دو میدان الکتریکی و مغناطیسی نوسان کننده عمود بر هم تشکیل شده است که هر دو بر جهت انتشار موج عمودند. قطبش در حقیقت جهت نوسان بردار میدان الکتریکی نسبت به محور انتشار موج (و یا به عبارت دقیق تر نسبت به سطح مرجعی که توسط آنتن رادار تعریف می شود) می باشد (ITC, 1999). بسته به اینکه میدان الکتریکی در کدام صفحه قرار بگیرد قطبش، عمودی و یا افقی نامیده می شود. معمولاً در بخش ماکروویو طیف الکترومغناطیس، امواج با فرکانس خویش شناخته می شوند. سنجش از دور راداری موج هایی با فرکانس ۳ GHZ تا ۳۰۰ GHZ (معادل طول موج های ۱ mm تا ۱ m) را به کار می گیرد. بعضی از این دامنه ها بوسیله حروف نامگذاری شده اند و برای راحتی کار معمولاً از این نام ها استفاده می شود (شکل ۴-۱).

¹ Polarization



شکل ۴-۱ دامنه های استاندارد امواج ماکروویو ونام های مربوطه (Richards, 2009)

۴-۴ اجزای سیستم تصویر بردار راداری

یک سیستم تصویر بردار راداری از چهار جزء اصلی تشکیل شده است: فرستنده^۱، آنتن، گیرنده^۲ و ثبت کننده^۳. فرستنده وظیفه تولید سیگنال و انتقال انرژی مایکروویو به آنتن را دارد. آنتن با ارسال و هدایت امواج الکترومغناطیس منتظر برخورد امواج با اشیاء واکنش با آنها و بازگشت انرژی می ماند. آنتن پس از دریافت امواج آنها را به گیرنده ارسال می کند. گیرنده این امواج را می گیرد، پس از فیلتر و تقویت، در نهایت به سوی ثبت کننده هدایت می کند. ثبت کننده این انرژی های دریافتی را بر

¹ Transmitter

² Receiver

³ Recorder

روی وسایل نگهداری داده ذخیره می کند. سیستم های تصویر برداری راداری به دو دسته عمده تقسیم می گردند: (۱) رادار با گشودگی واقعی^۱ (۲) رادار با گشودگی مصنوعی

۴-۵ رادار با گشودگی مصنوعی (SAR)

در این نوع سیستم ها یک آنتن با طول بلند شبیه سازی می شود. شبیه سازی بر این اساس انجام می گیرد که یک عارضه می تواند در مدت زمان طولانی تری مشاهده شده و اطلاعات مربوط به آن جمع آوری گردد. برای شبیه سازی این آنتن سیگنال های بازگشتی از یک شیء در تمام مدت زمانی که آن شیء در میدان دید سنجنده قرار دارد ثبت می گردد و سپس مورد پردازش قرار می گیرند. در این پردازش ها تنها بازگشت های یک شیء مورد استفاده قرار می گیرد و بازگشت های مربوط به عوارض دیگر ضمن پردازش حذف می گردند (شکل ۴-۲). این فرآیند برای تمامی پیکسل ها انجام می شود تا بتوان به دقت مورد نظر برای هر پیکسل دست یافت. در این سیستم پالس های متعددی با سرعت زیاد به سمت اشیا ارسال می شوند و تمامی بازگشت ها ثبت می گردند. بسته به اینکه از چه حجم داده جمع آوری شده ای استفاده می شود، می توان دقت برداشت را تغییر داد و بنابراین با پردازش می توان تصاویر مختلفی تولید نمود یا به سنجنده فرمان داد که حجم برداشت را برای سطح دقتی خاص تنظیم نماید.

۴-۵-۱ قدرت تفکیک مکانی سیستم های رادار با گشودگی مصنوعی

قدرت تفکیک در جهت آزمون در سیستم های SAR بستگی به مقدار پردازشی دارد که بر روی داده ها انجام می شود تا یک عرض موج باریک تر و به بیان دیگر طول آنتن بزرگ تری بدست آید. کل طول آنتنی که ممکن است، به دست آید معادل فاصله ای است که شیء از شروع تا پایان عبور سنجنده تحت ارسال امواج قرار می گیرد تا اینکه از دید سنجنده خارج شود.

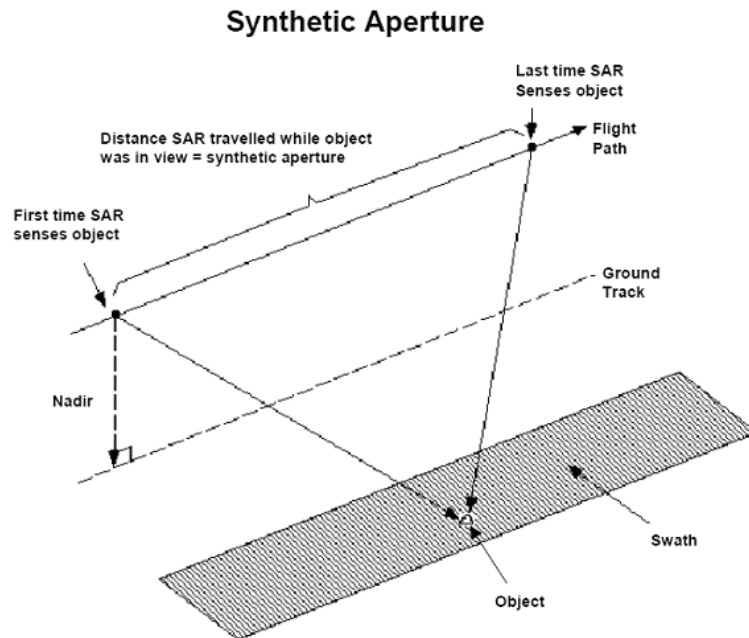
اگر طول آنتن شبیه سازی شده L و آنتن واقعی l باشد آنگاه داریم

$$L = \beta.R \quad (1-4)$$

¹ RAR (Real Aperture Radar)

که در آن R فاصله مایل تا شیء و β عرض پالس^۱ است. با جایگزاری β از معادله $\beta = \frac{\lambda}{l}$ داریم

$$L = \frac{\lambda}{l} R \quad (۲-۴)$$



شکل ۲-۴ اصول تصویر برداری توسط سیستم SAR (ITC, 1999)

از طرف دیگر قدرت تفکیک در جهت آزیموت بر اساس طول آنتن شبیه سازی شده خواهد شد

$$r_a = \frac{\lambda}{2L} R \quad (۳-۴)$$

با ترکیب معادله ۲-۴ و ۳-۴ خواهیم داشت

$$r_a = \frac{l}{2} \quad (۴-۴)$$

معادله (۴-۴) نشان می دهد که قدرت تفکیک در جهت آزیموت برای سیستم های راداری به فاصله سنجنده تا شیء بستگی ندارد و از نقطه نظر تئوری قدرت تفکیک در جهت آزیموت برای این سنجنده چه در هواپیما باشد و چه در ماهواره تفاوتی نمی کند از سوی دیگر در این معادله طول آنتن در صورت کسر قرار گرفته است و به این معنی است که هر چه طول آنتن کوچکتر باشد قدرت تفکیک بهتری نیز حاصل می شود.

^۱ Beam Width

۴-۶ اهمیت فاز

یکی از ویژگی های رادار که آن را از تصویر برداری اپتیکی متمایز می سازد، وجود فاز^۱ و دامنه^۲ در سیگنال بازگشتی است، در صورتی که در تصاویر اپتیکی تنها از شدت^۳ (تابندگی) سیگنال استفاده می کنیم که معادل مجذور دامنه و بدون فاز می باشد (Richards, 2009).

سیگنال ها پس از پراکنش از یک پیکسل خاص به رادار برگشته و در راستای برد و آزیموت مترکم می شوند تا پالس های فشرده^۴ که انتقال یافته و تحت تأثیر پدیده داپلر قرار گرفته اند حذف گردند. معادله این سیگنال ها را به صورت زیر می توان نوشت

$$E^{\wedge}(t) = A\rho \exp(j\omega t - 2\beta R) \quad (۵-۴)$$

که ω فرکانس عملکرد^۵ رادار است و در برخی موارد فرکانس حامل^۶ خوانده می شود. این سیگنال ممکن است یکی از قطبش هایی باشد که در سیستم های رادار چند قطبی استفاده می شود. به طور قطع این سیگنال تابعی از پیکسل مورد نظر است، بنابراین بایستی آن را به عنوان تابعی از مختصات برد و آزیموت پیکسل در نظر گرفت. جزئیات بیشتر در ادامه بحث خواهد شد.

در معادله (۵-۴) قابلیت بازتاب^۷ پیکسل تصویر برداری شده است، این پارامتر ویژگی پراکنشی پیکسل است و طبیعتاً به صورت جزئی از ماتریکس پراکنش بیان می شود. ρ عددی مختلط است که نشان دهنده تأثیر آن بر فاز و دامنه انرژی است که سیگنال پس پراکنش را تولید نموده است. بنابراین می توان این پارامتر را به این صورت نوشت

$$\rho = |\rho|e^{j\phi} = |\rho|\angle\phi \quad (۶-۴)$$

فاکتور A شاخص سنجش دامنه کل^۸ است که برای همه پیکسل ها یکسان فرض می شود. R

فاصله یک طرفه میان رادار و پیکسل است، در حالی که β ثابت فاز است و در برخی موارد عدد موج^۱

¹ Phase

² Amplitude

³ Intensity (radiance)

⁴ Chirps

⁵ Operating frequency

⁶ Carrier frequency

⁷ Reflectivity

⁸ General amplitude scaling term

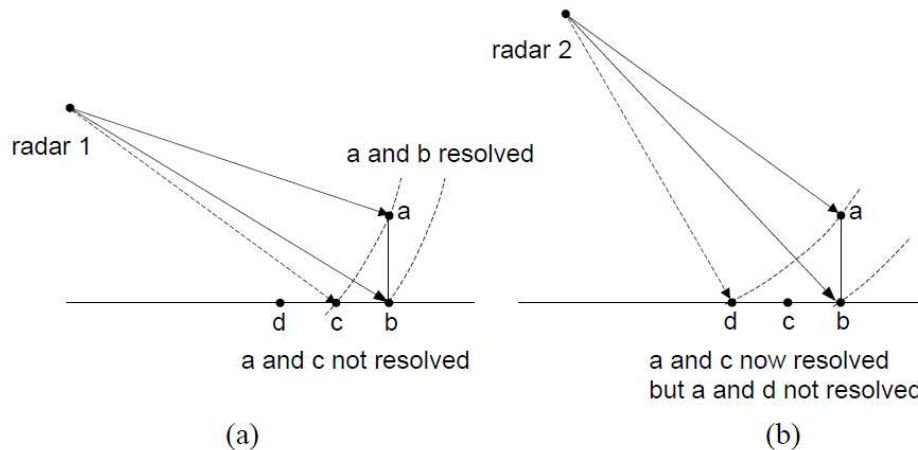
k نیز خوانده می شود. $\beta = 2\pi/\lambda$ است که λ طول موج عملیاتی است و از رابطه $\lambda = \frac{c}{f}$ بدست می

آید و $f = \omega/2\pi$. بنابراین معادله (۴-۵) را می توانیم به صورت زیر بنویسیم

$$E^r(t) = A\rho \exp(j\omega t - \phi_T) \quad (\text{aY-4})$$

$$\phi_T = 2\beta R = \frac{4\pi R}{\lambda} \quad (\text{bY-4})$$

که ϕ_T تغییرات کلی فاز سیگنال از زمان ارسال آن تا دریافت توسط رادار و با پیمودن مسیری معادل $2R$ می باشد. واضح است که چنانچه دو پیکسل یا دو نقطه هدف فاصله مایل متفاوتی تا رادار داشته باشند، زاویه فاز کلی متفاوتی در رادار اندازه گیری خواهد شد. تفاوت در زاویه فاز سیگنال ها متناسب با تفاوت در مسافتی است که آنها تا هدف می پیمایند. این مورد در شکل (۴-۳ a) نشان داده شده است.



شکل ۴-۳ (a) با اینکه اختلاف توپوگرافی میان نقاط a و b تشخیص داده شده است، اما ابهام میان نقاط a و c باقی است (b) رفع ابهام نقاط a و c با تغییر موقعیت رادار، اما بوجود آمدن مشکل مشابه برای نقاط a و d (Richards, 2009).

با توجه به شکل، دو نقطه a و b در بالا و پایین یک عارضه توپوگرافی بدلیل تفاوت در اکوهای بازگشتی از آن ها دارای فازهای متفاوت می باشند، بنابراین براحتی توسط رادار تفکیک می شوند. اما یک نکته مبهم باقی می ماند. بدلیل اینکه رادار از فاصله مایل استفاده می کند، نقطه c را در همان

¹ Wave number

موقعیت نقطه a تشخیص می دهد. یکی از راه حل های این ابهام تغییر موقعیت رادار و تغییر وضعیت دید سنجنده^۱ می باشد، همانطور که در شکل (۴-۳) نمایش داده شده است. با این وجود مشکل مشابهی برای نقاط d و a بوجود می آید. چنانچه بتوان از تصاویر بدست آمده از دو موقعیت متفاوت، همراه باهم استفاده کرد، احتمالاً می توان ابهامات موجود را مرتفع ساخت، همانند کاری که تصاویر برجسته و سه بعدی انجام می دهند. قاعده کلی در تداخل سنجی این است که حداقل از دو منظر دید استفاده شود. در ادامه نشان خواهیم داد که این روش به ما توانایی رفع ابهام در تفکیک پذیری منظره در سه بعد را بجز در دو مورد می دهد: یکی در صورت عدم قطعیت پارامترها و دیگری در صورت وجود ابهام در اندازه گیری فاز ابهام در فاز مسئله مهمی است که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

۴-۷ تداخل سنجی رادار – InSAR

با توجه به شکل (۴-۴) که اساس تجزیه و تحلیل تداخل سنجی رادار^۲ است، موقعیت دو رادار در یک افق و در دو انتهای خط مبنا فرض شده است. این فرض جهت ساده نمودن روابط اتخاذ شده، و در حالتی که در آن خط مبنا مورب است، روابط کمی پیچیده تر خواهد بود. مؤلفه ای از خط مبنا که عمود بر راستای خط دید^۳ رادار تا هدف است، B_{\perp} خط مبنای قائم^۴ یا عمودی نامیده می شود. برای محاسبه اختلاف فاز میان دو سیگنال فاز، بایستی اختلاف طول مسیر میان رادار و هدف محاسبه گردد. همانطور که در شکل نشان داده شده است فرض می کنیم که ارتفاع نقطه هدف از سطح دریا برابر h است. با توجه به شکل (۴-۴)

$$R_1 = R_2 \cos \delta\theta + B \sin \theta \quad (۸-۴)$$

فرض می کنیم که $\delta\theta \approx 0$ است

$$R_1 = R_2 + B \sin \theta \quad \text{بنابراین}$$

^۱ Viewing perspective

^۲ Radar interferometry

^۳ Line of sight (LOS)

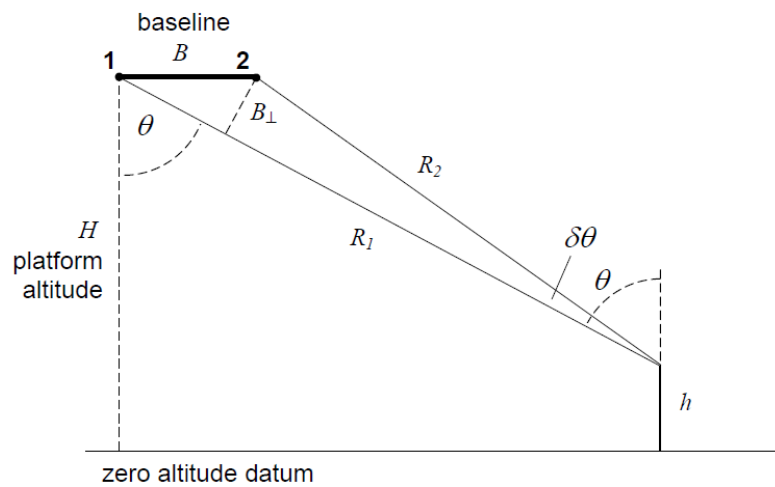
^۴ Perpendicular or orthogonal baseline

$$\Delta R = R_1 - R_2 = B \sin \theta \quad (9-4)$$

اختلاف فاز معادل با این اختلاف فاصله با توجه به معادله (۴-۴b) برابر است با

$$\Delta \phi = \frac{4\pi B \sin(\theta)}{\lambda} \quad (10-4)$$

که این عبارت زاویه فاز تداخل سنجی^۱ نامیده می شود. معادله (۴-۱۰) که نتیجه فرض موج مسطح (صفحه ای) می باشد، به پارامتر h وابسته نیست اما، تابعی از زاویه فرود است که با ارتفاع هدف از سطح دریا تغییر می کند.



شکل ۴-۴ هندسه تداخل سنجی SAR با خط مبنای واحد، که فرض کردیم زوایای دید و بر خورد یکسان باشند: جهت حرکت سکو به سمت خارج صفحه است (Richards, 2009).

برای فهم این رابطه هندسه تصویر برداری به طور ساده، در شکل (۴-۵)، نمایش داده شده است، در

این شکل B خط مبنای تداخل نمای دو تصویر رادار است. با توجه به شکل (۴-۵)

$$h = H - R_0 \cos \theta$$

به طوری که

$$\frac{dh}{d\theta} = R_0 \sin \theta \quad (11-4)$$

با استفاده از (۴-۱۰)

¹ Interferometric phase angel

$$\frac{d(\Delta\phi)}{d\theta} = \frac{4\pi B \cos\theta}{\lambda} \quad (12-4)$$

و با استفاده از معادلات (11-4) و (12-4)

$$\frac{d(\Delta\phi)}{dh} = \frac{d(\Delta\phi)}{d\theta} \frac{d\theta}{dh} = \frac{4\pi B \cos\theta}{\lambda R_0 \sin\theta} \quad (13-4)$$

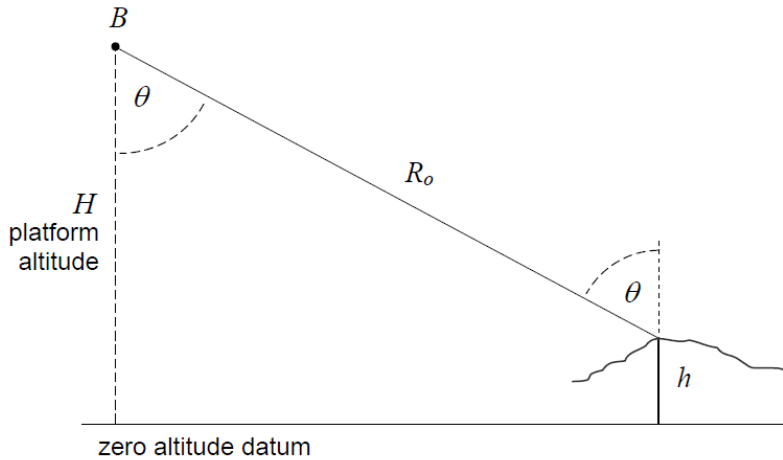
این معادله نشان می دهد که چگونه تغییر در ارتفاع زمین باعث تغییر زاویه فاز تداخل سنجی می شود. با توجه به شکل (5-4) $B \cos\theta = B_{\perp}$ است، بنابراین معادله (13-4) را می توانیم به صورت زیر

بیان نماییم

$$\frac{d(\Delta\phi)}{dh} = \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R_0 \sin\theta} = \frac{4\pi B_{\perp} \cos\theta}{\lambda H \sin\theta} \quad (14-4)$$

این معادله وابستگی تغییرات فاز تداخل سنجی همراه با تغییرات زمین را به سه پارامتر مهم سیستمی: ارتفاع سکو H ، زاویه فرود (یا زاویه دید) θ و مؤلفه قائم خط مبنا B_{\perp} در تداخل نما، نشان

می دهد.



شکل 5-4 تعیین رابطه ارتفاع توپوگرافی و زاویه فرود. به طور قطع زوایای دید و فرود اندکی اختلاف دارند، بخصوص در سیستم های فضایی، اما در اینجا ما از این اختلاف جزئی صرف نظر می کنیم (Richards, 2009).

4 - 8 ساخت تصویر تداخل سنجی

اختلاف فاز میان دو تصویر تشکیل دهنده تداخل نما بایستی پیکسل به پیکسل بر روی سطح مبنا تصویر شود تا نقشه ارتفاعی (توپوگرافی) با استفاده از مطالب قسمت قبلی تشکیل شود. با استفاده از

معادله (۴-۷a) میدان های دریافتی از پیکسل (نقاط) معین توسط هر کدام از رادارها به صورت زیر خواهند بود.

$$E_1(t) = \rho \exp(j\omega t - \phi_{T1}) \Rightarrow \rho \exp(-j\phi_{T1}) = e_1(x, y) \quad (۴-۱۵a)$$

$$E_2(t) = \rho \exp(j\omega t - \phi_{T2}) \Rightarrow \rho \exp(-j\phi_{T2}) = e_2(x, y) \quad (۴-۱۵b)$$

برای راحتی کار، فاکتور مشترک A یک در نظر گرفته شده است. همان طور که انتظار می رفت سیگنال ها بدلیل متفاوت بودن زوایای فازشان، متمایز از یکدیگر هستند. هر دو معادله بر حسب x و y نوشته شده اند. این نشان دهنده متفاوت بودن معادلات برای نقاط با موقعیت های متفاوت است. اگر سیگنال ها را در هم ضرب کنیم

$$i(x, y) = e_1(x, y)e_2^*(x, y) \quad (۴-۱۶a)$$

همانطور که مشاهده می کنید سیگنال اول در مزدوج سیگنال دوم ضرب می شود. حاصل آن تصویری با دامنه متناسب با ضریب پراکنش و فازی برابر با اختلاف فاز تداخل نما، خواهد بود.

$$i(x, y) = |\rho|^2 \exp[-j(\phi_{T1} - \phi_{T2})] = |\rho|^2 \exp(-j\Delta\phi) \quad (۴-۱۶b)$$

این عبارت تداخل نما^۱ نامیده می شود. به طور کلی به منظور کاهش نویز، فاز پیکسل های تداخل نما در یک همسایگی کوچک میانگین گیری می شوند تا نقشه های ارتفاعی local smooth باشند.

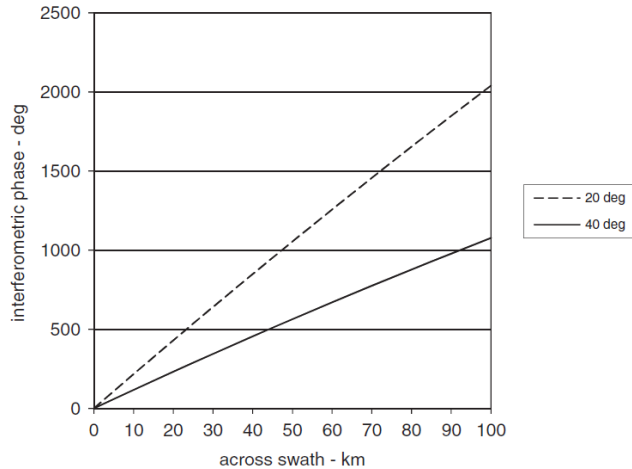
۴ - ۹ تصحیح تغییرات فاز سطح مسطح

درحین تصویربرداری تغییرات فازی، معادل باتغییرات، فاز سطح مسطح خواهیم داشت که در اثر تغییر زاویه فرود از لبه دامنه نزدیک تا دامنه دور برداشت ایجاد شده است. بنابراین لازم است تا قبل از استفاده از معادله (۴-۱۶)، تغییرات سطح مسطح از اختلاف فاز ثبت شده بین دو رادار حذف شود، در غیر اینصورت نتایج در حین تصویر برداری تحت تأثیر این تغییرات قرار خواهند گرفت.

شکل (۴-۶) میزان تغییرات فاز سطح مسطح^۱ در ۱۰۰ کیلومتر عرض برداشت برای سکویی با ارتفاع ۸۰۰ کیلومتر، خط مبنای ۱۰۰ متر و زوایای فرود اسمی ۲۰ و ۴۰ درجه، را نمایش می دهد این

^۱ Interferometr

شکل میزان ضرورت تصحیح فاز، قبل از این که از فاز تداخل سنجی برای تعیین توپوگرافی استفاده شود را اثبات می کند.



شکل ۴-۶ تغییرات فاز تداخل نما در ۱۰۰ کیلومتر عرض برداشت برای دو زاویه فرود ظاهری (Richards, 2009).

۴ - ۱۰ بازیابی فاز

زاویه فازی که در نتیجه تداخل دو سیگنال، ایجاد می شود در بازه ۰ تا 2π محصور شده است. برای فهم این موضوع یادآوری می شود که تابع نمایی که برای تعریف سیگنال استفاده شد، در واقع شکل ساده شده معادله اصلی است. برای تداخل نما (۴-۱۶ b) معادله اصلی به صورت زیر می باشد (از آوردن ضریب بازتابش صرفنظر می کنیم).

$$\cos(\Delta\phi) = \Re\{\exp(-j\Delta\phi)\}$$

به دلیل متناوب بودن تابع کسینوسی، با اینکه تغییرات فاز تداخل نما اساساً با تغییر ارتفاع زمین تغییر می کند، آنچه در گیرنده رادار می بینیم، فازی است که در بازه ۰ تا 2π قرار دارد (شکل ۴-۷). هر سیکل فرینج^۲ (الگوی هم مرکز از باند های رنگی) معادل 2π تغییر فاز تداخل سنجی است. جهت تهیه نقشه های تغییر ارتفاع به تغییرات فاز غیر چرخه ای^۳ و هموار^۴ نیاز داریم.

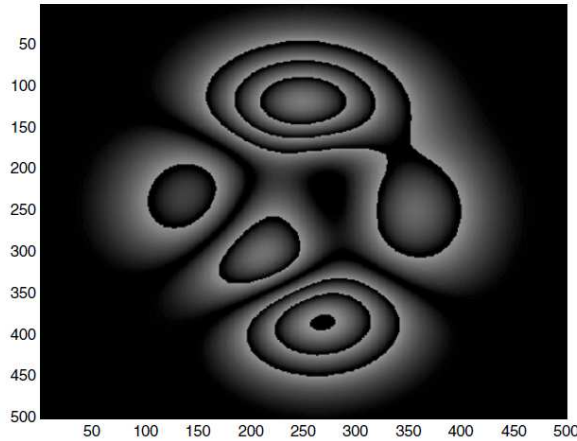
¹ Flat earth phase variations

² Fringe

³ Non cyclic

⁴ Smooth

بنابراین فرآیندی به نام phase unwrapping یا بازیابی (واپیچش) فاز، بایستی بر روی تداخل نما انجام شود. بدلیل اینکه تغییرات فاز چرخه ای (سیکلی) با دوره تناوب 2π می باشد، به این عمل واپیچش فاز می گویند.

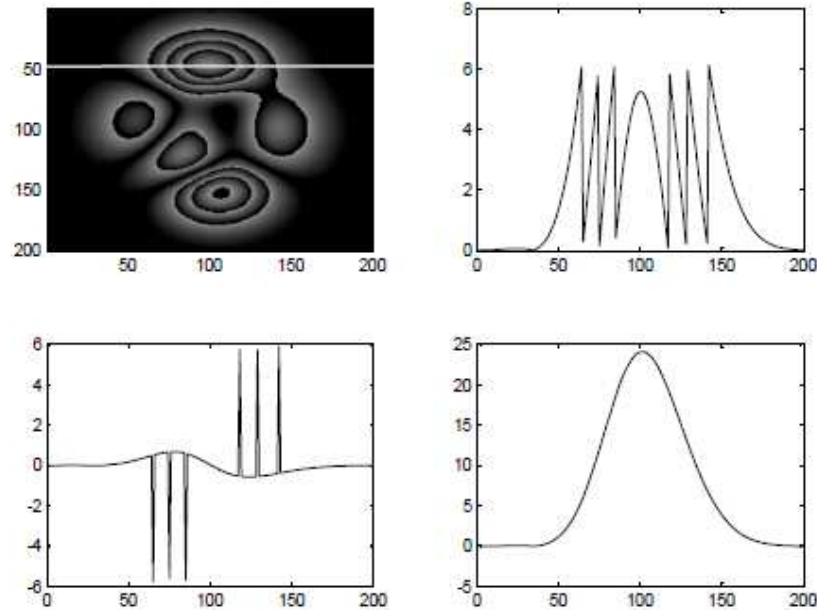


شکل ۴-۷ تغییرات فاز تداخل نما در گیرنده رادار (Richards, 2009).

اصول کلی بازیابی فاز ساده است. فرآیند از نقطه ای که انتظار می رود اختلاف فاز تداخل نما حداقل باشد - لبه دامنه نزدیک - شروع می شود و در سرتاسر فاصله مایل ادامه یافته و اختلاف زاویه فاز بررسی می شود. هر جا پرش 2π در فاز مشاهده شود، عمل تصحیح صورت گرفته و فرآیند ادامه می یابد. برای بازیابی فاز بهتر است تا ابتدا گرادیان فاز در امتداد خط گرفته شود. همانطور که در شکل (۴-۸) مشاهده می شود این عمل به سرعت پرش های فاز^۱ را شناسایی می کند. سپس در امتداد خط از گرادیان فاز تداخل نما انتگرال گرفته می شود و هر کجا که با ناپیوستگی مواجه باشد، بر اساس علامت ناپیوستگی 2π به آن اضافه یا از آن کم می گردد، تا یک مقطع عرضی از فاز بازیابی شده بدست آید. در مواردی که پرش فاز در یک سلول واحد بزرگتر از 2π باشد، کار کمی پیچیده خواهد شد. به عنوان مثال در مناطقی که تغییرات ارتفاع به سرعت صورت می گیرد، چنین حالتی پیش می آید. در چنین شرایطی، روش های خاصی لازم است تا بازیابی فاز صورت بگیرد.

^۱ Phase jump

پس از بازیابی فاز لازم است تا نمودار فاز تداخل سنجی بر حسب توپوگرافی مطلق (توپوگرافی نسبت به سطح دریا) تفسیر گردد. ساده ترین راه برای انجام این کار استفاده از نقاط کنترل زمینی است که این امکان را فراهم می آورد تا اختلاف فاز در بعضی نقاط، به ارتفاع متناظر با آن مرتبط گردد. سپس باقیمانده فاز را می توان بر حسب ارتفاع کالیبره نمود.



شکل ۴-۸ نمایش بازیابی فاز در امتداد برش عرضی نشان داده شده در تداخل نما: نمودار بالا سمت راست تغییرات فاز بازیابی نشده در طول برش را نشان می دهد، در حالی که نمودار پایین سمت چپ گرادیان فاز پیچشی را نشان می دهد، نمودار پایین سمت راست فاز بازیابی شده در طول برش پس از انتگرال گیری از گرادیان و جبران برش فاز را نمایش می دهد (Richards, 2009).

۴ - ۱۱ انواع تداخل سنجی SAR

تداخل سنجی عمود بر مسیر حرکت سیستم رادار^۱، که در آن دو آنتن رادار عمود بر مسیر حرکت سکوی ماهواره قرار گرفته اند و بعضی مواقع به صورت مخفف XTI نوشته می شود، به دو صورت انجام می پذیرد: یا با قرار گرفتن دو آنتن بر روی یک سکو، مانند ماهواره SRTM، و یا با استفاده از دو عبور متفاوت یک ماهواره SAR، مانند ERS یا PALSAR. به شرط تغییر نکردن لندسکیپ بین

¹ Cross track interferometry

دو گذر، آرایش اخیر تداخل نمای قابل قبولی را بدست می دهد. از اینرو XTI به دو زیر شاخه تداخل سنجی تک گذر^۱ و تکرار گذر^۲ تقسیم می شود.

همچنین آنتن ها می توانند در امتداد مسیر حرکت ماهواره، موازی با بردار سرعت سکو قرار بگیرند. که در این صورت تداخل سنجی از نوع تداخل سنجی در امتداد مسیر حرکت، یا ATI^۳ خواهد بود. ATI نیز می تواند تک گذر و یا با تکرار گذر باشد. تداخل سنجی در امتداد مسیر با تکرار گذر^۴، در اصل، نیاز به تکرار عبور در همان مداری که در گردش قبلی پیموده شده است دارد. در ادامه خواهیم دید که تداخل سنجی موازی با مسیر حرکت بدلیل اینکه فاصله مایل برای گذر های مختلف یکسان است، نسبت به توپوگرافی زمین حساس نیست، اما تکنولوژی مهمی جهت نمایان سازی تغییرات ایجاد شده بین دو مشاهده می باشد. معمولاً در ATI با تکرار گذر، سکو ها دقیقاً مسیر یکسانی را طی نمی کنند. بنابراین در جدایش امتداد مسیر کمی جدایی عمود بر مسیر نیز خواهیم داشت، و می تواند جزئیات توپوگرافی را به خوبی تغییرات عوارض زمین تشخیص دهد. تأثیرات توپوگرافی را می توان با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی حذف نمود، که در قسمت آشکارسازی توپوگرافی راجع به آن بحث خواهد شد. انواع اصلی تداخل سنجی SAR در شکل (۴-۹) نمایش داده شده است (Richards, 2009).

۴ - ۱۲ عدم همبستگی

هر مکانیسمی که منجر به اختلاف آماری میان سیگنال های رسیده از دو مسیر شود، می تواند بین آنها ناهمبستگی^۵ ایجاد نماید. این مکانیسم ها شامل اختلاف در مرکز یا حامل موج، فرکانس ها، اندازه خط مبنا، عدم تطابق میان دو تصویر در دو جهت رنج و آزیموت و میزان نوفه اندازه گیری فاز در هنگام دریافت می باشد.

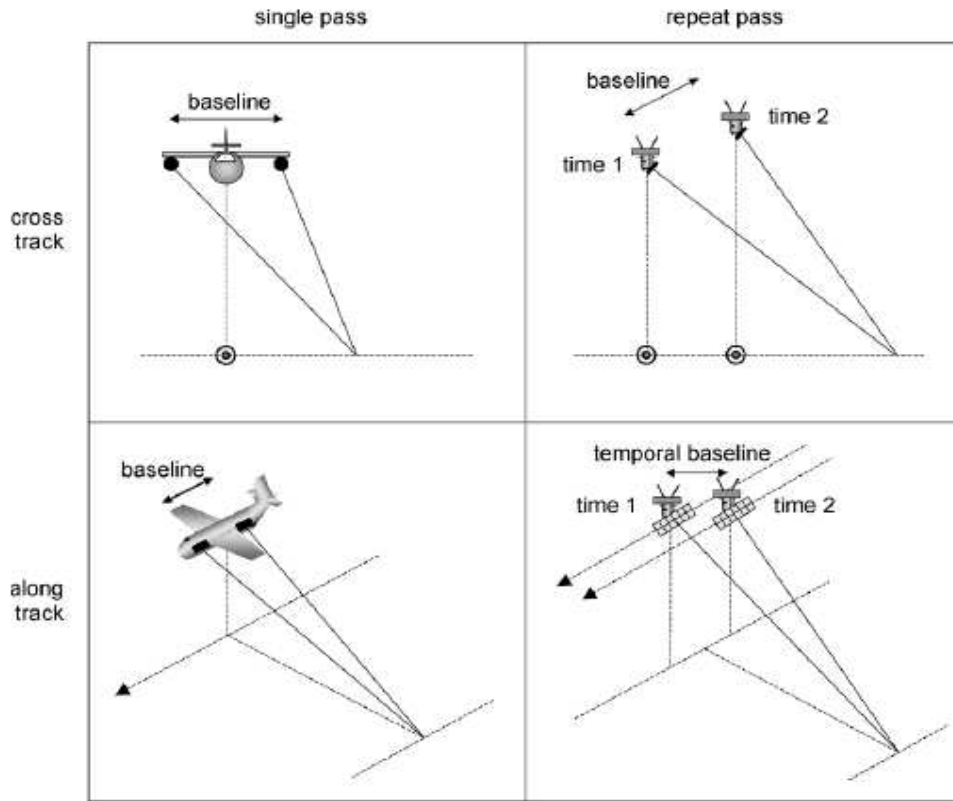
¹ Single pass interferometry

² Repeat pass interferometry

³ Along track interferometry

⁴ Repeat pass along track interferometry

⁵ Decorrelation



شکل ۹-۴ انواع تداخل سنجی SAR (Richards, 2009).

چنانچه در تداخل سنجی با تکرار گذر، سطح زمین در فاصله زمانی بین دو تصویربرداری تغییر کرده باشد، اختلاف فاز تداخل سنجی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. در اصل هر پدیده ای که با زمان تغییر می کند می تواند باعث تصادفی کردن فاز تداخل نما برای پیکسل های همبسته بین دو گذر گردد. چنانچه دو تصویر همبسته نباشند، اطلاعات تداخل سنجی تولید نخواهد شد.

درجه همفازی یا همدوسی^۱، میان دو تصویر e_1 و e_2 یک تداخل نما برابر با اندازه همبستگی

مقاطع مختلط^۲ بین دو تصویر است و از رابطه زیر محاسبه می شود

$$\gamma = \frac{|\langle e_1 e_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle |e_1|^2 \rangle \langle |e_2^*|^2 \rangle}} \quad (17-4)$$

¹ Coherence

² Complex cross correlation

این عبارت در صورتی که دو تصویر در منطقه انتخاب شده جهت میانگین گیری، کاملاً همبسته باشند برابر یک و در صورتی که هیچ رابطه آماری میان تصاویر نباشد برابر صفر خواهد بود و در این صورت دو تصویر کاملاً ناهمبسته می باشند.

همدوسی را می توان به صورت حاصلضرب چند مؤلفه بیان کرد و هر مؤلفه را به یک مکانیسم

مستقل ایجاد عدم همبستگی نسبت داد. به عنوان مثال می توان آن را به صورت زیر نوشت

$$\gamma = \gamma_{baseline} \gamma_{pixel} \gamma_{noise} \quad (18-4)$$

که به ترتیب به عدم همبستگی ناشی از خط مبنا، عدم همبستگی به علت تغییر خود پیکسل یا اختلاف نما از منظر رادارها، و نویز فاز، اشاره دارند. می توان بعضی از این مؤلفه ها را با عبارات ساده و صریحی بیان نمود. همدوسی نویز به صورت زیر بیان می شود (Richards, 2009).

$$\gamma_{noise} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}} \quad (a \ 19-4)$$

که در آن SNR نسبت سیگنال به نویز دو گیرنده رادار است. برای داشتن ضریب سیگنال به نویز بالا بایستی این مقدار نزدیک به یک باشد. همدوسی خط مبنا از رابطه زیر بدست می آید

$$\gamma_{baseline} = 1 - \frac{2B_r \cos^2 \theta}{\lambda R_0} \quad (b \ 19-4)$$

همانطور که انتظار می رفت این معادله تابعی از پارامترهای سیستم مانند خط مبنای افقی¹ B ، تفکیک پذیری جانبی زمینی، فاصله مایل تا هدف، طول موج و زاویه دید می باشد. با نوشتن خط مبنا بر حسب خط مبنای قائم داریم

$$\gamma_{baseline} = 1 - \frac{2B_{\perp} r_g c \cos \theta}{\lambda R_0} \quad (c \ 19-4)$$

با توجه به این معادله در حالی که اساساً پارامترهای دیگر ثابت هستند، میزان همدوسی با خط مبنا کنترل می شود. خط مبنایی با طول بلند باعث کاهش همدوسی می شود، در حالی که خط مبنای کوتاه به داشتن میزان همدوسی بالاتر کمک می کند. خط مبنای قائمی که باعث پایین آمدن همدوسی تا حد صفر می شود خط مبنای بحرانی نام دارد.

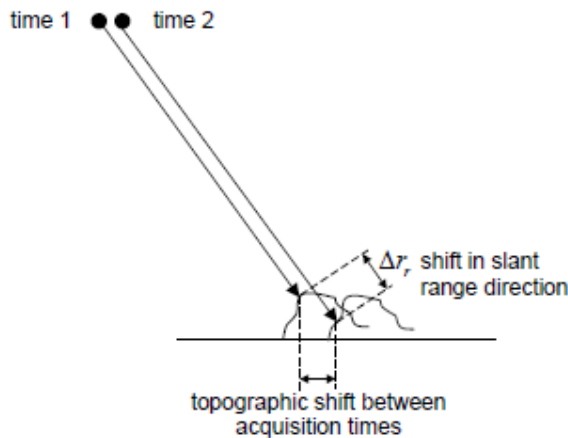
¹ Horizontal baseline

عدم همبستگی ناشی از تأثیرات خود پیکسل در بخش بعدی بررسی خواهد شد. مقایسه (۴-۱۷) و (۴-۱۹) نشان می دهد که در واقع همدوسی همان امید ریاضی، بزرگی تداخل نمایی است که با ضرب پیکسل به پیکسل یک تصویر مختلط در مزدوج مختلط تصویر دیگر بدست می آید. همچنین فاز تداخل سنجی که در رابطه (۴-۱۶) نشان داده شده، آرگومانی از همین حاصلضرب است.

۴ - ۱۳ آشکار سازی تغییرات توپوگرافی : تداخل سنجی در امتداد مسیر

چنانچه تغییری در تصویر منطقه مورد بررسی در فاصله زمانی دو اکتساب اتفاق بیافتد، مانند جابجایی در راستای دید مایل رادار که در شکل (۴-۱۰) نمایش داده شده است، برای پیکسل های متناظر با آن اختلاف فازی متناسب با اختلاف بوجود آمده در مسیر ایجاد می شود (رابطه ۴-۲۰).

$$\Delta\phi_{change} = \frac{4\pi\Delta r_r}{\lambda} \quad (4-20)$$



شکل ۴-۱۰ اندازه گیری تغییرات توپوگرافی در راستای فاصله مایل با استفاده از repeat pass along track interferometry (Richards, 2009).

اختلاف فاز بین دو سیگنال دریافتی رادار به نرخ تغییرات فاصله نسبت به طول موج در جهت مایل بستگی دارد. برای ماهواره ENVISAT که طول موجی برابر ۰,۰۵۶ متر دارد، یک چرخه کامل از

اختلاف فاز معادل با تغییر ارتفاعی در حدود ۲۸ میلی متر $\Delta r_r = \frac{\lambda}{2}$ می باشد.

اگر خط مبنای عمود بر مسیر حرکت داشته باشیم علاوه بر اختلاف فازی که به دلیل اختلاف زمانی (خط مبنای زمانی^۱) بوجود آمده، توپوگرافی نیز باعث تغییر فاز می شود. بنابراین با دانستن این موضوع که اختلاف فاز کل که معمولاً اختلاف فاز جابجایی^۲ نامیده می شود، تابعی از توپوگرافی و تغییر آن است، می توان آن را به صورت زیر نوشت

$$\Delta\phi = \Delta\phi(h, \Delta r_r) \quad (a21-4)$$

با بسط مرتبه اول این معادله داریم

$$\Delta\phi = \frac{\partial(\Delta\phi)}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial(\Delta\phi)}{\partial(\Delta r_r)} \Delta r_r$$

با جایگذاری $\frac{\partial(\Delta\phi)}{\partial h}$ با استفاده از معادله (۴-۱۴) و قرار دادن $\frac{\partial(\Delta\phi)}{\partial(\Delta r_r)} = \frac{4\pi}{\lambda}$ ، از معادله (۴-۲۰)،

فاز تداخل سنجی ناشی از هر دو فاکتور برابر است با

$$\Delta\phi = \frac{4\pi B_{\perp} \cos \theta}{\lambda H \sin \theta} \Delta h + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_r \quad (b21-4)$$

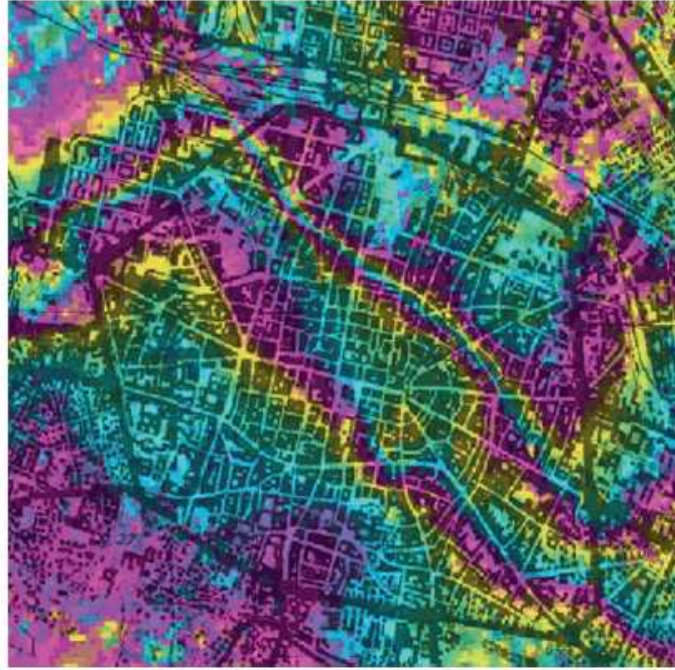
به منظور جداسازی فاز تداخل سنجی که در نتیجه تغییر شکل ایجاد شده در فاصله زمانی اخذ دو تصویر بوجود آمده، لازم است تا فاز مربوط به توپوگرافی را حذف نماییم. این کار با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی SAR^۳ یا D-InSAR انجام می پذیرد. در روش D-InSAR بایستی یک مدل توپوگرافی جهت جداسازی توپوگرافی ثابت از تداخل نمای بدست آمده بیابیم. برای انجام این کار دو روش وجود دارد. روش اول مستلزم استفاده از یک مدل رقومی ارتفاع^۴ (DEM)، به منظور ساخت فاز توپوگرافی تداخل سنجی است. سپس با تفریق پیکسل به پیکسل فاز تداخل سنجی از آن، اختلاف فاز ایجادشده به دلیل تغییرات ارتفاع به دست خواهد آمد. شکل (۴-۱۱) نقشه تغییرات توپوگرافی را که با استفاده از این روش بدست آمده نمایش می دهد. اما روش دوم استفاده از تصویر سوم SAR می باشد. دو تصویر SAR به منظور تشکیل تداخل نمایی که تنها بستگی به توپوگرافی دارد استفاده می شوند. سپس فاز این تداخل نما از فاز تداخل نمایی که به وسیله دو تصویر دیگر ایجاد شده، حذف

¹ Temporal baseline

² Displacement phase difference

³ Differential interferometric SAR

⁴ Digital elevation model



شکل ۴-۱۱ این شکل مدل توپوگرافی فرونشست شهر Bologna در ایتالیا را نمایش می دهد. نرخ فرونشست در هر چرخه رنگ نشان داده شده حدود ۱ سانتی متر است. تصویر با تکنیک D-InSAR و با استفاده از تصاویر ERS تولید شده است (پردازش داده ها با استفاده از نرم افزار GAMMA انجام شده است)، (Richards,2009).

می گردد. این عمل تأثیر تغییرات توپوگرافی را ماکزیمم می سازد و تداخل سنجی سه گذره^۱ نامیده می شود. روش تداخل سنجی سه گذره، همراه با یک فرض ضمنی است. در این روش فرض می شود، در دو تصویری که برای ساخت فاز توپوگرافی تداخل سنجی استفاده می شوند، اختلاف فاز ناشی از جابجایی وجود ندارد. به عبارت دیگر نیاز به یک خط مبنای عمود بر مسیر حرکت سکو وجود دارد و بایستی دو تصویربرداری در یک بازه زمانی کوتاه قبل از وقوع جابجایی انجام شود. یکی از مزایای روشی که از DEM استفاده می کند، نداشتن این فرض است و در این روش مسئله مهم یافتن یک مدل ارتفاعی مناسب می باشد.

متأسفانه فاز تداخل سنجی تحت تأثیر عوامل دیگری غیر از توپوگرافی و جابجایی (که در

معادله (۴-۲۱) فرض شد) می باشد. به طور کلی اختلاف فاز را می توان به صورت زیر بیان نمود

¹ Three pass interferometry

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{disp} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{pixel} + \Delta\phi_{noise} + \Delta\phi_{error} \quad (۲۲-۴)$$

که در آن $\Delta\phi_{topo}$ اختلاف فاز تداخل سنجی حاصل از توپوگرافی است. $\Delta\phi_{disp}$ اختلاف فازی است که در اثر جابجایی سطح ایجاد می شود، $\Delta\phi_{atm}$ اختلاف فازی است به دلیل تغییر ثابت دی الکتریک اتمسفر ایجاد می شود.

مؤلفه ناشی از اتمسفر را در صورت ناچیز بودن می توان بر اساس مدل سازی و با استفاده از تداخل نما های چند خط مبنایی^۱ جبران نمود. $\Delta\phi_{noise}$ در نتیجه نویز فاز سیستم راداری ایجاد می شود که می توان آن را با میانگین گیری از چند گروه پیکسل کاهش داد اما این کار به قیمت کاهش قدرت تفکیک مکانی انجام می پذیرد. $\Delta\phi_{error}$ به دلیل عدم قطعیت در علم به مکان سکو و خط مبنا می باشد. $\Delta\phi_{pixel}$ تغییر در فاز بین دو تصویر، به دلیل تغییر در بازتاب پذیری نقطه مورد مشاهده است. سیگنال دریافتی از یک پیکسل معین که متناسب با میزان بازتاب پذیری آن می باشد، مجموع حوزه های بازگشتی از هزاران بازتاب کننده منفرد موجود در درون سلول است. چنانچه بدلیل تغییر در میزان بازتاب پذیری پراکنده سازهای متناظر، تغییری در شدت یکی از این حوزه ها رخ دهد مجموع همدوس تغییر خواهد کرد. به عنوان مثال ممکن است این اتفاق بدلیل رشد گیاهان در یک منطقه اتفاق بیافتد. همچنین اگر به دلیل فاصله بین دو موقعیت تصویر برداری، زاویه ای که تحت آن پیکسل (نقطه مورد نظر) مشاهده می شود تغییر نماید، این مجموع همدوس تغییر می نماید. تغییر در بازتاب پذیری پیکسل بدلیل تغییر با زمان یا تغییر در زاویه دید رادار تولید خطایی در فاز تداخل سنجی می کند که منجر به عدم همبستگی شده و باعث می شود تا مؤلفه همدوسی پیکسل، γ_{pixel} ، در معادله (۴-۱۸) کمتر از واحد گردد. چنانچه ناهمبستگی پیکسل کنترل نشود تأثیر قابل توجهی بر اندازه گیری جابجایی خواهد داشت. یک راه حل برای کنترل آن کوتاه نگاه داشتن خط مبناست که احتمال تغییر در زاویه فرود و زاویه لوچی غیر ارادی را کمینه می کند.

^۱ Multi-baseline

روش دیگری که عدم همبستگی را کمینه می سازد، محدود کردن توجه مان به قسمت هایی از منطقه مورد بررسی است که احتمال وجود نا همبستگی در آنها بسیار کم می باشد. اینکار اساس روش پراکنده سازهای پایدار^۱ است. پراکنده ساز های پایدار، پراکنده ساز هایی هستند که مسلط بر پاسخ پیکسل ها می باشند به طوری که خصوصیات پیکسل و اساساً واکنش فاز آن به زاویه دید حساس نبوده و احتمال تغییر آن با گذشت زمان کم است.

۴-۱۴ تداخل سنجی تصاویر میدان درود

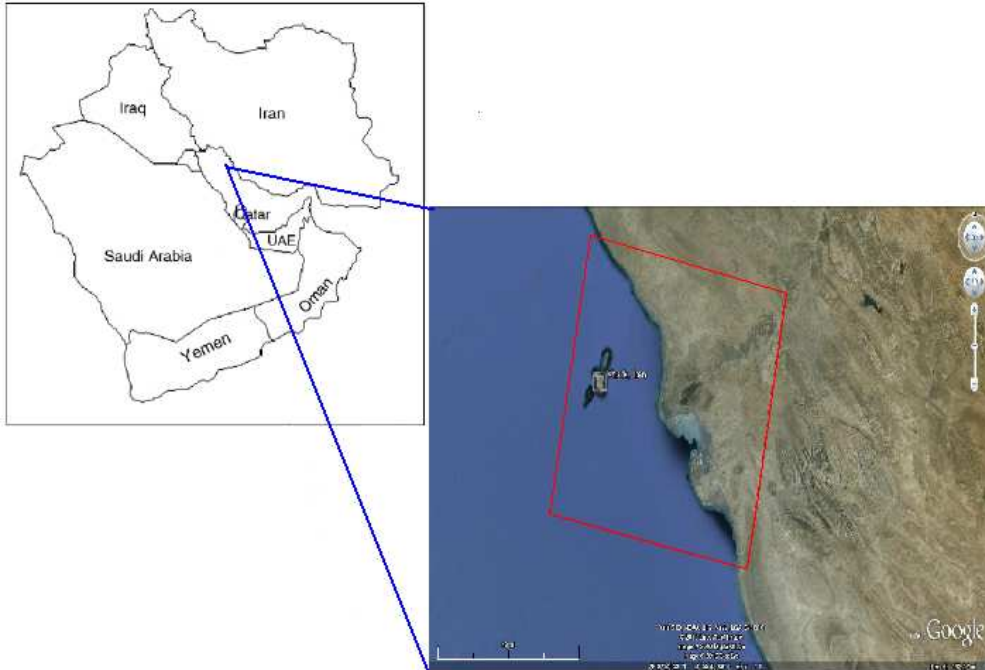
در گام نخست به منظور بررسی میزان فرونشست در بخش خشکی میادین نفتی خارگ و درود با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی رادار، تصاویر سنجنده ASAR ماهواره ENVISAT تهیه شد (شکل ۴-۱۲). در این راستا و به سبب عدم دسترسی به تصاویر فوق از منطقه مورد نظر در داخل کشور، پیش نویس طرحی مبنی بر درخواست سفارش تصاویر موجود در آرشیو سازمان فضایی اروپا (ESA) تهیه و از طریق سایت تجاری سفارش تصاویر توسط کاربران کاتاگوری ۱، ارسال گردید. ضمن بررسی تصاویر ASAR موجود در آرشیو از منطقه ای با مختصات مرکز تصویر ۲۹ درجه و ۱۱ دقیقه و ۵۰ درجه و ۴۰ دقیقه به شعاع ۵۰ کیلومتر، آن دسته از فریم هایی که پوشش کاملی از میدان را داشتند انتخاب گردیدند. بدین ترتیب ۱۲ فریم از تصاویر Level صفر با گستره ۱۰۰ × ۱۰۰ متر مربع که با وضعیت تصویر برداری پایین گذر اخذ شده بودند، به صورت online در اختیار قرار گرفتند.

۴-۱۴-۱ پردازش تصاویر اخذ شده از جزیره خارگ

از میان امکانات نرم افزاری جهت پردازش تصاویر رادار با درجه مصنوعی می توان بسته های نرم افزاری و نوار ابزارهای رایگان DORIS (TUDelft, 2008)، ASARtoolbox(AsarCrop. USA) و ROI-PAC (JPL, 2009) اشاره نمود (فولادی مقدم، ۱۳۸۸). در این مطالعه از نرم افزار تجاری

^۱ Permanent scatterer

GAMMA (Wegmuller et al., 2006) استفاده شده است که در ادامه به نتایج پردازش تصاویر منطقه خارگ (بخش خشکی میدان درود) با این نرم افزار پرداخته می شود.

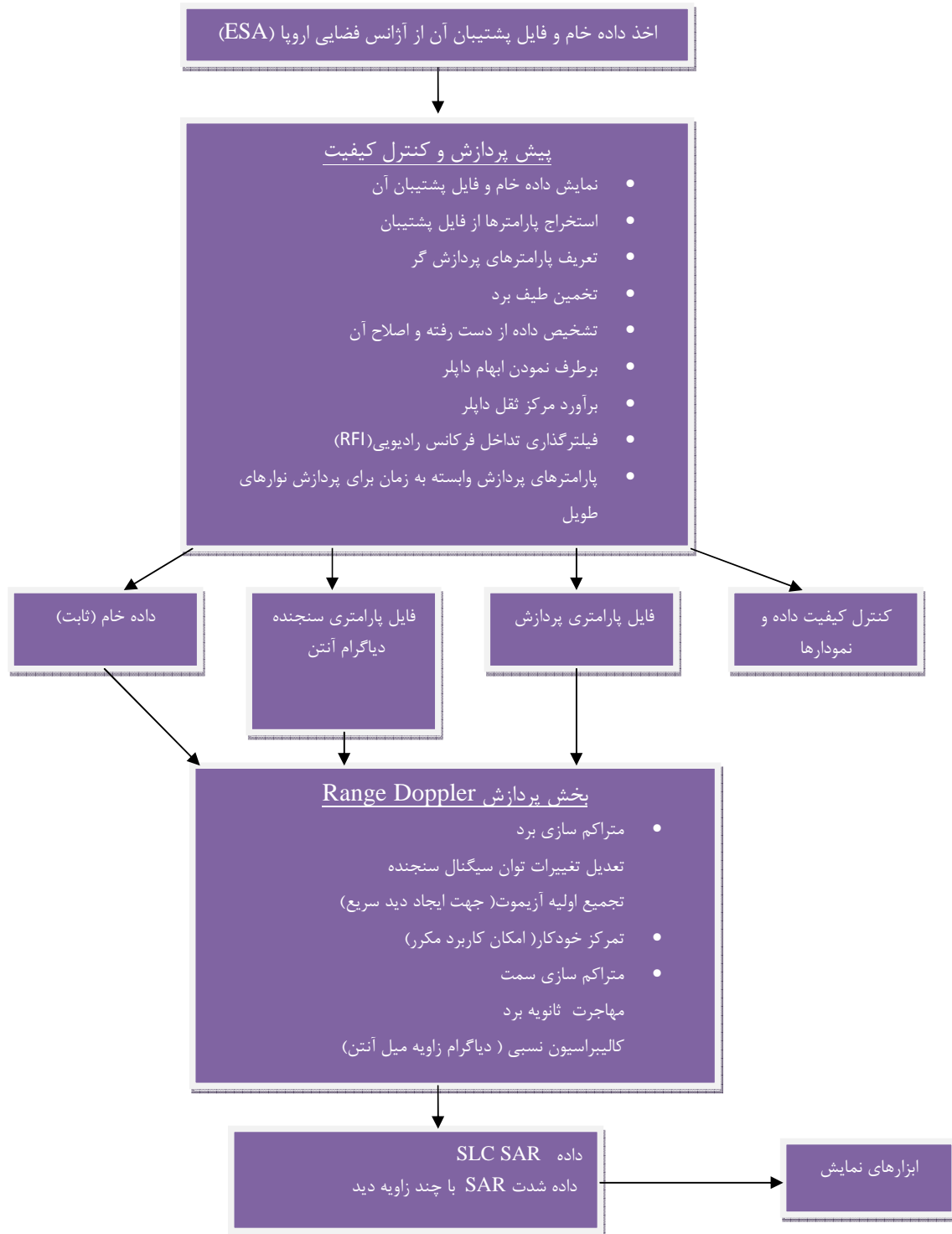


شکل ۴-۱۲ موقعیت جزیره خارک و فریم تصویر ASAR که در این مطالعه به کار رفته است

۴-۱۴-۲ پیش پردازش تصاویر در نرم افزار GAMMA

نرم افزار GAMMA که به زبان برنامه نویسی ANSI C نوشته شده، بر روی سیستم عامل UNIX، PC/LINUX و PC/NT قابل اجراست. در این نرم افزار از روش مرحله‌ای و کدنویسی با ساختار کاملاً مشخص استفاده می شود. در پردازش تداخل سنجی لازم است تصاویر خام ASAR دریافت شده، در نرم افزار تخصصی GAMMA شناسایی و قابل خواندن شوند. مراحل متعددی که در پیش پردازش تصاویر جهت تهیه تصویر مختلط منفرد نگر^۱ (SLC) بکار گرفته می شود، در شکل (۴-۱۳) نمایش داده شده است.

^۱ Single Looking Complex

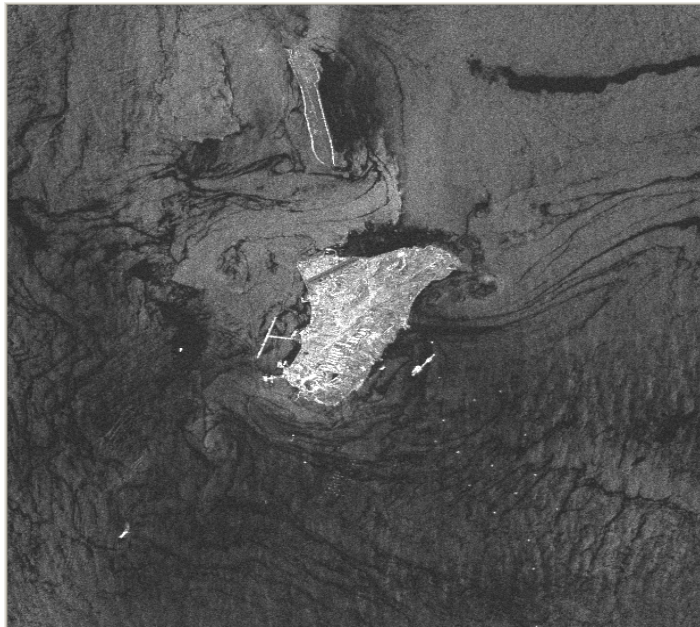


شکل ۴-۱۳ الگوریتم تبدیل تصاویر خام ASAR به تصاویر SLC (Wegmuller et al., 2006)

تهیه تصاویر مختلط منفردنگر بوسیله پردازشگر MSP^۱ از نرم افزار GAMMA انجام می شود. برای مطالعه جزئیات هر یک از این مراحل می توان به منابع و کتب موجود در ارتباط با پردازش و آنالیز

^۱ Modular SAR Processor

سیستم های راداری مراجعه نمود (Mahafza, 2000). طبیعت سیگنال SAR موجب نوعی نویز در تصاویر SLC به نام نویز لکه^۱ می شود. برای کاهش این نویز معمولاً کمی قدرت تفکیک را کاهش می دهند. برای این کار تصویر به چند زیر بخش به نام Look تقسیم میشود. هر Look مورد پردازش قرار گرفته و در نهایت اطلاعات با هم ترکیب می شوند. حاصل این عمل تصویر MLC^۲ است که در آن مقدار نویز لکه کاهش قابل توجهی یافته است (شکل ۴-۱۴).



شکل ۴-۱۴ نمونه ای از تصاویر حاصل از پردازش اولیه داده خام از منطقه خارج (تصویر MLC).

۴-۱۴-۳ تهیه تداخل نما

برای تهیه تداخل نما به وسیله نرم افزار GAMMA از پردازشگر^۳ ISP استفاده می شود. ISP از الگوریتم های بسیاری که برای تولید تداخل نما، نقشه های ارتفاعی، نقشه های هم فازی و محصولات تداخل سنجی تفاضلی که مورد نیاز هستند، تشکیل یافته است. ترتیب انجام مراحل ذکر شده در شکل (۴-۱۵) نمایش داده شده است. الگوریتم تهیه تداخل نما با برآورد خط مبنا از داده مداری و

^۱ Speckle

^۲ Multi-Look Complex

^۳ Interferometric SAR Processor

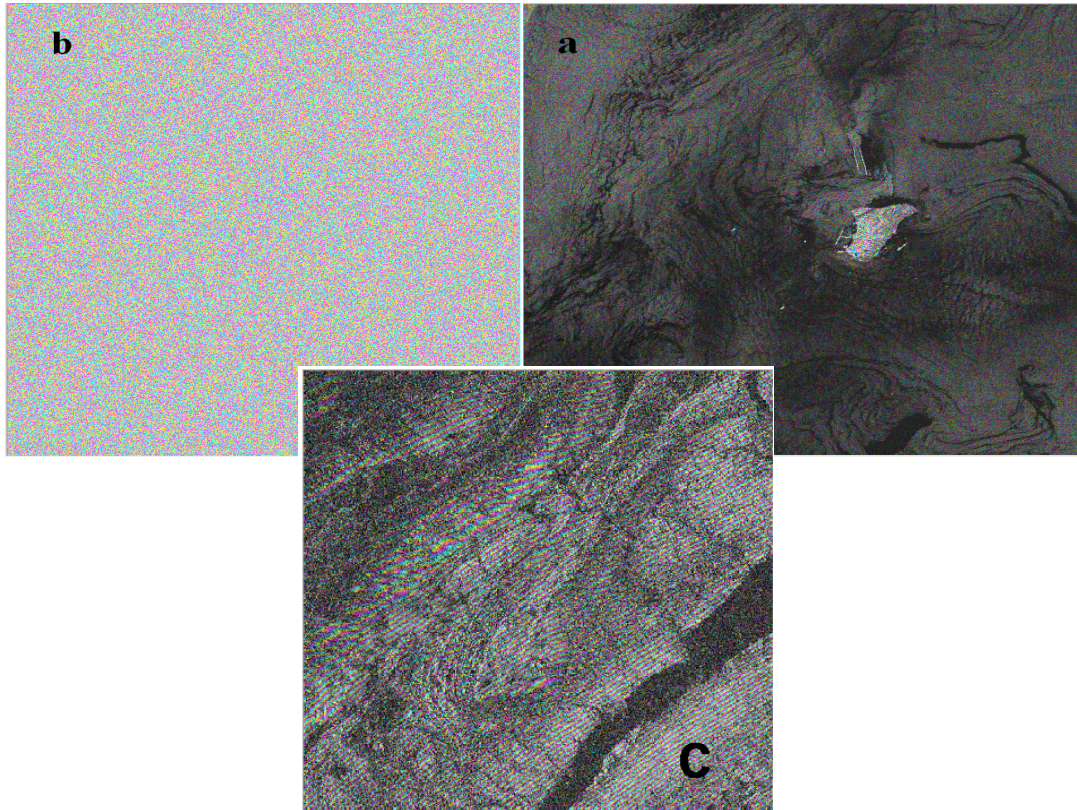
ثبت هندسی دو تصویری که از نظر مداری و فاصله زمانی نسبت به یکدیگر مناسب باشند، آغاز می گردد. سپس تداخل نما همراه با فیلتر گذاری باند طیفی تولید می گردد. تکمیل کننده این بخش از فرآیند تداخل سنجی مسطح سازی تداخل نماست که با حذف روند فاز زمین مسطح صورت می پذیرد.



شکل ۴-۱۵ مراحل تشکیل تداخل نما در نرم افزار GAMMA (Wegmuller et al,2000)

در شکل (۴-۱۶ a) نمونه ای از تداخل نمای تشکیل شده به روش فوق و پس از مسطح سازی نمایش داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود تداخل نمای حاصل به شدت تحت تأثیر فاز اتمسفری و عدم همبستگی زمانی ناشی از تبخیر آب های اطراف جزیره می باشد، به طوری که بر روی تصویر فرینج های اختلاف فاز را نمی توان تشخیص داد. در حالی که تداخل نمای حاصله در این

مرحله از منطقه‌ای که تصاویرش همبستگی مکانی و زمانی دارند، (مانند منطقه نفتی آغاچاری) به صورت شکل (۴-۱۶ c) خواهد بود. شکل (۴-۱۶ b) که تصویر فاز تداخل نمای شکل (۴-۱۶ a) است بهتر گویای عدم همبستگی زمانی تصاویر منطقه می باشد.



شکل (۴-۱۶ a) نمونه ای از تداخل نمای تهیه شده از منطقه خارج پس از مسطح سازی (b) تصویر فاز تداخل نمای شکل قسمت a (c) تداخل نمای تهیه شده در میدان نفتی آغاچاری (فولادی مقدم، ۱۳۸۸) پس از مسطح سازی.

مراحل بعدی تهیه تداخل نما برآورد همبستگی تداخل سنجی، فیلترگذاری انطباقی تداخل نماها، بازیابی فاز توسط الگوریتم برش شاخه‌ای^۱، محاسبه دقیق خطوط مبنای تداخل سنجی از نقاط کنترل زمینی، محاسبه ارتفاع توپوگرافیک و یکسوکردن تصویر و درون یابی نقشه های ارتفاع و شیب تداخل سنجی است. شایان ذکر است که به منظور حذف مؤلفه فازی ناشی از اثرات توپوگرافیک، از یک مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۹۰ متر و عدم صحت قائم ۱۰ متر که توسط ماهواره SRTM تهیه شده است، استفاده شده است.

^۱ Branch cut

۴-۱۴-۵ بازیابی فاز و مکان مرجع نمودن

نرم افزار GAMMA برای بازیابی فاز از الگوریتم برش باقیمانده^۱ (Tree) استفاده می نماید. نخستین روند بازیابی فاز به سبک برش باقیمانده در سال ۱۹۸۸ توسط Goldestin با شناسایی موقعیت تمام مقادیر باقیمانده در یک تداخل نما و اتصال باقیمانده ها با برش شاخه‌ای برای حذف مسیر های تلفیقی که توانایی محصور نمودن تعدادی از باقیمانده های مثبت یا منفی را دارا بودند، صورت گرفت. Lu و Zebker (1997) به سبب مفهوم واژه برش های شاخه ای و ظاهر دندریتی آن ها، از اتصال باقیمانده ها به عنوان درختان در حال رشد^۲ نام بردند (فولادی مقدم، ۱۳۸۸).

در الگوریتم بکار رفته جهت بازیابی فاز ابتدا میزان همدوسی تداخل نما محاسبه شده و مناطق با همدوسی پایین ماسک می گردند. همانطور که در بخش (۴-۱۲) عنوان شد میزان همدوسی تصاویر تحت تأثیر پارامترهای مختلفی همچون عدم همبستگی ناشی از خط مبنا، عدم همبستگی ناشی از تغییرات پیکسل یا اختلاف نما از منظر رادارها، و نویز فاز سیستم می باشد. با توجه به موقعیت جغرافیایی خاص جزیره خارگ و قرارگیری آن در مجاورت مناطق با تبخیر بسیار بالای آب، تأثیرات اتمسفری از میزان سیگنال به نویز (SNR) دریافتی تا حد زیادی خواهد کاست. بنابراین با کاهش مؤلفه γ_{noise} ، در رابطه (۴-۱۹) میزان همدوسی تصاویر به شدت کاهش می یابد. میزان همدوسی پایین باعث بروز مشکلات زیادی در بازیابی فاز می گردد.

تداخل نمای تفاضلی هموار شده حاصل از فیلتر گذاری انطباقی برای تعیین باقیمانده های فازی موجود در تداخل نما بررسی شده و نتایج آن در فایلی که از قبل مشخص گردیده است، ذخیره می شود. این مقادیر به سبب قابلیت تجمع بیش از اندازه فاز در اطراف آن ها در فرآیند بازیابی از اهمیت بالایی برخوردارند.

مقدار باقیمانده در تصاویر راداری از دو منبع حاصل می گردند. نخستین منبع، ناهمبستگی های طبیعی موجود در داده ها در مناطق پرشیب یا به سبب جابجایی زیاد سطح زمین در فاصله دو

¹ Residue- cut

² Growing trees

تصویرداری است که منجر به کاهش فواصل فرینج ها می شود، به گونه‌ای که ابعاد آن به سختی به نیم چرخه می رسد. منبع دوم، نوفه موجود در سری داده است که ممکن است از نوع حرارتی بوده یا بر اثر عدم همبستگی ناشی از طول خط مبنا و تغییر زمانی منطقه تصویر برداری رخ داده باشد. باقیمانده های حاصل از هر منبعی لازم است طی فرآیند بازیابی فاز متعادل سازی گردند (فولادی مقدم، ۱۳۸۸).

با توجه به محتوی فایل ذخیره شده، برای اتصال مناطق مشخص شده با همدوسی پایین در کنار باقیمانده ها و ایجاد ساختار درختی شکل از آن ها، از الگوریتم بازیابی فاز Trees استفاده می شود، به گونه ای که فرآیند بازیابی در هیچ یک از شاخه های این ساختار درختی اجرا نخواهد شد. با توجه به مقدار بسیار بالای فاز اتمسفری در تصاویر و همدوسی پایین این تصاویر در تمامی قسمت های تصویر و میزان بالای باقیمانده در آن عملاً بازیابی فاز دچار مشکل شده و مسیرهای تلفیق بسته در فاز برابر با صفر نمی گردند. با حضور دائم بخار آب اتمسفری در جو منطقه خارگ استفاده از تصاویر دیگر منطقه (که مربوط به زمان های متفاوت می باشند) کارساز نبوده و تداخل سنجی در مرحله بازیابی فاز متوقف می گردد. قبل از بررسی کارآیی روش های مختلف حذف نوفه اتمسفری و افزایش همدوسی تصاویر جزیره خارگ، در بخش بعدی انواع خطاهای ناشی از اتمسفر بررسی می گردند.

۴-۱۵ تأثیر اتمسفر بر محصولات InSAR

تأثیر اتمسفر بر تصاویر حاصل از تداخل سنجی معمولاً به دو بخش اثر اتمسفری عام و اثر اتمسفری خاص تقسیم می شوند. اثر عام همیشه بر پرتوهای رادار تأثیر می گذارد اما اثر خاص تحت شرایط خاص (به عنوان مثال در صورت وجود بارش باران در منطقه) رخ می دهد. این نوع تأثیرات معمولاً به صورت غیر همگن رخ داده و معمولاً غیر وابسته به ارتفاع می باشند (Hanssen, 2001). بیشترین مقدار خطای اتمسفری عام در نتیجه نوسان فاز ایجاد شده توسط تروپوسفر رخ می دهد. پارامترهای تروپوسفری معمولاً در دو گروه اصلی، پارامترهای شرایط مرطوب و پارامترهای شرایط

خشک یا پارامترهای ترم هیدرواستاتیک طبقه بندی می شوند (Adham et al., 2008). پارامترهای ترم مرطوب شامل فازهای مختلف آب در اتمسفر می باشند. در حالی که پارامترهای ترم خشک خصوصیات کلی اتمسفر مانند فشار و دما را در بر می گیرند.

مطالعات انجام گرفته توسط محققین نشان می دهد که تأثیر تبخیر آب بر روی تصاویر SAR اهمیت بیشتری دارد و در محاسبات دقیق هندسی بایستی مورد توجه قرار گیرد (Zebker et al., 1997). عامل هیدرواستاتیک نیز تأثیر قابل توجهی بر تصاویر InSAR دارد اما میزان تأثیر این خطا به اندازه خطای تبخیر آب مسأله ساز نیست (Zebker et al., 1997). در تصاویر جزیره خارگ نیز نوفه اتمسفری شدید منطقه عمدتاً در نتیجه تبخیر بالای آب می باشد. بنابراین به بررسی بیشتر نحوه تأثیر این نوفه ها بر تصاویر و روش های موجود جهت حذف آنها می پردازیم.

۴-۱۵-۱ تأثیر عام اتمسفری

تأثیر عام اتمسفر بر فاز تصاویر SAR را در دولایه متفاوت می توان بررسی نمود: تروپوسفر و یونوسفر (Hanssen, 2001). تأخیر فاز تروپوسفری برخلاف نوسان فاز یونوسفری، مستقل از فرکانس اندازه گیری می باشد (Zebker et al, 1997). بنابراین تکرار اندازه گیری ها با طول موج های متفاوت میسر واقع نخواهد شد.

۴-۱۵-۱-۱ تأخیر مرطوب

بسیاری از محققین معتقدند که مهمترین دلیل نوسان اتمسفری فاز عدم ثبات میزان آب موجود در اتمسفر در فاصله بین دو اکتساب تصویر می باشد (Zebker et al., 1997; Dankelmayer et al., 2004; Li et al., 2005). علاوه بر این، نقش آب مابعد موجود در اتمسفر منطقه بایستی در محاسبات در نظر گرفته شود (Hanssen, 2001). با این حال، بخار آب تأثیر بیشتری بر محصولات InSAR دارد. معمولاً دو نوع متفاوت از خطاهای مربوط به بخار آب در محاسبات InSAR مورد توجه قرار می گیرد (Hanssen, 2001). نوع اول بستگی به مقدار پارامترهای اتمسفری مانند فشار جزئی بخار آب، دما و ارتفاع بستگی دارد. این سیگنال به لایه بندی قائم تروپوسفر بین بالاترین و پایین ترین ارتفاع

در منطقه بستگی دارد (Lyons and Sandwell, 2003). علاوه بر این، تأثیر آن زمانی قابل تشخیص است که مقدار بخار آب بین دو زمان اکتساب تصاویر استفاده شده در تداخل سنجی متغیر باشد (Zebker et al, 1997). اگر پارامترهای اتمسفری در دو تصویر یکسان باشد، خطاها یکدیگر را حذف می نمایند و تداخل نمای حاصل شامل خطای های بخار آب نخواهد بود. تأثیر ذکر شده برای بخار آب بایستی در کلیه مکان هایی که آشفتگی اتمسفری داریم مورد توجه قرار گیرد.

نوع دوم خطای بخار آب فارغ از شرایط فیزیکی و جغرافیایی سطح زمین می باشد. دلیل اصلی این خطا تغییر پذیری محلی محتوای بخار آب در یک منظره است. این ممکن است خطایی غیر همگن در یک تداخل نما ایجاد کند.

مقدار آب مایع اتمسفر معمولاً زمانی که رطوبت نسبی و متناسب با آن میزان بخار آب نسبتاً بالاست، افزایش می یابد (Hanssen, 2001). بنابراین می توان نتیجه گرفت که آب مایع نمی تواند مانند بخار آب قابل توجه باشد. به عنوان مثال Hanssen بیان نمود که ابری با ضخامت ۴ کیلومتر می تواند باعث تأخیر فازی در حدود ۰,۲ سیکل فاز گردد که قابل آشکارسازی و تأثیر گذار می باشد اما تأثیری به مراتب کمتر از اثر بخار آب دارد. برای یک پرتو واحد، تأثیر آب مایع در مقایسه با مقدار بخار آب بسیار کمتر است (Hanssen, 2001).

۴-۱-۱۵-۲ تأخیر هیدرواستاتیک

تأخیر اتمسفری هیدرواستاتیک به پارامترهای خشک اتمسفر همچون دما و فشار اتمسفر بستگی دارد (Smith and Weintraub, 1953). تغییرات دما باعث تغییر در فشار جزئی بخار آب خواهد شد. بنابراین لازم است آن را به عنوان پارامتری تأثیر گذار بر تأخیر هیدرواستاتیک مورد توجه قرار دهیم. بنابراین، باید در آنالیز ترم مرطوب به نوسان دما وزن بیشتری دهیم.

Zebker و همکارانش نشان دادند که ۵۰ میلی بار تغییر در فشار می تواند باعث تأخیر فازی در حدود ۳۵ رادیان در تصویر برداری با باند C گردد.

تغییر فاز به دلیل ترم هیدرواستاتیک معمولاً باعث چند میلیمتر خطا در تداخل نما می گردد (Hanssen, 2001). علاوه بر این، این مقدار خطا می تواند توسط اندازه گیری مداری اتفاق بیافتد. این خطاها را می توان با استفاده از نقاط اتصال کاهش داد. بنابراین در مقیاس های کوچک همچون جزیره خارک می توان از آن صرفنظر نمود.

۴-۱۶ تکنیک های حذف نوفه اتمسفر

همانطور که عنوان شد با توجه به موقعیت خاص جزیره خارک بخار آب مهمترین منشأ خطاهای اتمسفری می باشد. خطای تبخیر آب حتی بعد از اجرای تکنیک های کاهش خطا، خطای غالب InSAR در تصاویر این منطقه می باشد. در نتیجه، بسیاری از تأثیرات اتمسفری عنوان شده در مقایسه با خطای ناشی از شرایط مرطوب ناچیز می باشند. از طرف دیگر بعضی فرآیندهای پیچیده نظیر امواج گرانشی به دلیل عدم وجود نظم در توزیع حجم تبخیر آب در اتمسفر، تصویر را به صورت ناهمگن متأثر می سازند. در این راستا مطالعات بسیاری به منظور کاهش تأثیرات اتمسفر انجام شده است.

دو روش متفاوت جهت کاهش اثرات بخار آب از تصاویر SAR پیشنهاد شده است. روش اول شامل تکنیک های خاص برای انتخاب تصاویر به منظور تولید تداخل سنج ها با پیش پردازش بیش از یک جفت از تصاویر و تجمیع (Stack) آنها برای تشکیل تداخل سنج بهبودیافته می باشد (Li et al., 2005). Zebker (1997) مراحل زیر را جهت رسیدن به دقت مورد نظر پیشنهاد داده است

۱. استفاده از بالاترین طول موج ممکن نسبت به حدود چرخش فارادی و جرقه اتمسفری.
۲. استفاده از بالاترین خط مبنای ممکن با در نظر گرفتن حد ناهمبستگی برای تهیه نقشه های توپوگرافی.

۳. استفاده از چندین مشاهده و میانگین گیری از نتایج حاصله، در اندازه گیری

جابجایی سطح.

با بکار بردن این موارد می توان به دقتی در حد ۱۰ متر برای نقشه های توپوگرافی و ۱ سانتی متر برای اندازه گیری جابجایی سطح دست یافت. این روش ها می توانند باعث کاهش نوفه اتمسفری تصاویر SAR خارج گردند، اما نوفه اتمسفری در منطقه به حدی زیاد است که میزان کاهش نوفه جهت اندازه گیری جابجایی قائم سطح میدان درود کافی نمی باشند.

روش دوم شامل تکنیک های کالیبراسیون می باشد. بسیاری از محققین الگوریتم هایی برای بهبود دقت نتایج InSAR به وسیله کالیبراسیون ارائه داده اند. در میان این روش ها Li روش حذف بخار آب را با ترکیب داده های GPS، MODIS و روش InSAR پیشنهاد داد (Li et al., 2005). در این روش ابتدا تصویر (بخار آب قابل بارش) ¹M-PVW تهیه می گردد. از آنجایی که این تصاویر نسبت به ابر حساس هستند از آن ها جهت ماسک پیکسل هایی که دارای ابر می باشند استفاده می شود. از آنجا که اطلاعات تبخیر آب حاصل از MODIS در مقایسه با اندازه گیری های GPS بین ۵ تا ۲۰ درصد بیشتر اندازه گیری شده است از داده های GPS جهت کالیبراسیون این اطلاعات استفاده می شود. در آخر، تأخیر تروپوسفری قائم که به دلیل تبخیر آب ایجاد می شود، نقشه برداری شده و بر روی تصویر InSAR اعمال می گردد. در منطقه مورد مطالعه شبکه GPS وجود ندارد. به جای داده های GPS می توان از داده های رادیوسوند هواسنجی استفاده نمود. علی رغم دقت قابل قبول داده های رادیوسوند، ناپیوستگی برداشت، روش را مستقل از زمان جمع آوری داده می نماید.

طی بررسی صورت گرفته هیچ گونه داده رادیوسوندی در سازمان هواشناسی کشور از منطقه خارج وجود ندارد. این امر نیز به نوبه خویش مانع از کاربرد چنین تکنیکی جهت حذف و یا کاهش اثرات اتمسفریک می گردد. علاوه بر روش های فوق که برای کاهش نوفه اتمسفری به کار می روند،

¹ MODIS precipitable water vapor

محققین روش های دیگری نیز جهت افزایش همدوسی تصاویر SAR به کار رفته در تداخل سنجی، معرفی نموده اند که کارآیی آنها در جزیره خارگ را در بخش بعدی بررسی می نمایم.

۴-۱۷ روش پراکنده سازهای پایدار

محققین در سال های گذشته جهت کاهش نوفه تصاویر و بالا بردن کیفیت تداخل سنجی، الگوریتم ها و روش های متفاوتی را ارائه نموده اند. روش پراکنده سازهای پایدار یا Permanent Scatterer از جمله آنها می باشد که توسط Ferretti و همکارانش در سال ۲۰۰۰ ارائه گردید. همه مشاهدات فاز در تداخل سنج حاوی اطلاعات مفید نیستند. سطح زمینی که توسط سلول تفکیک پذیری پوشیده شده، ممکن است با گذشت زمان تغییر نماید، ممکن است بازتابش از هدف در راستای ماهواره نباشد، و ممکن است این اهداف خصوصیات فیزیکی مناسبی برای مشاهده شدن با نسبت سیگنال به نویز (SNR) کافی، نداشته باشند. در این روش به منظور انتخاب نقاط همدوس و قابل تفسیر برای اندازه گیری، اهدافی انتخاب می شوند که بازتابش ثابت و قوی در زمان های مختلف دارند. این اهداف اغلب می توانند منسوب به یک شیء فیزیکی واحد باشند (عوارض ساخت بشر) که به عنوان پراکنده ساز غالب عمل می کنند، و یا شبکه ای از نقاط پایه ارتفاعی (Benchmark) باشند که از قبل در محل قرار داده شده اند. همچنین مشاهدات این پراکنده سازهای نقطه ای کمتر به خط مبنای مؤثر (قائم) بین تصاویر اصلی^۱ و پیرو^۲، حساس است. به دلیل نبود شبکه بنچ مارک و عدم پراکنده سازی تأسیسات و ساختمان ها در سطح جزیره خارک، امکان پیاده سازی این روش در جزیره خارک وجود ندارد. علاوه بر این بنابر اظهار نظر دانشمندان صاحب نظر در تداخل سنجی رادار همچون دکتر Eric Fielding و دکتر Gareth Funning: " بدلیل وسعت کم جزیره در مقایسه با آب های اطراف و نبود خشکی و جزیره ای در اطراف آن، روش PS برای تصاویر منطقه خارک کارآیی

¹ Master

² Slave

لازم را نخواهد داشت" (Fringe Workshop, 2009). همچنین این محققین سایر روش های تداخل سنجی را به دلیل نوفه اتمسفری شدید در منطقه بی نتیجه می دانند.

۴-۱۸ سایر روش های موجود جهت افزایش همدوسی

روش دیگر استفاده از داده های ترازیبی منطقه است که در آن اختلاف میان مقادیر واقعی فرونشست و اندازه گیری های D-InSAR اولیه در نقاط ترازیبی با استفاده واریوگرام آنالیز می شوند و با استفاده از کریجینگ در نقاط دیگر (ترازیابی نشده) برآورد می گردند (Stein et.al.) و یا از داده های حاصل از اندازه گیری هایی که توسط GPS در منطقه انجام گرفته به منظور کاهش خطای تداخل سنجی استفاده می نمایند (Motagh et al., 2007). اما این روش ها نیز بدلیل انجام نشدن هیچگونه عملیات نقشه برداری و ترازیبی در منطقه قابل اجرا نمی باشند.

طبق مطالعات و بررسی های صورت گرفته در این پژوهش می توان به صراحت بیان نمود که مواردی همچون موقعیت جغرافیایی خاص و شرایط اقلیمی جزیره خارگ، قرارگیری آن در منطقه ای مملو از آب های گرم خلیج فارس، کوچکی جزیره، نبود خشکی و جزایر دیگر در اطراف آن، انجام نگرفتن روش های کالیبراسیون همچون ترازیبی در منطقه، به عنوان عوامل بازدارنده در تخمین میزان نوسانات سطحی این جزیره توسط تصاویر SAR عمل می نمایند. بدین ترتیب لازم است ضمن تأیید مندرجات این بخش از نظر علمی بر عدم کارآیی روش تداخل سنجی تفاضلی رادار در تخمین میزان تغییرات سطحی میدان مذکور با توجه به امکانات موجود اذعان نماییم.

همانطور که قبلاً اشاره گردید روش های دیگری را می توان جهت اندازه گیری و ارزیابی تراکم و فرونشست مخزن به کار برد. با توجه به عدم کارآیی روش تداخل سنجی راداری و نبود امکانات و داده های کافی در منطقه جهت پیاده سازی روش های دیگر، در فصل های بعدی از مدل سازی های ژئومکانیکی جهت ارزیابی فرونشست و تراکم مخزن، میدان درود استفاده خواهیم نمود.

فصل پنجم

مدل سازی تحلیلی تراکم و فرونشست مخزن

۵-۱ مقدمه

طی سالیان گذشته گروه Royal Dutch/Shell مطالعات ارزشمندی درباره پدیده تراکم مخزن و فرونشست میداین نفتی انجام دادند. این مطالعات شامل پروژه هایی تحقیقاتی به منظور مطالعه فرونشست میدان در مخازن نفتی Bolivar Coast واقع در ونزوئلا و همچنین بررسی مخزن بزرگ گازی Groningen در هلند بود (Geertsma, 1973a). جزئیات این مطالعات در مقالات متعددی منتشر شده است (Teeuw, 1973). Geertsma از نتایج این تحقیقات جهت بررسی مناطق در معرض فرونشست استفاده نمود. وی دلایل فرونشست در میداین هیدروکربوری را مورد توجه قرار داده و روشی تحلیلی جهت پیش بینی تراکم و فرونشست مخازن ارائه داد. بعدها فرمول های Geertsma توسط Reddish و همکارانش با روش تابع تاثیر ترکیب شد (Reddish et al, 1994). در این بخش جزئیات روش تحلیلی اصلاح شده Geertsma شرح داده شده و از این روش به منظور تخمین اندازه تراکم مخزن فلهلیان و فرونشست ناشی از آن در سطح، و بررسی رابطه این دو پدیده در میدان درود استفاده خواهد شد.

۵-۲ تخمین تراکم مخزن

تراکم مخزن یا کاهش در حجم مخزن، اصولاً در نتیجه کاهش ارتفاع مخزن می باشد. در صورتی که ابعاد جانبی مخزن در مقایسه با ارتفاع آن بزرگتر باشند، تغییر شکل غالب مخزن در جهت قائم خواهد بود. بنابراین تراکم مخزن در طول بهره برداری از مخزن را به راحتی می توان با کرنش قائم در مخزن ($\epsilon_z = dz/z$) توصیف نمود. این کرنش قائم تغییر در ارتفاع (نسبت به ارتفاع اولیه) را بیان می کند که به دلیل افزایش تنش مؤثر روی می دهد. افزایش تنش مؤثر، خود معلول کاهش در فشار منفذی، p ، تحت روباره ثابت می باشد. ضریب تراکم تک محوره، c_m ، را می توان به عنوان تراکم سازند به ازای هر واحد کاهش در فشار منفذی تعریف نمود (Geertsma, 1973a).

$$\epsilon_z = c_m d_p \quad \text{یا} \quad c_m = \frac{1}{z} \frac{dz}{dp} \quad (1-5)$$

رابطه بین c_m و دیگر پارامترهای تغییر شکل، مانند ضریب پواسون و تراکم پذیری بالک سنگ در ادامه شرح داده خواهد شد.

کاهش کلی در ارتفاع مخزن را می توان به صورت زیر بیان نمود

$$\Delta H = \int_0^H \int_{p_i}^{P_f} c_m(p, z) dp dz \quad (2-5)$$

بدلیل خاصیت طبیعی ساختار مخزن c_m معمولاً ثابت نبوده و تابعی از تنش مؤثر و اختلاف بین فشار اولیه و آینده مخزن می باشد. با این حال، در بسیاری از موارد تخصیص یک مقدار ثابت به ضریب تراکم برای دامنه فشاری که در طول دوره تولید غالب است، امکان پذیر است. تحت این شرایط می توان معادله قبل را به صورت زیر ساده نمود (Geertsma, 1973a)

$$\Delta H = \int_0^H c_m(z) \Delta p(z) dz \quad (3-5)$$

این فرمول ما را قادر به بررسی مجزای سه فاکتور مؤثر بر رفتار تراکم می سازد (۱) کاهش فشار مخزن (۲) ارتفاع قائم زونی که در آن کاهش فشار منفذی رخ می دهد (۳) مرتبه بزرگی پارامترهای تغییر شکل سنگ مخزن.

این بررسی اولیه نشان می دهد که افت زیاد فشار در سازندهای تحکیم نشده طی یک بازه زمانی بلند مدت (با یک سری از بازه های زمانی کوتاه مدت)، ممکن است منجر به تراکم شدید سنگ مخزن گردد. حتی در سنگ های سخت نیز با کاهش شدید فشار منفذی و در فواصل زمانی نسبتاً طولانی مدت، می توان انتظار تراکم قابل توجه مخزن را داشت.

واضح است که کاهش فشار مخزن به عنوان تابعی از مکان و زمان به عوامل متعددی همچون قابلیت تحرک^۱، حلالیت^۲، چگالی و تراکم پذیری سیال های منفذی و همچنین شرایط مرزی مخزن (گسل ها، آب لبه و یا کف سازند) بستگی دارد. مخازن گازی نسبت به مخازن نفتی رفتاری به مراتب

¹ Mobility
² Solubility

ساده تر و با پیچیدگی کمتری دارند. در بسیاری از موارد افت فشار در مخازن گازی از ابتدای دوره تولید تا انتهای آن بسیار ناچیز می باشد. در انواع دیگر مخازن هیدروکربور، بخصوص در مخازن گاز و نفت که تحت تأثیر گاز محلول می باشند، در یک مخزن گازی نرخ و درجه افت فشار منفذی بستگی به توزیع نفوذپذیری، مکان چاه های تولیدی و نسبت نرخ تولید به نرخ نفوذ آب به مخزن از انتها و کناره های مخزن دارد. امروزه شبیه سازی مخزن کمک بزرگی جهت پیش بینی توزیع فشار می باشد. پارامتر بسیار مهم جهت بررسی تراکم مخزن ضریب تراکم می باشد. ضریب تراکم بستگی به چند فاکتور از جمله نوع سنگ، درجه سیمانی شدن، تخلخل و عمق قرارگیری دارد. از نظر ژئومکانیک عاملی که تغییر شکل سنگ در ماسه سنگ ها را کنترل می کند، تعداد ناحیه های تماسی^۱ بین اجزای منفرد سنگ و بویژه اندازه و شکل این تماس ها (کنتاکت ها) است. در آهک ها نیز شکل و مقاومت^۲ ماتریکس سنگی، تغییر شکل پذیری سنگ را تعیین می نماید. تخلخل یکی از فاکتورهایی است که بسیار تحت تأثیر وضعیت این تماس های مکانیکی می باشد، و البته تنها فاکتور نیست. تنش مؤثر نیز از جمله عواملی است که بر تغییر شکل پذیری ماتریکس سنگ تأثیر می گذارد و با استفاده از رابطه غیر خطی تنش و کرنش محاسبه می شود.

۵-۲-۱ تعیین ضریب تراکم پذیری

دو روش برای تعیین دقیق ضریب تراکم پذیری سنگ مخزن وجود دارد: (۱) روش مستقیم: آزمایش ادیومتری یا K_0 ، این آزمایش همانند آزمایش تراکم سه محوره بوده با این تفاوت که همراه با افزایش تنش عمودی، تنش های افقی به نحوی افزایش می یابند که کرنش های جانبی نمونه صفر یا قابل چشم پوشی باشند. (۲) روش غیر مستقیم: قابلیت تراکم پذیری سنگ مخزن را بر اساس قانون هوک و با استفاده از خصوصیات الاستیسیته سنگ مخزن می توان به صورت زیر تعیین کرد

$$C_m = -\frac{1}{E_{fr}}(1 - 2\nu k) \quad (۴-۵)$$

^۱ Number of contact areas

^۲ Strength

در این رابطه C_m ضریب تراکم پذیری تک محوره، ν ضریب پواسون سنگ مخزن، E مدول یانگ سنگ مخزن و k ضریب مسیر تنش افقی مخزن می باشد. ضریب تراکم پذیری تک محوره بیان کننده میزان تراکم واحد ارتفاع سنگ مخزن به ازای واحد افت فشار است و بر حسب cm^2/kg یا $1/psi$ بیان می گردد.

ضریب مسیر تنش افقی را می توان بر اساس رابطه ارائه شده توسط Richart و Terzaghi (1952) برای سنگ مخزن سا لم و رابطه ارائه شده توسط Addis (1997) برای سنگ مخزن درزه دار به صورت زیر محاسبه نمود.

رابطه Richart و Terzaghi (1952)

$$k = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (5-5)$$

رابطه Addis (1997)

$$k = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (6-5)$$

در این رابطه φ زاویه اصطکاک داخلی سنگ مخزن می باشد. با استفاده از رابطه اول برای محاسبه ضریب مسیر تنش، تراکم مخزن و یا به عبارتی کاهش در ارتفاع آن را می توان به صورت زیر محاسبه نمود (Sroka, 2006 ; Holt, 1990)

$$\Delta h = \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{(1 - \nu)E} h \alpha \Delta p \quad (7-5)$$

در این رابطه ν ضریب پواسون، E مدول یانگ مخزن، Δp تغییرات فشار مخزن، h ضخامت زون مورد استخراج و α ضریب بیوت (یا پارامتر تنش مؤثر) است.

پایین ترین مقدار تراکم پذیری در ماسه سنگ، ضریب تراکم پذیری کوارتز خالص ($0.16 \times 10^{-5} cm^2/kg$) می باشد و پایین ترین حد تراکم پذیری برای سنگ آهک برابر با تراکم پذیری کلسیت یعنی ($0.08 \times 10^{-5} cm^2/kg$) است. می توان ماسه سنگ ها را بر اساس درجه

سیمانی شدنشان به صورت سخت^۱، تحکیم یافته^۲، ترد^۳ یا نیمه تحکیم یافته^۴ و ماسه سست، رده بندی نمود. با کاهش درجه سیمانی شدن، رفتار ماسه سنگ در حین تغییرشکل نیز به آهستگی از حالت الاستیک به حالت پلاستیک تغییر خواهد نمود. رفتار الاستیک، اساساً فرآیندی برگشت پذیر بوده و در طی باربرداری^۵ کاملاً بازگشت^۶ می نماید. اما تغییر شکل کاتاکلاستیک همراه با خرد شدن و شکستگی دانه بندی و سایر اجزای بدنه سازند همراه بوده و فرآیندی برگشت ناپذیر می باشد. این تغییر شکل ها در نقاطی ایجاد می شود که شدت بار وارد شده برابر با مقاومت بحرانی سازند است. تراکم و افزایش چگالی ایجاد شده در این نقاط پایدار خواهد بود. در عمل، تعیین نسبت تغییر شکل الاستیک به تغییر شکل کاتاکلاستیک بسیار مشکل است. تخلخل سنگ، از جمله پارامترهایی است که به آسانی قابل اندازه گیری می باشد. ماسه های سست تخلخلی در بازه ۴۰ تا ۴۵ درصد دارند. تخلخل ماسه های سخت معمولاً پایین است. حتی درون هر کدام از رده بندی های درجه سیمانی شدن، تخلخل سنگ نقش مهمی در تعیین ضریب تراکم خواهد داشت.

شکل های (۱-۵) و (۲-۵) نتایج تست های انجام شده بر روی تعداد زیادی مغزه ماسه سنگ می باشد. این تست ها تحت دو شرایط متفاوت بارگذاری انجام شده است (تنش وارد شده بر نمونه ها معادل با بار وارد شده بر سنگ در عمق های تقریباً ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ متری می باشد). به طریق مشابه، شکل های (۳-۵) و (۴-۵) نیز نتایج بدست آمده برای سنگ آهک می باشند. اشکال مشابهی توسط Newman برای ماسه سنگ و سنگ آهک، و توسط Sawabini و همکارانش برای ماسه های سست ارائه شده است (Geertsma, 1973b).

¹ Hard

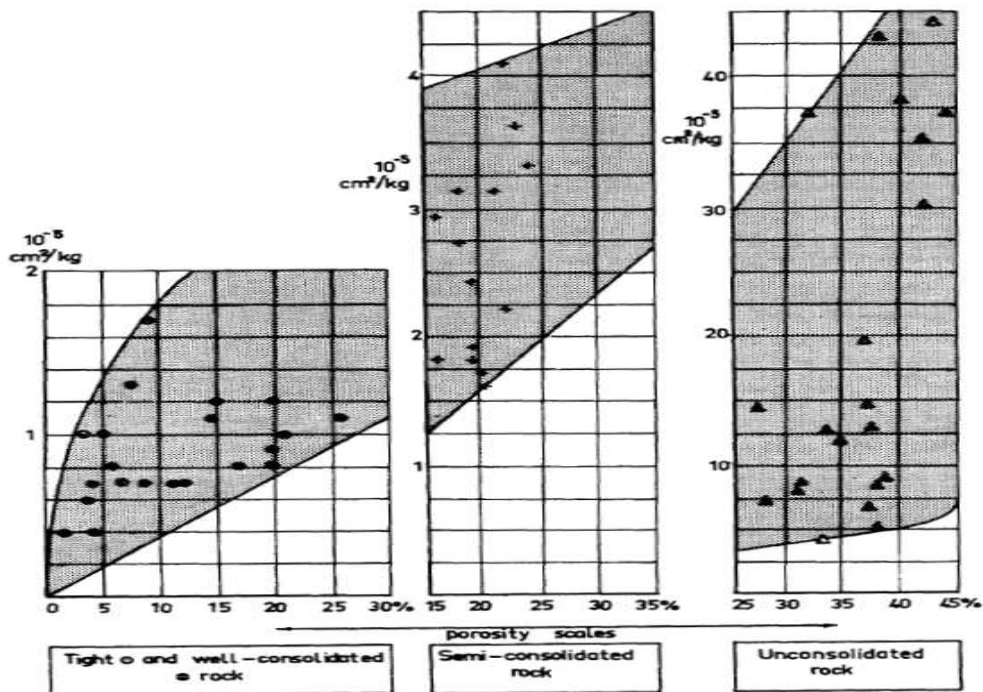
² Well consolidated

³ Friable

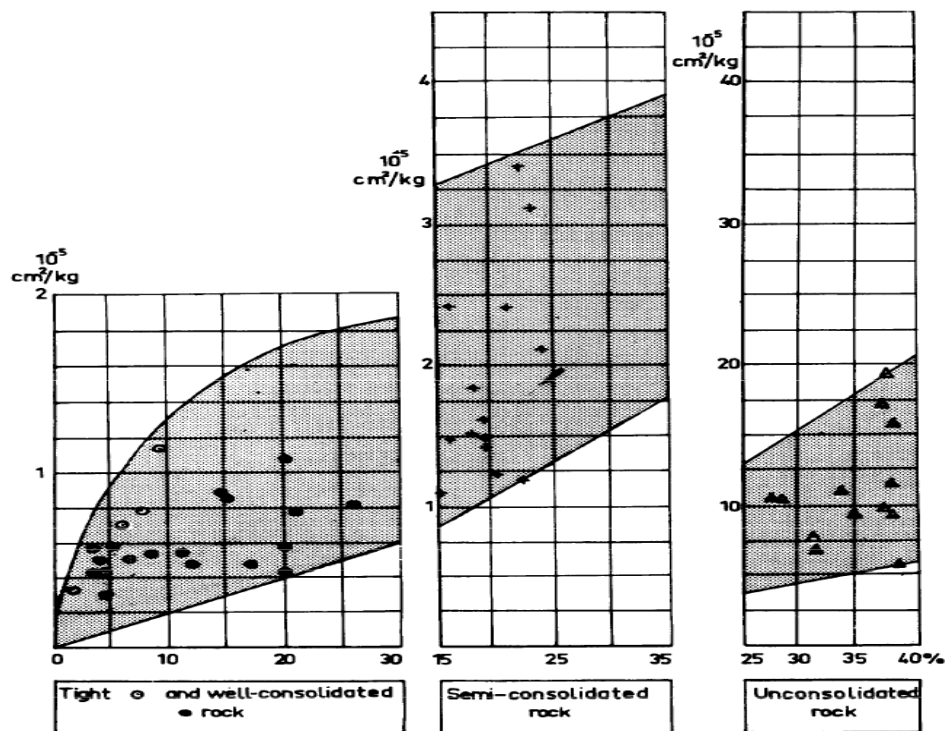
⁴ Semi consolidated

⁵ Unloading

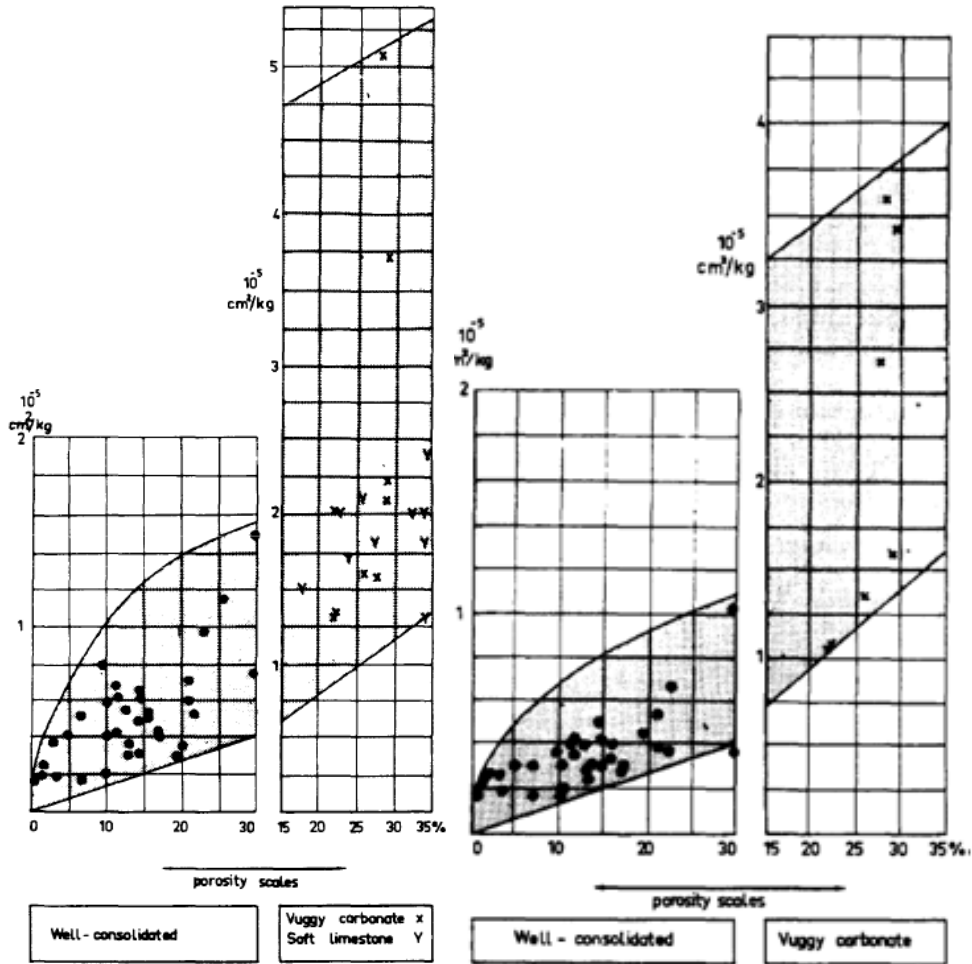
⁶ Rebound



شکل ۵-۱ ضریب تک محوره تراکم، c_m ، (محور قائم) برای مخازن ماسه سنگی که در عمق حدوداً ۱۰۰۰ متری واقع شده اند. دامنه تنش مؤثر قائم، c_z ، ۱۰۰ تا 200 kg/cm^2 می باشد (Geertsma, 1973b).



شکل ۵-۲ ضریب تراکم تک محوره، c_m ، (محور قائم) برای مخازن ماسه سنگی که در عمق حدوداً ۳۰۰۰ متری واقع شده اند. دامنه تنش مؤثر قائم، c_z ، ۳۰۰ تا 600 kg/cm^2 می باشد (Geertsma, 1973b).



شکل ۳-۵ ضریب تراکم تک محوره، c_m ، (محور قائم) برای مخازن کربناته که در عمق حدوداً ۳۰۰۰ متری واقع شده اند. دامنه تنش مؤثر قائم، c_z ، ۳۰۰ تا ۶۰۰ kg/cm^2 است (Geertsma, 1973b).

شکل ۴-۵ ضریب تراکم تک محوره، c_m ، (محور قائم) برای مخازن کربناته که در عمق حدوداً ۱۰۰۰ متری واقع شده اند. دامنه تنش مؤثر قائم، c_z ، ۱۰۰ تا ۲۰۰ kg/cm^2 است (Geertsma, 1973b).

به عنوان مثال کاربرد این اشکال و داده های بدست آمده از آنها در نهشته های ماسه سنگی دوره پلیوسن میدان گازی Groningen بررسی شده است (Geertsma, 1973a). سنگ مخزن این میدان نیمه تحکیم یافته است. عمق مخزن در حدود ۳۰۰۰ متر بوده و سنگ مخزن تحت تأثیر تنش مؤثر برجای در حدود ($300 kg/cm^2$) قرار دارد. با توجه به شکل (۲-۵) ضریب تراکم نسبتاً پایین و دارای مقداری بین ($1-3 \times 10^{-5} cm^2/kg$) می باشد. مخزن کوچکی با این نوع سنگ می تواند هر ضریب تراکمی داشته باشد. با این حال، با ترکیب ۳ فاکتور کاهش فشار، ارتفاع فاصله تولیدی و

ضریب تراکم می توان تراکمی در حدود ۵۰ تا ۱۵۰ سانتیمتر برای این مخزن پیش بینی نمود که مقدار قابل توجهی می باشد. چنانچه این آنالیز اولیه میزان تراکم قابل توجهی را پیش بینی نمود، ضروری است تا رابطه تراکم مخزن و فرونشستی که در نتیجه این تراکم ایجاد می شود به خوبی مطالعه گردد. در صورت ناچیز بودن مقدار بدست آمده، بررسی فرونشست مخزن ضرورت چندانی نخواهد داشت.

۵-۲-۲ محاسبه تراکم مخزن فهلیمان

گام اول در محاسبه تراکم مخزن فهلیمان، تعیین پارامترهای مورد نیاز می باشد. برخی از پارامترهای ژئومکانیکی مورد نیاز جهت مدل سازی های تحلیلی و عددی خروجی نرم افزار Rock Log می باشند. ورودی این نرم افزار، لاگ های صوتی، چگالی و گاما و ... می باشد (شکل ۵-۵). با استفاده از فایل las لاگ ها می توان پارامترهای الاستیک سنگ ها را در هر نقطه از چاه محاسبه نمود.

نرم افزار Rock Log فرمول ها و لاگ های زیر را برای بدست آوردن پارامترهای الاستیک استفاده می نماید.

E_d - (مدول دینامیک الاستیسیته یانگ)

$$E_s [psi] = \frac{\rho \left[\frac{gr}{cc} \right]}{\Delta t_s^2} \times \left[\frac{9\Delta t_s^2 - 6\Delta t_p^2}{3\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \right]$$

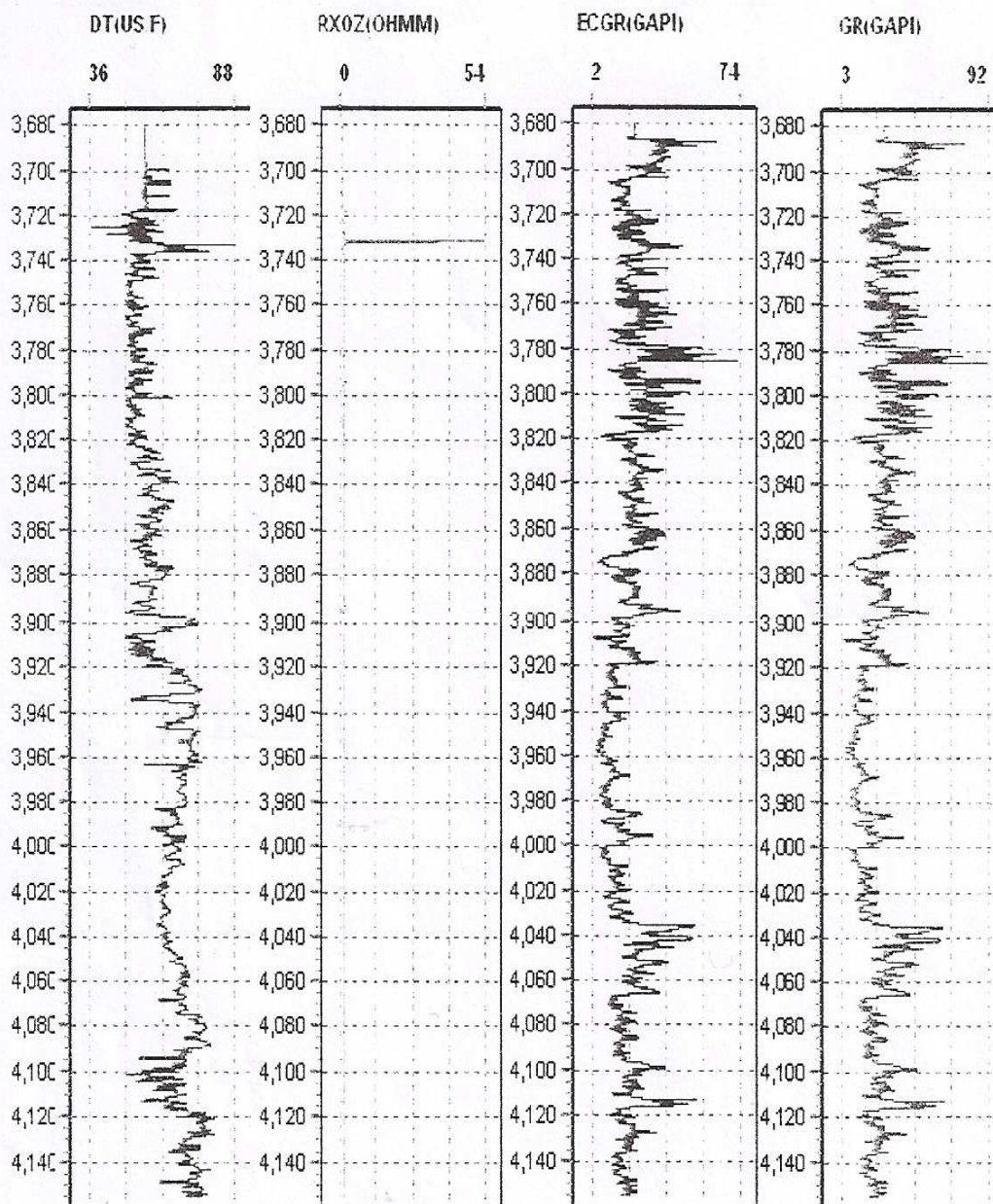
E_s - (مدول استاتیک الاستیسیته یانگ)

$$E_s = E_d / 2.5$$

ν - (ضریب پواسون)

$$\nu = 0.5 \times \left[\frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \right]$$

خروجی نرم افزار Rock Log در جداول (۵-۱) و (۵-۲) نمایش داده شده است.



شکل ۵-۵ لاگ های سونیک، دنسیتی و گاما ری. این لاگ ها ورودی نرم افزار Rocklog می باشند.

ضریب بیوت در کل مخزن برابر ۰,۷ محاسبه گردیده است. این مخزن بین سال های ۱۹۶۴ تا ۲۰۰۷ ضریب فشاری معادل با ۲۱۳۴ psi را تجربه نموده است. سازند های یاماما و منیفا، بخش های اصلی مخزن فهلیان میدان درود می باشند، ضخامت، خصوصیات مکانیکی و کاهش ارتفاع لیتوفاسیس ها در اثر استخراج هیدروکربن بین سال های ۱۹۶۴ تا ۲۰۰۷ میلادی در جدول ۳ نمایش داده شده است

جدول ۱-۵ مقدار کمینه و بیشینه پارامترهای الاستیک سازند های مخزن فهلیان - میدان نفتی درود

ضریب پواسون		مدول یانگ (psi)		Bottom(m)	Top(m)	لایه ها
Max	Min	Max	Min			
۰,۳۷	۰,۳۷	۹۶۲۲۹۰,۲	۹۶۲۲۹۰,۲	۳۶۸۲	۳۶۰۶	L.Gadvan
۰,۴۲	۰,۳۶	۱۲۱۰۹۴۶	۶۷۱۶۰۴,۵	۳۷۳۶	۳۶۸۲	L.Ratawi
۰,۴۲	۰,۳۵	۱۱۵۶۸۶۴	۸۱۰۱۸۷,۲	۳۸۱۷	۳۷۳۶	Khami
۰,۴۲	۰,۲۵	۱۰۹۸۳۷۵	۶۶۳۰۸۰,۹	۳۹۱۸	۳۸۱۷	U.Yamama
۰,۴۰	۰,۲۲	۱۰۴۶۳۵۱	۴۵۹۹۸۳	۴۱۱۶	۳۹۱۸	M.Yammama
۰,۳۴	۰,۲۲	۷۱۷۷۴۹,۸	۴۳۷۰۵۷,۳	۴۱۷۱	۴۱۱۶	Manifa
۰,۴۱	۰,۲۳	۸۸۷۷۸۱	۵۱۴۷۹۸,۸	۴۲۱۳	۴۱۷۱	Hith

جدول ۲-۵ متوسط پارامترهای الاستیک سازند های مخزن فهلیان - میدان درود

متوسط ضریب پواسون	متوسط مدول یانگ (psi)	سازند
۰,۳۷۳	۹۶۲۲۹۰,۲	L.Gadvan
۰,۳۷۲۶	۹۲۵۸۴۴,۳	L.Ratawi
۰,۳۸۶	۱۰۰۴۱۷۴	Khami
۰,۳۶۳	۸۷۵۳۷۸,۴	U.Yamama
۰,۳۰۱	۶۳۷۰۶۹	M.Yamama
۰,۲۵۳۵	۵۵۸۵۹۲,۷	Manifa
۰,۲۷۸۱	۸۳۳۷۰۰,۷	Hith

جدول ۳-۵ خصوصیات مکانیکی و تراکم کل لیتوفاسیس های مخزن بین سال های ۱۹۶۴ تا ۲۰۰۷

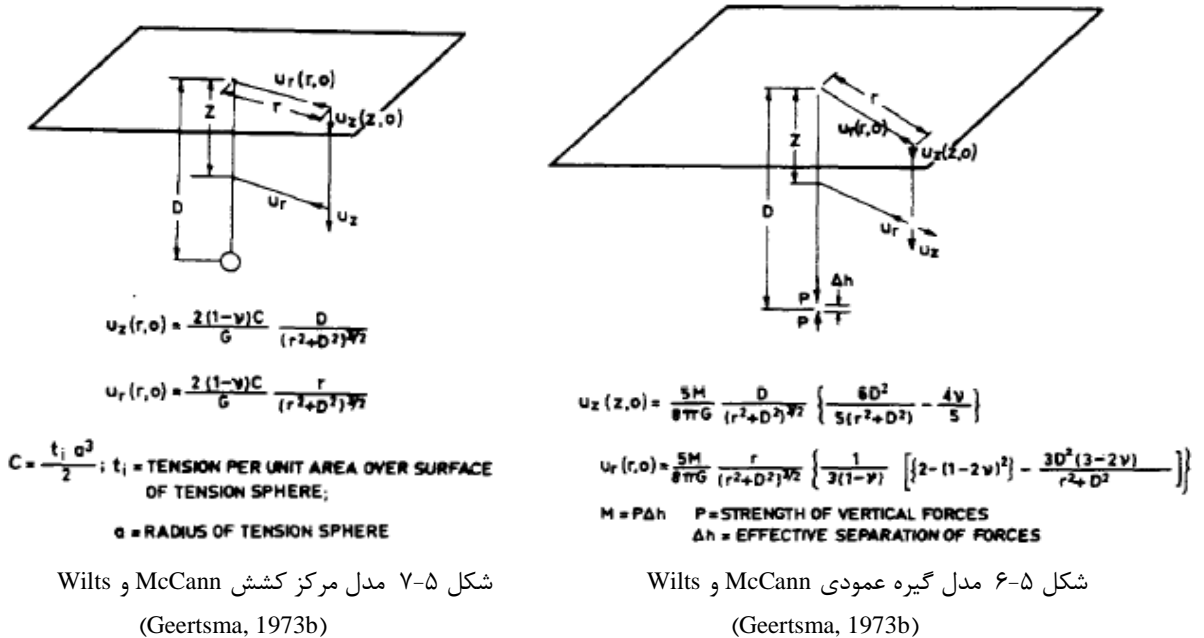
سازند مخزن	ضخامت (ft)	مدول یانگ (psi)	ضریب پواسون	α	Δh (ft)
U.Yamama	۳۳۱,۳۶۵	۸۷۵۳۷۸,۴	۰,۳۶۳	۰,۷	۰,۳۳۱
M.Yamama	۶۴۹,۶۰۶	۶۳۷۰۶۹	۰,۳۰۱	۰,۷	۱,۱۲۵
Manifa	۱۸۰,۴۴۶	۵۵۸۵۹۲,۷	۰,۲۵۳۵	۰,۷	۰,۴۱۰

بر اساس جدول (۳-۵) کاهش ارتفاع کل مخزن بین سال های ۱۹۶۴ تا ۲۰۰۷، برابر با ۱,۸۶۶ فوت یا ۰,۵۶۹ متر و نرخ سالانه تراکم ۰,۰۱۳۲ متر می باشد.

۳-۵ رابطه بین تراکم مخزن و فرونشست سطح میدان

اولین تلاش به منظور آنالیز ریاضی فرونشستی که در نتیجه تخلیه نفت مخزن ایجاد می شود، توسط McCann و Wills صورت گرفت (McCann and Wills, 1951). هدف مطالعه آنها فهم بهتر

رفتار فرونشست در میدان نفتی Wilmington بود. این محققین نتایج دو مدل مختلف را که بر اساس مکانیک محیط های پیوسته و الاستیک می باشند، بررسی کردند. این مدل ها به ترتیب به نام های مرکز کشش^۱ و گیره عمودی^۲ می باشند و در شکل های (۵-۶) و (۵-۷) نمایش داده شده اند. بنابر اظهارات این محققین مدل مرکز کشش رفتاری شبیه به رفتار میدان نمایش می دهد، در حالی که مدل گیره عمودی رفتاری دور از واقعیت دارد. Geertsma در مقاله خود مدعی شد که این محققین اگرچه رفتار نزدیک به واقعیت مدل مرکز کشش را نشان دادند، اما تحقیق خود را در مسیر درستی ادامه ندادند و نتوانستند دلیلی برای این شباهت به رفتار طبیعی مخزن ارائه دهند و به جای آن تخمینی از رفتار آینده فرونشست ارائه دادند که براساس ترکیب غیر واقعی این مراکز کشش می باشد (Geertsma, 1973b).



این مسئله بایستی به صورت مکانیکی و به عنوان حجم ایزوله ای از کاهش فشار منفذی درون یک نیم فضای^۳ متخلخل و یا غیر متخلخل که به صورت الاستیک تغییر شکل می یابد و دارای سطحی

¹ Tension center
² Vertical pincer
³ Half-space

فاقد کشش^۱ است، بررسی گردد. جابجایی در این میدان و سطح آزاد آن به صورت پیوسته می باشد. نتایج انقباض و تراکم اذخال درون ذرات (سیال منفذی) حاکی از آن است که: کاهش فشار منفذی باعث افزایش تنش مؤثر وارد بر ماتریکس سنگ و سیال درون منافذ آن خواهد شد. در این شرایط ما می خواهیم برهمکنش بین هسته در حال انقباض و محیط اطرافش که در تماس با یکدیگرند را مشخص نماییم. این برهمکنش را می توان با استفاده از تئوری پروالاستیسیته محاسبه نمود که در بعضی موارد به نادرست تئوری تحکیم نامیده می شود. این تئوری به لحاظ ریاضی شبیه به ترموالاستیسیته می باشد. برخی از محققین در گذشته این شباهت ها را تشریح نموده اند. این مسأله پروالاستیک با استفاده از مفهوم هسته کرنش^۲ در نیم فضا که توسط Mindlin و Chen (1950) و به طور جداگانه توسط Sen (1950) معرفی شده است، به راحتی آنالیز می گردد. با استفاده از این مفهوم و نتایج آن، فرونشست یا جابجایی قائم نسبت به سطح آزاد، بدلیل هسته کرنش حجم محدود و

کوچک، V ، تحت تأثیر کاهش فشار منفذی، Δp ، برابر خواهد بود با

$$u_z(r,0) = -\frac{1}{\pi} c_m (1-\nu) \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}} \Delta p V \quad (۸-۵)$$

پارامترهای الاستیک استفاده شده در این رابطه عبارتند از: ضریب تراکم تک محوره، c_m ، ونسبت پواسون، ν . همچنین در این رابطه D عمق دفن هسته کرنش است و r فاصله شعاعی از محور قائم هسته می باشد.

در صورتی که امکان جابجایی افقی سطح در محل مورد مطالعه وجود داشته باشد، می توان با

استفاده از رابطه زیر مقدار آن را مشخص نمود

$$u_r(r,0) = +\frac{1}{\pi} c_m (1-\nu) \frac{r}{(r^2 + D^2)^{3/2}} \Delta p V \quad (۹-۵)$$

¹ Traction-free surface

² Nucleus-of-strain

صرف نظر از ثابت تناسب که در این فرمول مفهوم فیزیکی مشخصی دارد، این عبارت شبیه مدل مرکز کشش McCann و Wilts می باشد. همچنین این عبارت تابع نسبت جابجایی افقی به جابجایی قائم سطح یعنی r/D می باشد.

نتایج مفهوم هسته کرنش را به چند طریق می توان برای مدل نمودن شرایط مخازن واقعی استفاده کرد. برای مخازن دیسک شکل با ضخامت h و شعاع R ، که در عمق D واقع شده و کاهش فشار یکنواخت Δp را تجربه می کند، با استفاده از مدل هسته کرنش می توان به نتایج قابل قبولی دست یافت (Geertsma, 1966). Poggi و Evangelisti این اشکال را با جزئیات بیشتری بررسی نموده اند (Evangelisti and Poggi, 1970). برای اینکه محاسبات نسبتاً ساده تری داشته باشیم، اولاً فرض می شود که پارامترهای تغییر شکل مخزن و سازندهای اطرافش همگن هستند، ثانیاً ضریب تک محوره تراکم، c_m ، و ضریب پواسون ν ، در کل نیم فضا ثابت فرض می شود. با کمک این فرضیات، فرونشست مخزن دیسک شکل با اعمال حل هسته ای بر کل حجم مخزن، قابل محاسبه می باشد. معادله (۸-۵) را می توان به صورت زیر نوشت (Geertsma, 1973a).

$$u_z(r,0) = -2c_m(1-\nu)\Delta ph R \int_0^{\infty} e^{-Da} J_1(\alpha R) J_0(\alpha r) d\alpha \quad (10-5)$$

و به طریق مشابه معادله (۹-۵) را به صورت زیر می نویسیم

$$u_r(r,0) = +2c_m(1-\nu)\Delta ph R \int_0^{\infty} e^{-Da} J_1(\alpha R) J_1(\alpha r) d\alpha \quad (11-5)$$

که J_0 و J_1 به ترتیب توابع Bessel مرتبه صفر و یک می باشند. مقادیر عددی این انتگرال های Hankel-Lipschitz توسط Eason گزارش شده است. با معرفی نسبت های بدون بعد $\rho = r/R$ و $\eta = D/R$ معادلات بالا را به صورت زیر می نویسیم (Geertsma, 1973a).

$$u_z(r,0) = -2c_m(1-\nu)\Delta ph A(\rho, \eta)$$

$$u_r(r,0) = +2c_m(1-\nu)\Delta ph B(\rho, \eta)$$

می توان از جداول (۴-۵) و (۵-۵) که در آنها پارامترهای A و B به ازای مقادیر مشخص ρ و η محاسبه شده استفاده نمود.

ردیف اول جدول (۴-۵)، $(A = A(0, \eta))$ را می توان با استفاده از فرمول ساده زیر بیان نمود

$$u_z(0,0) = -2c_m(1-\nu)\Delta ph\left(1 - \frac{\eta}{\sqrt{1+\eta^2}}\right)$$

جدول ۴-۵ مقدار عبارت $A = R \int_0^{\infty} J_1(\alpha R) J_0(\alpha r) e^{-D\alpha} d\alpha$ به ازای مقادیر $\rho = r/R$ و $\eta = D/R$

(Geertsma, 1973b)

ρ	η											
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	3.0
0.0	1.0000	0.8039	0.6286	0.4855	0.3753	0.2929	0.2318	0.1863	0.1520	0.1258	0.1056	0.0513
0.2	1.0000	0.7983	0.6201	0.4771	0.3683	0.2876	0.2279	0.1835	0.1500	0.1244	0.1045	0.0510
0.4	1.0000	0.7789	0.5924	0.4508	0.3473	0.2720	0.2167	0.1754	0.1442	0.1202	1.1014	0.0502
0.6	1.0000	0.7349	0.5377	0.4043	0.3124	0.2470	0.1989	0.1628	0.1351	0.1135	0.0965	0.0488
0.8	1.0000	0.6301	0.4433	0.3368	0.2658	0.2147	0.1762	0.1465	0.1234	0.1049	0.0901	0.0470
1.0	0.5000	0.3828	0.3105	0.2559	0.2130	0.1787	0.1510	0.1286	0.1102	0.0951	0.0827	0.0449
1.2	0.0000	0.1544	0.1871	0.1795	0.1621	0.1433	0.1257	0.1103	0.0965	0.0848	0.0748	0.0424
1.4	0.0000	0.0717	0.1101	0.1216	0.1197	0.1120	0.1024	0.0925	0.0831	0.0744	0.0667	0.0398
1.6	0.0000	0.0400	0.0682	0.0829	0.0876	0.0865	0.0824	0.0768	0.0707	0.0646	0.0589	0.0370
1.8	0.0000	0.0249	0.0449	0.0580	0.0647	0.0668	0.0659	0.0633	0.0597	0.0557	0.0516	0.0343
2.0	0.0000	0.0168	0.0312	0.0418	0.0485	0.0519	0.0528	0.0520	0.0502	0.0477	0.0450	0.0315
3.0	0.0000	0.0042	0.0082	0.0118	0.0149	0.0174	0.0193	0.0207	0.0216	0.0221	0.0222	0.0198

جدول ۵-۵ مقدار عبارت $B = R \int_0^{\infty} J_1(\alpha R) J_1(\alpha r) e^{-D\alpha} d\alpha$ به ازای مقادیر $\rho = r/R$ و $\eta = D/R$

(Geertsma, 1973b)

ρ	η											
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	3.0
0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.2	0.1015	0.0954	0.0804	0.0628	0.0472	0.0350	0.0259	0.0194	0.0147	0.0113	0.0089	0.0032
0.4	0.2134	0.1979	0.1622	0.1238	0.0917	0.0675	0.0500	0.0375	0.0285	0.0220	0.0173	0.0062
0.6	0.3530	0.3163	0.2443	0.1789	0.1298	0.0949	0.0703	0.0529	0.0405	0.0314	0.0248	0.0090
0.8	0.5721	0.4573	0.3151	0.2197	0.1570	0.1147	0.0854	0.0648	0.0500	0.0391	0.0311	0.0117
1.0	∞	0.5456	0.3422	0.2355	0.1693	0.1252	0.0945	0.0726	0.0567	0.0448	0.0359	0.0139
1.2	0.5235	0.4278	0.3072	0.2237	0.1666	0.1265	0.0976	0.0764	0.0605	0.0485	0.0393	0.0158
1.4	0.3293	0.3026	0.2482	0.1958	0.1535	0.1208	0.0958	0.0766	0.0619	0.0504	0.0414	0.0174
1.6	0.2338	0.2228	0.1962	0.1650	0.1358	0.1110	0.0907	0.0743	0.0611	0.0506	0.0422	0.0185
1.8	0.1767	0.1711	0.1566	0.1377	0.1180	0.0997	0.0838	0.0703	0.0590	0.0496	0.0420	0.0194
2.0	0.1390	0.1358	0.1272	0.1152	0.1018	0.0885	0.0762	0.0653	0.0559	0.0478	0.0410	0.0199
3.0	0.0580	0.0576	0.0562	0.0541	0.0514	0.0483	0.0449	0.0414	0.0380	0.0346	0.0314	0.0190

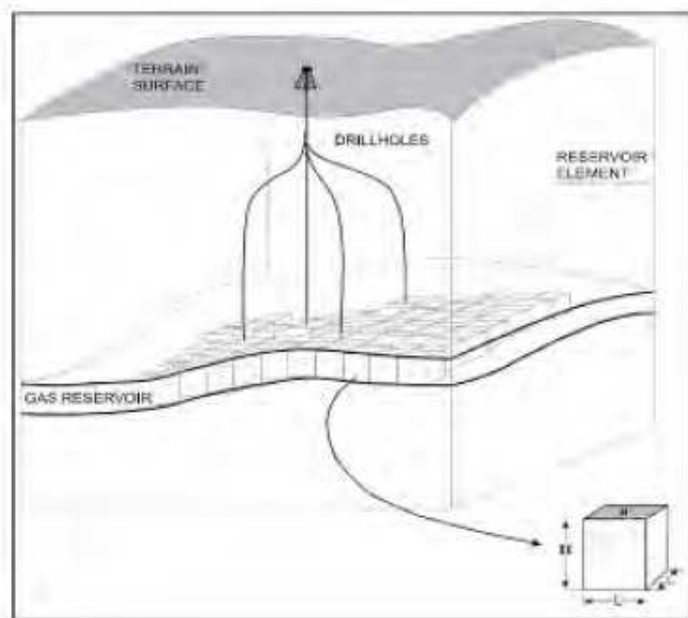
۴-۵ ترکیب مفهوم هسته کرنش با روش تابع تأثیر

برای بررسی فرونشست مخازنی که به طور کامل دیسک شکل نیستند و هندسه نامنظمی دارند، Reddish و همکارانش (1994) از ترکیب روش تابع تأثیر با مفهوم هسته کرنش استفاده کردند. برای اجرای این روش، آنها مخزن را به اجزاء مکعبی به ارتفاع h و سطح مقطع a تقسیم نمودند. در این روش هر یک از اجزاء، ویژگی های مکانیکی خود را دارا بوده و تأثیر مربوط به خود را بر فرونشست سطح دارند (شکل ۵-۸).

بنابراین فرونشست ایجاد شده در سطح میدان ناشی از تراکم هر یک از این اجزاء را می توان با

استفاده از رابطه زیر تعیین نمود

$$\Delta S = K \times \Delta V \quad (12-5)$$



شکل (۸-۵) مخزن هیدروکربور تقسیم شده به المان های مکعبی شکل (Sroka and Hejmanowski, 2006)

در این رابطه S فرونشست ایجاد شده، K تابع تأثیر و ΔV کاهش حجم المان می باشد. از آنجایی که تراکم مخزن به صورت تک محوره فرض می گردد در حین تراکم، سطح مقطع المان ثابت باقی مانده و فقط ارتفاع آن کاهش می یابد. بنابراین کاهش حجم المان برابر است با

$$\Delta V = a \times \Delta h \quad (13-5)$$

که در آن Δh کاهش ارتفاع مخزن است. با توجه به معادله (۸-۵) تابع تأثیر به صورت زیر می باشد

$$K_z = \frac{1-\nu}{\pi} \cdot \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}} \quad (14-5)$$

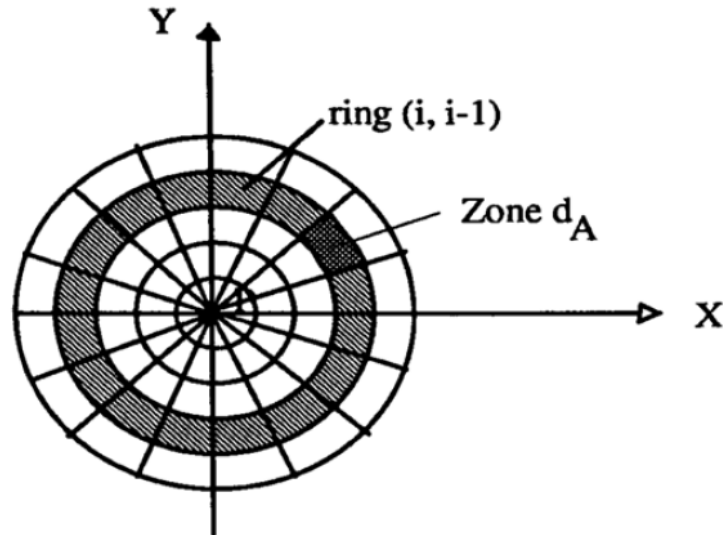
در این رابطه D عمق مخزن، r فاصله شعاعی تا محور میانی المان و ν ضریب پواسون سنگ روباره مخزن می باشد. با جایگزین کردن معادلات (۱۳-۵) و (۱۴-۵) در معادله (۱۲-۵)، معادله زیر حاصل می گردد.

$$dS = \Delta h \frac{1-\nu}{\pi} \cdot \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}} da \quad (15-5)$$

برای تعیین فرونشست ناشی از تراکم کل مخزن کافی است از معادله فوق روی کل سطح مخزن انتگرال گرفته شود. بنابراین خواهیم داشت

$$dS = \Delta h \iint_A \frac{1-\nu}{\pi} \cdot \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}} da \quad (16-5)$$

در این رابطه A مساحت کل میدان می باشد. در این جا نیز برای حل انتگرال مخزن را دارای شکل هندسی منظمی فرض می کنیم تا انتگرال گیری روی سطح آن امکان پذیر شود. مخزن را دیسکی شکل در نظر گرفته و سطح مخزن را به منطقه های حلقوی تقسیم می کنیم (شکل ۵-۹).



شکل (۵-۹) مناطق حلقوی و قسمت های تقسیم شده توسط خطوط شعاعی (Reddish et al, 1994)

سپس انتگرال فوق را برای منطقه حلقوی از شعاع r_{i-1} تا شعاع r_i محاسبه می کنیم (Reddish et al, 1994)

$$K(i) = \frac{S}{\Delta h} = 2(1-\nu) \left(\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{r_{i-1}}{D}\right)^2 + 1}} - \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{r_i}{D}\right)^2 + 1}} \right) \quad (17-5)$$

هر منطقه توسط خطوط شعاعی به قسمت های مساوی تقسیم می گردد. قسمت های واقع شده روی یک منطقه حلقوی با توجه به فاصله برابر آنها از نقطه مرکزی دارای ضریب تأثیر مساوی می باشند.

ضریب تأثیر هر یک از قسمت های واقع شده بر روی یک منطقه حلقوی برابر است با

$$K(zi) = \frac{K(i)}{N_{zi}} \quad (18-5)$$

نهایتاً می توان فرونشست میدان را با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود

$$S = \Delta h \sum K(zi) \times N(i) \quad (19-5)$$

در این رابطه $N(i)$ تعداد قسمت های منطبق شده از حلقه i ام با مخزن می باشد.

در محاسبه ضریب تأثیر باید شرط زیر برقرار باشد (Whittaker and Reddish, 1989)

$$\iint_{A_0} K_z dA = 1$$

که در آن A_0 مساحت کل دایره تأثیر است. چنانچه شعاع دایره تأثیر باشد، با جایگذاری معادله

(14-5) در معادله بالا خواهیم داشت

$$\int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{1-\nu}{\pi} \frac{D}{(r^2 + D^2)^{3/2}} r dr d\theta = 1$$

با حل معادله بالا، اندازه شعاع دایره تأثیر با استفاده از رابطه زیر بدست می آید

$$R = 3.354D \quad (20-5)$$

که در آن D عمق مخزن است (Reddish et al, 1994).

۵-۵ محاسبه فرونشست سطح میدان درود

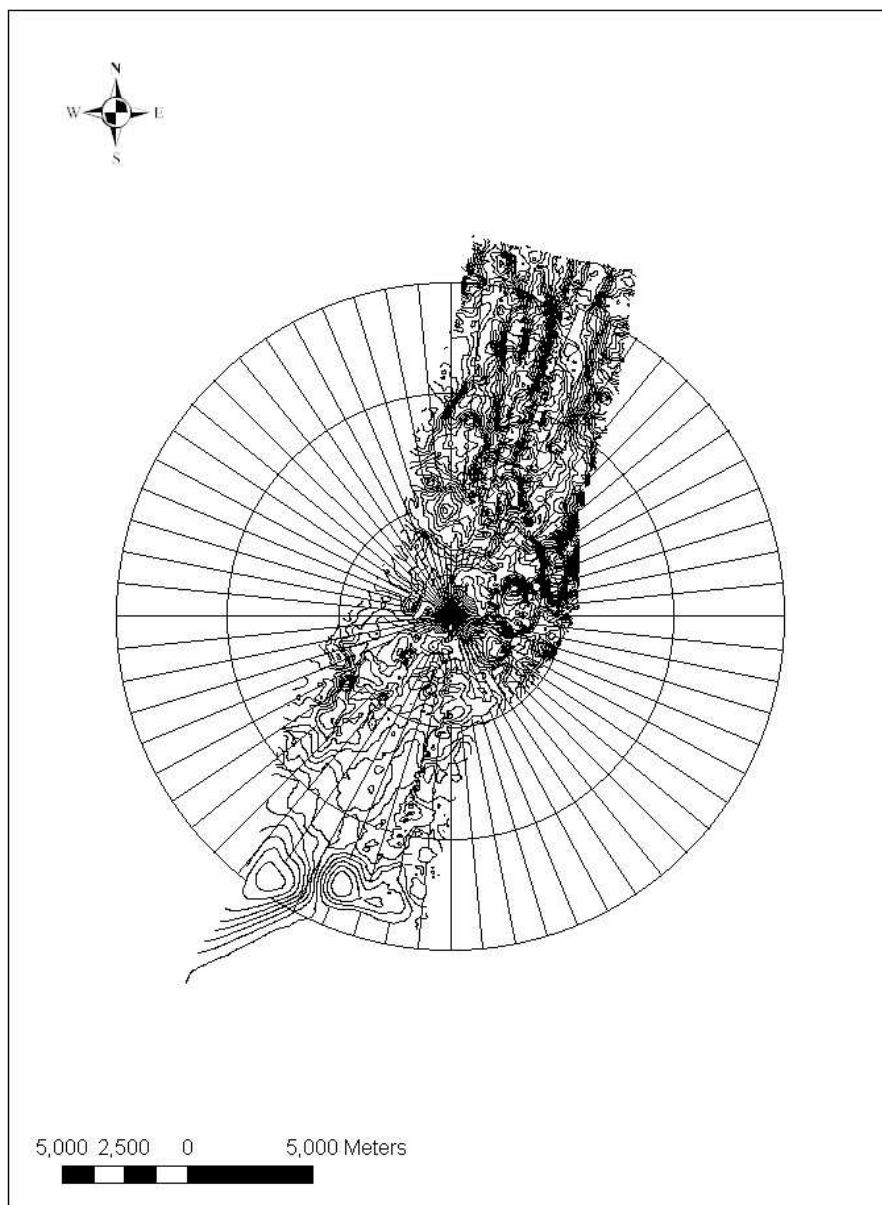
با توجه به هندسه خاص مخزن فلهلیان و شکل غیر مدور آن، بکارگیری روش هسته کرنش به تنهایی، پاسخی دقیق در محاسبه فرونشست میدان بدست نخواهد داد. بنابراین جهت محاسبه فرونشست این

میدان از ترکیب روش تابع تأثیر با روش هسته کرنش استفاده می گردد.

جهت محاسبه ضریب تأثیر تراکم مخزن بر فرونشست سطح، در این مطالعه از شبکه ای شامل ۳ منطقه حلقوی استفاده گردیده است. هر یک از این مناطق نیز خود به ۶۴ قسمت تقسیم شده اند.

میانگین عمق مخزن (D) برابر با ۳,۹۶ کیلومتر است. با استفاده از رابطه (20-5) شعاع دایره تأثیر

برابر با ۱۳,۲۸۱ کیلومتر محاسبه می شود. سنگ روبراه به صورت همگن و دارای ضریب پواسونی برابر با ۰,۳۷۷۲ در نظر گرفته شده است. شکل (۵-۱۰) مخزن فهلپان را که بر شبکه مذکور منطبق گردیده است، نشان می دهد. شکل مخزن، بر گرفته از نقشه آیزوپک مخزن فهلپان می باشد که محدوده آن را به خوبی مشخص می نماید.



شکل ۵-۱۰ مخزن فهلپان منطبق شده با شبکه تأثیر

بدین ترتیب با استفاده از این شبکه تأثیر، میزان تأثیر تراکم مخزن بر نقطه ای از سطح میدان که بر مرکز شبکه منطبق شده است، محاسبه می شود. در شکل (۵-۱۰) شبکه تأثیر بر نقطه مرکزی مخزن منطبق شده است تا فرونشست را در قسمتی از سطح میدان که دقیقاً بر روی این نقطه واقع شده (نقطه P)، محاسبه نماید. این نقطه در جنوب غربی جزیره خارگ و درون آب های خلیج فارس واقع گردیده و دارای مختصات $X = 2014250$ و $Y = 814666$ می باشد (شکل ۵-۱۱). در این حالت و برای این نقطه، ضرایب تأثیر هر یک از حلقه ها و تعداد قسمت های منطبق شده با مخزن فهلیان، مطابق با جدول (۵-۶) است.

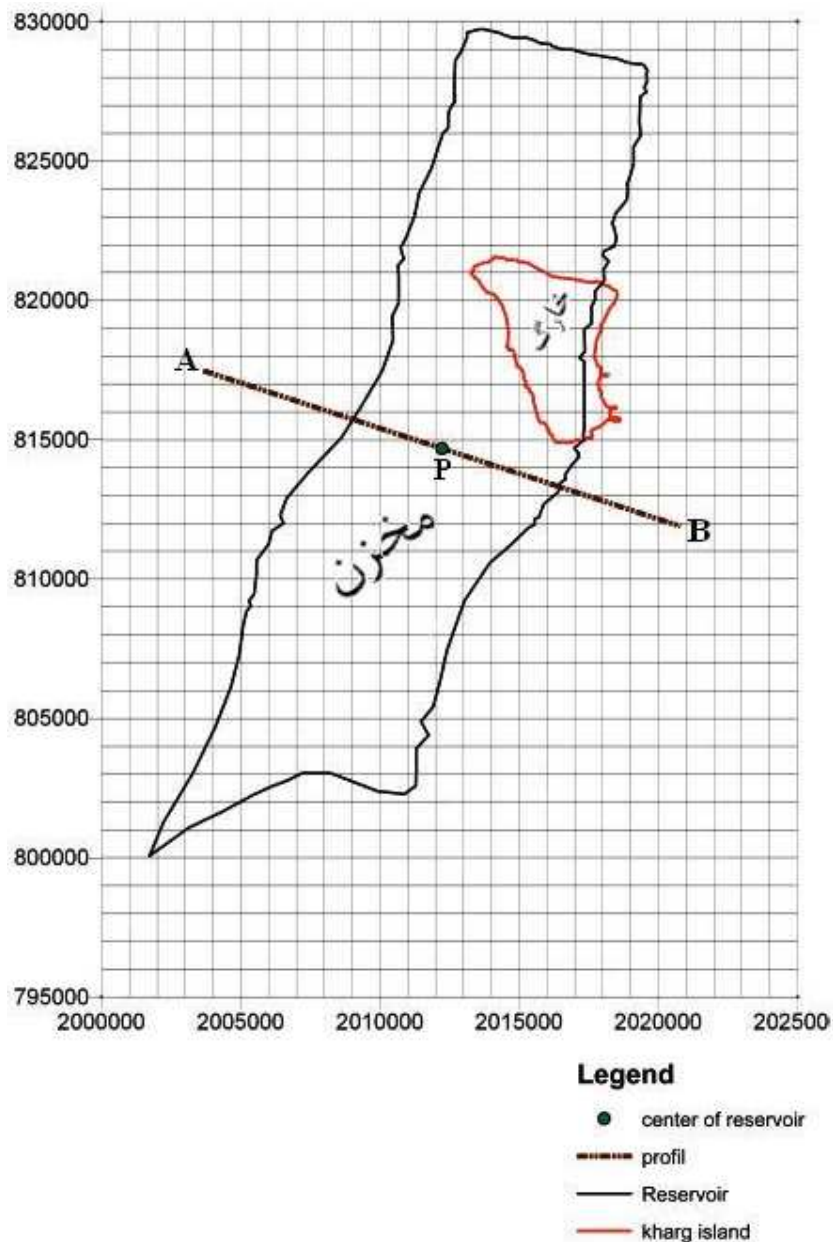
جدول ۵-۶ به ترتیب ضریب تأثیر حلقه ها k_i ، تعداد قسمت های منطبق شده با مخزن N_i ، تعداد قسمت های هر حلقه N_{zi} و ضریب تأثیر هر قسمت از حلقه k_{zi} و ضریب تأثیر قسمت های منطبق شده با مخزن $K_{zi} \times N_i$

حلقه	K_i	N_i	N_{zi}	K_{zi}	$K_{zi} \times N_i$
۱	۰,۴۱۵۱۸۶	۶۰	۶۴	۰,۰۰۶۴۸۷	۰,۳۸۲۷
۲	۰,۳۲۱۸۸۷	۲۲	۶۴	۰,۰۰۵۰۲۹	۰,۱۱۰۶
۳	۰,۱۵۲۶۳۱	۱۲	۶۴	۰,۰۰۲۳۸۵	۰,۰۲۸۶

با توجه به جدول (۵-۶) مجموع $K_{zi} \times N_i$ ها برابر با ۰,۵۲۸۵ می باشد. با استفاده از رابطه (۵-۱۹) مقدار فرونشست ناشی از تراکم مخزن فهلیان، بر حسب سانتی متر، در سطح میدان درود برابر است با

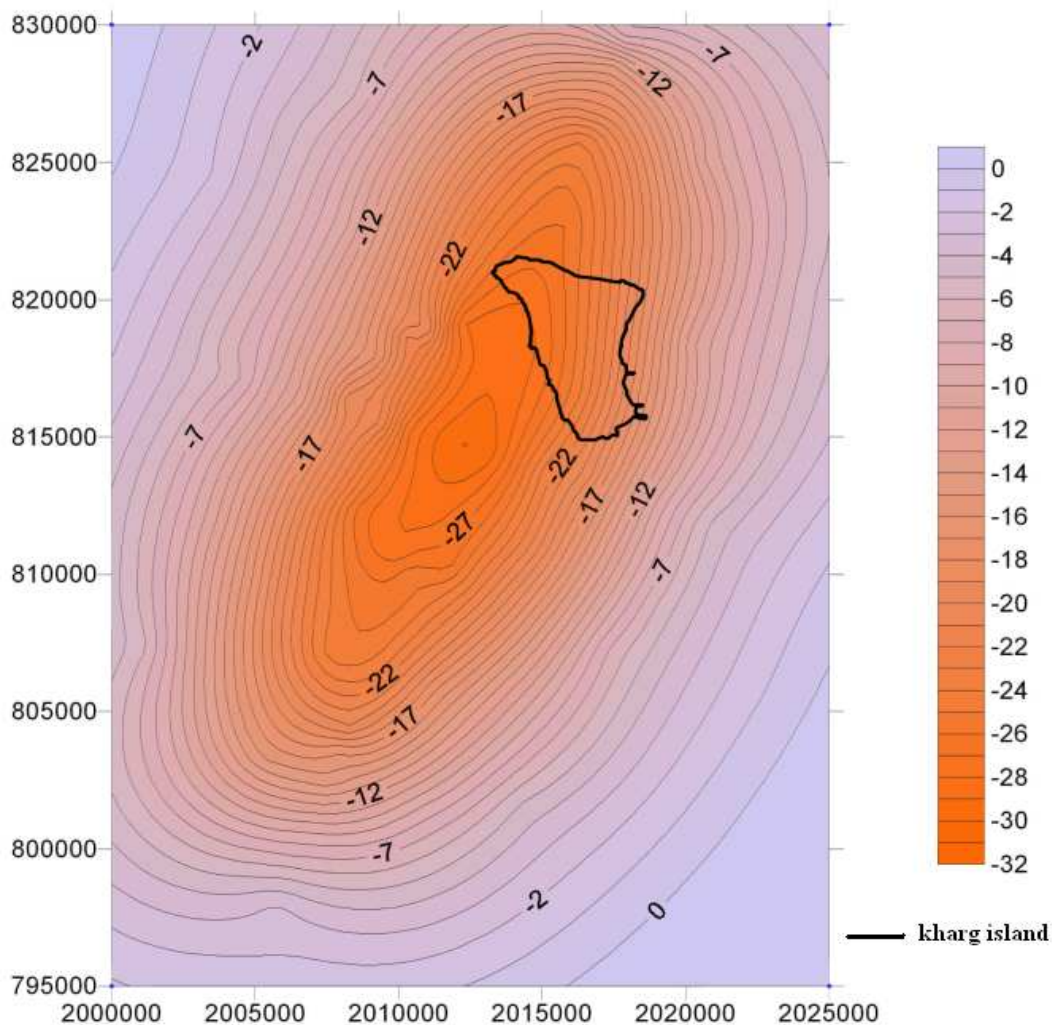
$$S = \Delta h \sum K(Z_i) \times N(i) = 0,5285 \times 56,9 = 30,07$$

نقشه تغییرات ارتفاعی میدان، با تغییر مکان شبکه تأثیر بر روی سطح میدان بدست خواهد آمد. به طریق مشابه با نقطه P، میزان فرونشست میدان در هریک از نقاط تقاطع شبکه نمایش داده شده در شکل (۵-۱۱) محاسبه می گردد. همچنین فرونشست میدان در امتداد پروفیلی که در جهت شمال غربی - جنوب شرقی (پروفیل A-B) رسم شده است، محاسبه می گردد. این پروفیل در جهت عمود بر بزرگترین قطر میدان رسم شده و از مرکز میدان عبور می کند. پروفیل مورد نظر نقطه A با مختصات $X = 2003681$ ، $Y = 817464$ را به نقطه B با مختصات $X = 2020806$ ، $Y = 811897$ وصل می کند (شکل ۵-۱۱).



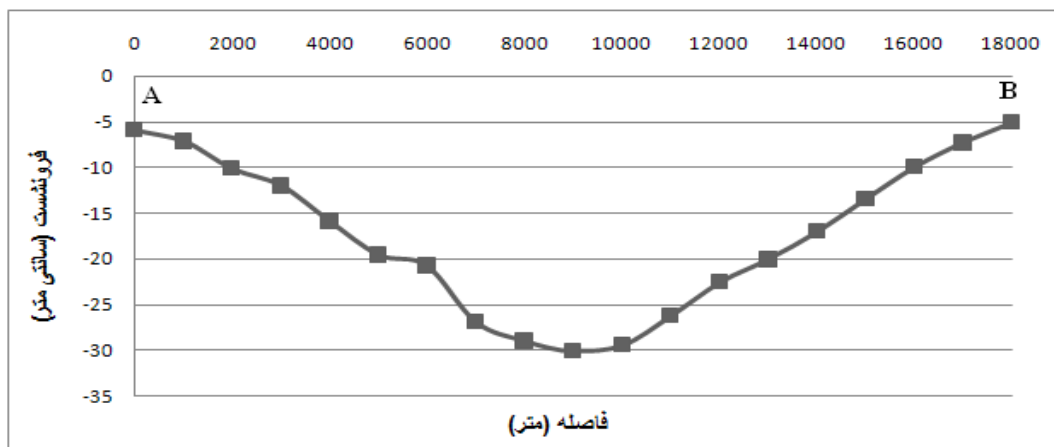
شکل ۵-۱۱ شبکه بکاربرده شده جهت تهیه نقشه تغییرات ارتفاعی (فرونشست) میدان درود. فرونشست میدان در هریک از نقاط تقاطع شبکه محاسبه می گردد. پروفیل A-B، موقعیت جزیره خارگ و مخزن فهلیان بر روی شبکه نمایش داده شده است.

نقشه تغییرات ارتفاعی بدست آمده و منحنی های تراز فرونشست سطح میدان درود در شکل (۵-۱۲) نمایش داده شده است. موقعیت جزیره خارگ و میزان فرونشست سطح آن در شکل مشخص گردیده است.



شکل ۵-۱۲ نقشه کنٹوری فرونشست سطح میدان درود. حدود جزیره خارگ بر روی نقشه نمایش داده شده است.

پروفیل بدست آمده در امتداد خط A-B به صورت شکل ۵-۱۳ است.



شکل ۵-۱۳ پروفیل فرونشست میدان در امتداد خط A-B

۵-۶ تشریح نتایج

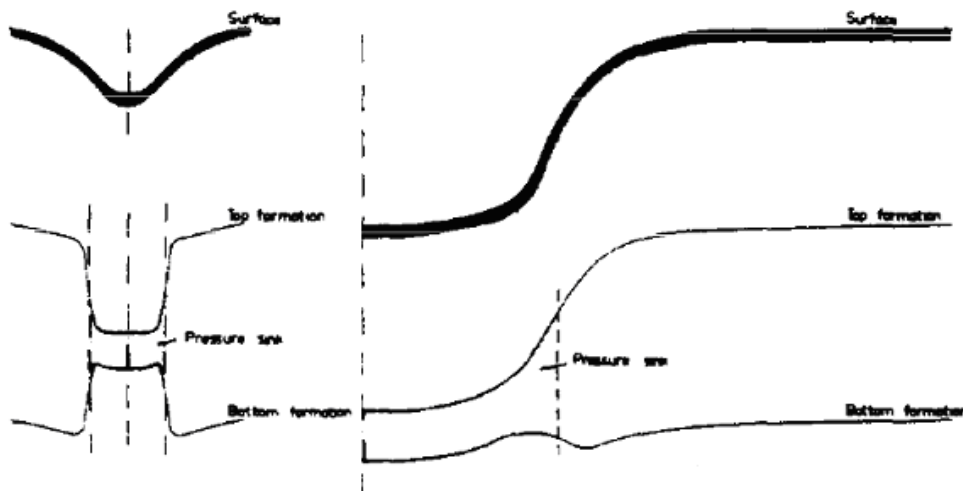
با توجه به نتایج بدست آمده، حداکثر فرونشست بین سال های ۱۹۶۴ تا ۲۰۰۷ میلادی در مرکز میدان درود (نقطه P) رخ داده است و با فاصله گرفتن از مرکز میدان به سمت حاشیه ها میزان آن کاهش یافته است. همچنین فرونشست سطح در غرب جزیره خارگ بیشترین مقدار را دارد و با حرکت به سمت شرق جزیره از میزان آن کاسته می شود.

همانطور که محاسبات نشان می دهد نرخ تراکم مخزن فهلیان بسیار بیشتر از نرخ فرونشست سطح میدان می باشد. اساساً رابطه بین ماکزیمم فرونشست و تراکم مخزن به وسیله نسبت عمق مخزن به گسترش جانبی مخزن مشخص خواهد شد (Geertsama, 1973a). مخازن کوچکی که در عمق زیاد واقع شده اند، حتی اگر تراکم زیادی نیز داشته باشند، به سختی مستعد ایجاد فرونشست قابل توجهی در سطح می باشند. عمق زیاد مخزن فهلیان یکی از مهمترین دلایل کم بودن نرخ فرونشست سطح میدان در مقایسه با تراکم مخزن است.

چنانچه سنگ پوشش مخزن بسیار سخت باشد، می تواند قسمتی از تراکم را تحمل نموده و از میزان آن بکاهد (Morita, 1988). Morita و همکارانش در سال ۱۹۸۸ خاطرنشان ساختند که سختی سنگ های اطراف می تواند با تقویت مخزن ضعیف به طور قابل توجهی تراکم پذیری حجم منافذ را کاهش دهد. بررسی مدول یانگ و ضریب پواسون سنگ های روبراه مخزن فهلیان نشان از تراکم پذیری کمتر این سنگ ها نسبت به سازند های مخزن فهلیان می باشد. بنابراین سخت تر بودن و تراکم پذیری سنگ های روبراه نیز به نوبه خود باعث کمتر شدن نرخ فرونشست میدان نسبت به نرخ تراکم مخزن می گردد.

پایین بودن میزان فرونشست سطح میدان درود از میزان تراکم مخزن، می تواند نشانه ای از جابجایی کف مخزن به سمت بالا باشد. به طور کلی تراکم مخزن می تواند باعث جابجایی کف میدان به سمت بالا یا پایین گردد. به منظور شرح الگوی تغییر شکل مخزن در حال تراکم فهلیان و محیط اطرافش، از شکل (۵-۱۴) استفاده می نماییم. در این شکل توزیع جابجایی قائم در سطح بالای

مخزن و کف آن به صورت بزرگنمایی شده، نمایش داده شده است. در شکل سمت چپ نسبت عمق مخزن به گسترش جانبی مخزن مقداری نسبتاً بالا می باشد. بنابراین کف مخزن به سمت بالا حرکت کرده و میزان فرونشست سطح کمتر از تراکم مخزن می باشد. اما در شکل راست نسبت عمق مخزن به گسترش جانبی مخزن پایین است، بنابراین کف مخزن کمی نسبت به حالت قبلی خود به سمت پایین حرکت خواهد کرد و میزان فرونشست سطح بالاتر از نرخ تراکم مخزن می باشد. تحقیقات Morita و همکارانش نیز نشان داد که فرونشست متناسب با میزان تراکم مخزن بوده و بسیار تحت تأثیر نسبت عمق مخزن به شعاع مخزن می باشد. هنگامی که نسبت مدول سختی سنگ مخزن به سنگ پوشش در رنج ۰,۲ تا ۱ می باشد، هرگونه جلوگیری از بالآمدگی سطح انتهایی مخزن بدلیل سخت بودن سنگ های زیرین، باعث افزایش میزان فرونشست خواهد گشت (Morita et al., 1988). با توجه به نتایج بدست آمده الگوی تغییر شکل مخزن فهلپان بیشتر به تصویر سمت چپ در شکل (۵-۱۴) شباهت خواهد داشت.



شکل ۵-۱۴ تراکم و فرونشست (Geertsma, 1973)

هر تراکم غیر نرمال مخزن می تواند با افزایش بارگذاری بر روی جداره چاه تولیدی باعث شکستگی آن گردد. موارد متعددی از شکست لوله های جداری در مخزن توسط بخش حفاری شرکت فلات قاره گزارش شده است، بنابراین ارزیابی دقیق میزان تراکم مخزن ضروری می باشد. همچنین جهت کمک به مدیریت بهینه تولید هیدروکربور لازم است تا ارتباط میان نرخ تولید/تزریق سیال و میزان تراکم مخزن تعیین گردد. از این رو با توجه به نرخ بیشتر تراکم مخزن نسبت به فرونشست سطح در میدان درود، در فصل بعد تراکم مخزن فهلیمان با استفاده از مدل سازی عددی با جزئیات بیشتری بررسی خواهد گردید.

فصل ششم

شبیه سازی عددی تراکم مخزن

۶-۱ مقدمه

فرونشست سطح بدلیل استخراج هیدروکربن، مشکلات فراوانی را در بسیاری از نقاط دنیا بوجود آورده است. بنابراین وزارت انرژی آمریکا^۱ و وزارت انرژی و معادن جمهوری ونزوئلا^۲ کنفرانس مشترکی را در نوامبر ۱۹۸۲ برگزار نمودند (Donaldson and van Domselaar, 1983). هدف کنفرانس ارائه مفهومی بهتر از تراکم مخزن در زیر سطح و فرونشست سطحی ایجاد شده در نتیجه آن، و همچنین بسط و گسترش راه حل هایی جهت کاهش اثرات آن بود. پس از این کنفرانس کارگروهی جهت بررسی بیشتر این پدیده تشکیل گردید. در سال ۱۹۹۵ Donaldson با استفاده از نتایج بدست آمده، مدلی جهت شبیه سازی عددی مخزن ارائه نمود. در این فصل مدل ارائه شده توسط Donaldson، و کد اجزای محدود COMPAC که به زبان فرترن نوشته شده است، جهت شبیه سازی عددی تغییرات فشار و تراکم مخزن فلهیان میدان نفتی درود تصحیح و مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین در این فصل اثر تراکم مخزن بر تخلخل و تراوایی مخزن فلهیان مدل سازی می گردد.

۶-۲ مدل عددی تراکم

۶-۲-۱ محاسبه افت فشار

چنانچه فشار روباره، P_{ob} ، وارد بر رسوبات تراکم پذیر زیر سطحی با فشار دانه به دانه، P_g ، ماسه ها و فشار سیال مخزن، P ، تحمل شود، فشار روباره مساوی با مجموع فشار کل مخزن بعلاوه فشار دانه به دانه بوده و یک شرایط استاتیک در مرز حاکم خواهد بود (شکل ۶-۱). چنانچه فشار سیال مخزن کاهش یابد، در زون در حال تراکم، تخلخل و نفوذپذیری کاهش یافته و دانه های سازند مخزن متراکم خواهند شد. با فرض ثابت باقی ماندن فشار روباره و فشار دانه های سازند مخزن، می توان کاهش فشار در مخزن بدلیل استخراج سیال را به صورت زیر مدل نمود

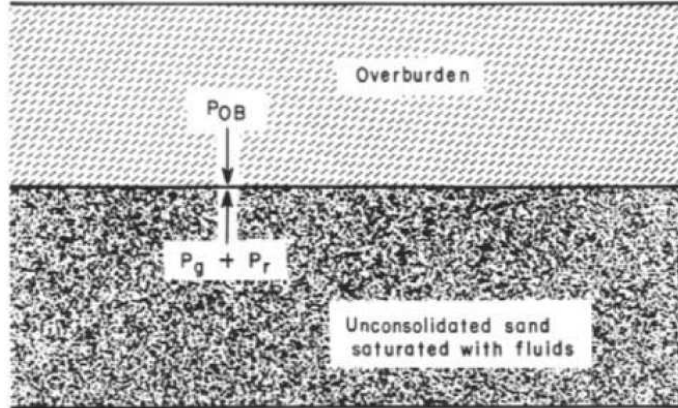
¹ U.S. Department of Energy (DOE)

² Ministry of Energy and Mines of the Republic of Venezuela

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{kh \delta p}{\mu \delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{kh \delta p}{\mu \delta y} \right) + Q_{i,j} = C_f \phi h \frac{\delta p}{\delta t} \quad (1-6)$$

تخلخل، ϕ ، برابر با نسبت حجم خلل و فرج به حجم کل، V_b ، بوده و به صورت $V_p/V_s + V_p$ تعریف

می شود. کاهش المانی بدلیل تراکم (کاهش ضخامت مخزن) به صورت زیر نمایش داده می شود



شکل ۱-۶ تعادل فشارها در مرز بین سازند روباره و سازند مخزن (Donaldson et al., 1995).

$$\phi_{i,j}^{n+1} = \frac{\phi_{i,j}^n \Delta X \cdot \Delta Y \cdot h_{i,j} - \Delta X \cdot \Delta Y \cdot \Delta h_{i,j}}{\Delta X \cdot \Delta Y \cdot h_{i,j}} = \frac{\phi_{i,j}^n h_{i,j} - \Delta h_{i,j}}{h_{i,j}} \quad (2-6)$$

قانون دارسی در معادله (۱-۶) ترکیب شده است تا جریان ویسکوز افقی سیال مخزن به سمت چاه را

مدل سازی نماید. در صورتی که تأثیر گرانش بر جریان سیال قابل اغماض باشد تراکم پذیری

ایزوترمال سیال، C_f ، به صورت زیر تعریف می شود

$$C_f = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dP} \right)_T \quad (3-6)$$

کاربرد معادله (۱-۶) در استخراج سیال توسط بسیاری از نویسندگان تشریح شده است که خلاصه ای

از آن را Raghavan و Miller (1975) بیان کرده اند. آنالیزهای دو بعدی که با ورود اختصاصی

ضخامت سازند در گره های شبکه، بعد سوم را در حل اختلاف محدود^۱ شبیه سازی می نمایند. معادله

(۱-۶) با استفاده از داده هایی که به سادگی از مخزن بدست می آیند، تخمینی فوق العاده سودمند از

تراکم سازند ارائه می نماید.

^۱ Finite difference

در روش عددی که برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی استفاده می کنیم مشتقات با اختلافات محدود جایگزین می شوند تا با ایجاد معادلات تفاضلی بتوانیم توزیع فشار در مخزن را بیابیم. یک شبکه یکپارچه مربعی به عنوان شبکه ای برای معادلات دیفرانسیل استفاده می شود. آنالوگ معادله تفاضلی برای معادله (۶-۱) در فصل مشترک (i, j) با استفاده از یک شبکه با مش های مربعی $(\Delta x = \Delta y)$ برابر است با

$$(kh)_{i+1/2,j}(P_{i+1,j} - P_{i,j}) - (kh)_{i-1/2,j}(P_{i,j} - P_{i-1,j}) + (kh)_{i,j+1/2}(P_{i,j+1} - P_{i,j}) - (kh)_{i,j-1/2}(P_{i,j} - P_{i,j-1}) \pm Q_{i,j} \quad (۴-۶)$$

$$= C_f \phi \mu h_{i,j} \frac{\Delta X^2}{\Delta t} (P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n)$$

عبارت نرخ، $Q_{i,j}$ ، وضعیت تزریق $(+Q_{i,j})$ یا تولید $(-Q_{i,j})$ چاه ها در معادله را در فصل مشترک های شبکه مشخص می کند. مقادیر (بالادستی) میانگین ضریب انتقال (kh) ، در وسط فاصله بین نقاط شبکه (بین i و $i+1$ و بین j و $j+1$)، محاسبه می شوند.

به منظور تعریف خصوصیات فیزیکی مخزن از نقشه هم ضخامت^۱، که نقاط با ضخامت یکسان را در مخزن مشخص می کند، نقشه هم تراوایی^۲، که خطوط با تراوایی یکسان بر روی آن رسم شده، و نقشه هم تخلخل^۳، که تخلخل مخزن در نقاط شبکه را تعیین می کند، استفاده می شود. مقادیر قابلیت انتقال و مکان چاه ها در نقاط تقاطع مناسب شبکه تعیین می شوند. در شبکه مورد استفاده مرزهای مخزن که در آنها جریان وجود ندارد (گسل ها و ..) در نقاط مناسب و در امتداد حاشیه ای و خارج از محدوده مخزن با قابلیت انتقال صفر مشخص می شوند (شکل ۶-۲). نفوذ آب در هر قسمت از مرز را می توان با قرار دادن چاه های تزریقی در نقاط شبکه و اعمال نرخ جریان مناسب شبیه سازی نمود.

¹ Transmissibility coefficient

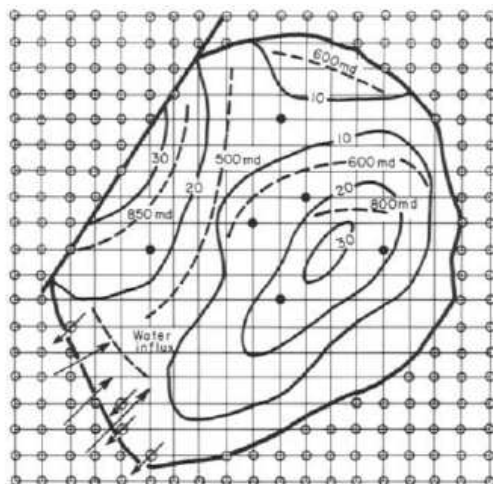
² Isopach

³ Isopermeability

⁴ Isoporosity

با بردن کمیت های معلوم (افزایش زمان، n) به سمت راست و نوشتن معادله (۴-۶) برای نقاط مرکزی که در آن $(kh)_{i,j-1}, (kh)_{i,j+1}, (kh)_{i-1,j}, (kh)_{i+1,j}$ به ترتیب با استفاده از حروف IP, IM, JP, JM و γ نشان داده می شوند، معادله کلی برای هر ردیف و نقطه به صورت زیر بدست می آید.

$$\begin{aligned}
 & [IM \cdot P_{i-1,j} - AL \cdot P_{i,j} + IP \cdot P_{i+1,j}]^{n+1} \\
 & = [(1 - \omega)(IM \cdot P_{i-1,j} + IP \cdot P_{i+1,j} + AL \cdot P_{i,j}) \\
 & \quad - \omega(JM \cdot P_{i,j-1}^{n+1} + JP \cdot P_{i,j+1} + \gamma \cdot P_{i,j} + Q_{i,j})]^n
 \end{aligned} \tag{۵-۶}$$



شکل ۲-۶ شبکه یکپارچه ای که نقشه هم ضخامت و خطوط هم تراوایی بر روی آن مشخص شده است. نقاط با دایره های خالی نشان دهنده نقاط با نفوذپذیری صفر می باشند (Donaldson et al., 1995).

که در آن $AL = IP + IM + JP + JM + \gamma$ است و ω ، پارامتر شتاب تکرار در ماتریس سه قطری^۱ می باشد که عددی است بین ۱ و ۲ ($1 < \omega < 2$). در صورتی که $\omega = 1$ باشد معادله به حل گوس-سایدل ماتریس تبدیل خواهد شد. با توجه به شکل (۲-۶) برای همه نقاط مرزی $P_{i,j}$ برابر با صفر است. هدف مدل محاسبه تابع پتانسیل $P_{i,j}$ برای همه المان های درون مرزهاست. معادله برای هر یک از نقاط درون مرزهای شکل (۲-۶) نوشته شده و تشکیل یک گروه معادله جبری را می دهد که

¹ Iteration acceleration parameter in the tridiagonal matrix

با زیر مجموعه های سه قطری روش حذفی گوس حل می شوند حل این ماتریس بوسیله TRIDAG، سابروتین برنامه COMPAC انجام می گیرد.

۲-۲-۶ محاسبه تراکم

همانند آنچه در شکل (۱-۶) آمده است، هنگامی که فشار روباره بدلیل استخراج سیال بیش از فشار کل سنگ می شود، دانه های آن ناحیه با کاهش حجم تغییر موقعیت می دهند تا فشار کل مخزن با فشار روباره تطبیق نماید. این تراکم به دلیل کاهش در ضخامت مخزن همراه با کاهش در تخلخل و نفوذپذیری ایجاد می شود. بنابراین تراکم اساساً به دلیل کاهش ضخامت مخزن در راستای قائم ایجاد می شود. در برنامه COMPAC فرض می شود که هیچگونه جابجائی در راستای افقی صورت نگرفته است. برای محاسبه تراکم از فرمول پیشنهادی (Geertsma, 1973b) استفاده شده است که در آن تراکم سازند تابعی از کرنش قائم است

$$\Delta h = \alpha \frac{(1-\nu-2\nu^2)}{(1-\nu)E} \Delta p_f h$$

کاهش تخلخل زون تراکم در واقع تغییر در حجم کل مخزن بوده و در هر نقطه از شبکه محاسبه می شود. این کاهش تخلخل همراه با کاهش تراوایی خواهد بود. جهت محاسبه تغییرات تراوایی که در نتیجه تراکم و همراه با تغییر تخلخل ایجاد می شود (تغییر تخلخل و تراوایی به عنوان تابعی از فشار)، بایستی رابطه میان تراکم و تخلخل در مخزن برای کد تعریف گردد. این رابطه، از داده های تراکم مخزن و با استفاده از رابطه Carmen-Kozeny اصلاح شده بدست می آید.

۳-۶ روش محاسبه

روش محاسبه را می توان به دو بخش عمده تقسیم نمود: (۱) محاسبه ضمنی توزیع کاهش فشار مخزن به عنوان تابعی از نرخ های تزریق و تولید سیال و انبساط سیال در مخزن (۲) محاسبه ضمنی تغییرات در ضخامت مخزن در هر نقطه از شبکه و محاسبه تغییرات تخلخل و نفوذپذیری که در نتیجه آن ایجاد می شود.

۴-۶ فرضیات مدل سازی

مدل بر اساس این اصول و فرضیات ایجاد شده است.

(۱) محیط متخلخل الاستیک است.

(۲) محیط متخلخل نسبت به تخلخل، نفوذپذیری و ضخامت مخزن ممکن است ناهمگن باشد و

این پارامترها به عنوان مقادیر ورودی در هر نقطه از شبکه وارد می شوند.

(۳) سیال مخزن تراکم پذیر است. برای سیال تراکم ناپذیر می توان ضریب تراکم C_f ، را صفر

قرار داد، چنانچه بخواهیم فرض غیر قابل تراکم بودن سیال را اعمال نماییم بایستی سیال تولیدی

معادل سیال تزریق شده به مخزن باشد.

(۴) خصوصیات جریان سیال از قانون داریسی پیروی می نماید.

(۵) نیروهای گرانشی ناچیز است. این بدان معناست که گرادیان فشار سیال به دلیل تغییر در

ضخامت مخزن و انحراف قابل اغماض است.

(۶) کاهش نفوذپذیری تابعی از کاهش تخلخل می باشد.

(۷) تنش افقی ناچیز است، بنابراین تغییر در راستای افقی مخزن رخ نمی دهد.

(۸) مرزهای غیر جریانی، با نفوذپذیری صفر در نقاط شبکه نمایش داده می شوند.

(۹) نفوذ آب در مرزها با چاه های تزریق نمایش داده می شوند، نرخ نفوذ می تواند متغیر باشد.

(۱۰) تراکم به دلیل افزایش فشار مؤثر دانه به دانه ایجاد می شود که معلول کاهش فشار مخزن

در اثر استخراج سیال مخزن می باشد.

(۱۱) تراکم و ریپاند کاملاً معکوس پذیر فرض می شوند. چنانچه بخواهیم با استفاده از

COMPAC انبساط را مطالعه نماییم، برنامه این قابلیت را دارد که برنامه را اصلاح نموده و ضریب

انبساط تعریف نماییم.

(۱۲) فرض می شود که به دلیل استخراج، جریان افقی سیال تراکم پذیر به سمت چاه های

مخزن باشد.

(۱۳) با استفاده از تراکم پذیری سنگ مخزن تغییر در ضخامت مخزن در بین محاسبات تخمین زده خواهد شد.

(۱۴) معادله دیفرانسیل جزئی، غیر خطی مرتبه دوم برای شبیه سازی سیستم استفاده شد که در آن تخلخل و نفوذپذیری مخزن به عنوان توابعی از فشار بررسی شدند.

تراکم مخزن فرآیند پیچیده ای است که شامل تنش های افقی همانند تنش های قائم، یکپارچگی سازندهای بالا و پایینی، تراکم پذیری این سازندها و غیره می باشد. بررسی تأثیر همه این فرآیندها در یک لحظه بر روی تراکم قابل آنالیز و بررسی نیست زیرا تکنولوژی تعیین برجای این پارامترها هنوز در ابتدای کار است. تراکم به دلیل استخراج سیال نتیجه کاهش فشار درون مخزن می باشد، که منجر به کاهش ضخامت مخزن، تخلخل و نفوذپذیری خواهد گشت. از آنجایی که ابعاد جانبی (افقی) مخازن مهم به لحاظ اقتصادی بزرگ است، جابجایی افقی بدون از دست رفتن نه چندان زیاد دقت، قابل اغماض است. با این فرض مسأله ساده سازی شده و تخمین درجه تراکم با استفاده از برنامه COMPAC در مخزن انجام می گردد. این برنامه تنها از داده ها و پارامترهایی استفاده می کند که به آسانی از اندازه گیری ها و تست های آزمایشگاهی از نمونه های سازند و سیال بدست می آیند. این پارامترها عبارتند از ضریب تراکم تک محوره، ضریب انبساط سیال، ویسکوزیته سیال، فشار مخزن، تخلخل و رابطه میان تخلخل و نفوذپذیری که به آسانی از داده های آزمایشگاهی بدست می آیند.

این برنامه می تواند برای آنالیز تأثیرات ویسکوزیته سیال، ضخامت مخزن، نرخ تولید و تزریق همچنین گسترش تراکم به عنوان تابعی از زمان و بررسی تأثیرات تراکم پذیری و غیره بررسی گردد. چنین آنالیزی از زون تولید، می تواند به منظور اتخاذ تصمیم در تولید، نگهداری فشار و برنامه ریزی کلی میدان (مخصوصاً در مناطقی که به لحاظ محیطی حساس ترند)، مورد استفاده قرار گیرد. سیالات ممکن است به مخزن تزریق و یا از مرزها وارد مخزن گردند. همانطور که قبلاً اشاره گردید در این مدل سازی از داده های آزمایشگاهی که به آسانی بدست می آیند همچون تخلخل، نفوذپذیری و

تراکم پذیری و یا ناهمگنی ویژه مخزن که از مغزه ها و نموداربرداری ها حاصل می گردند، استفاده می شود. از این شبیه سازی می توان برای بدست آوردن تخمین های مهندسی از درجه افزایش تراکم، نرخ فرونشست و گسترش منطقه ای آن، و همه پارامترهایی که مستقیماً به نرخ ورود و یا استخراج سیال ربط دارند استفاده نمود. این آنالیز با بدست آوردن توزیع فشار در مخزن برای دو بعد افقی فضا و معرفی ضخامت به عنوان کمیت وابسته به فشار در بعد سوم، به یک سیستم سه بعدی بسط داده شده است. برای هر نقطه از الگوی شبکه توزیع فشار به طور ضمنی محاسبه می شود. اگر داده های کرنش جانبی در دسترس باشد، همانند دیگر پارامترهای تأثیرگذار می توان آن را در نقاط ورودی مناسب به مدل اضافه نمود. بنابراین این مدل تصویر کمی و کاربردی از تراکم مخزن ارائه خواهد داد.

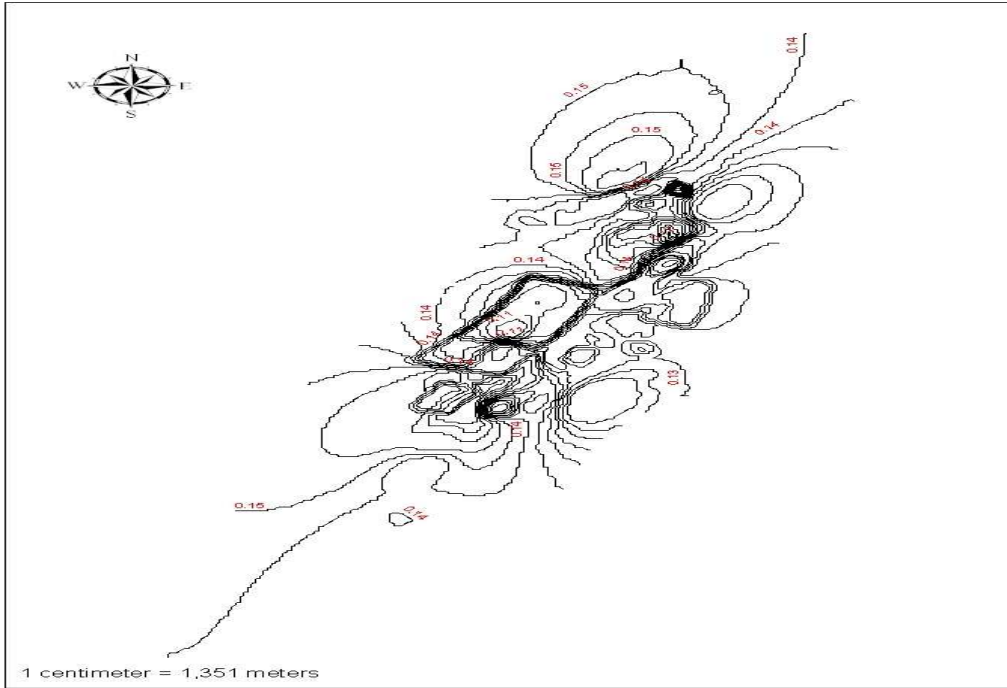
۶-۵ شبیه سازی عددی تراکم مخزن فلهلیان

۶-۵-۱ پارامترهای ورودی مدل

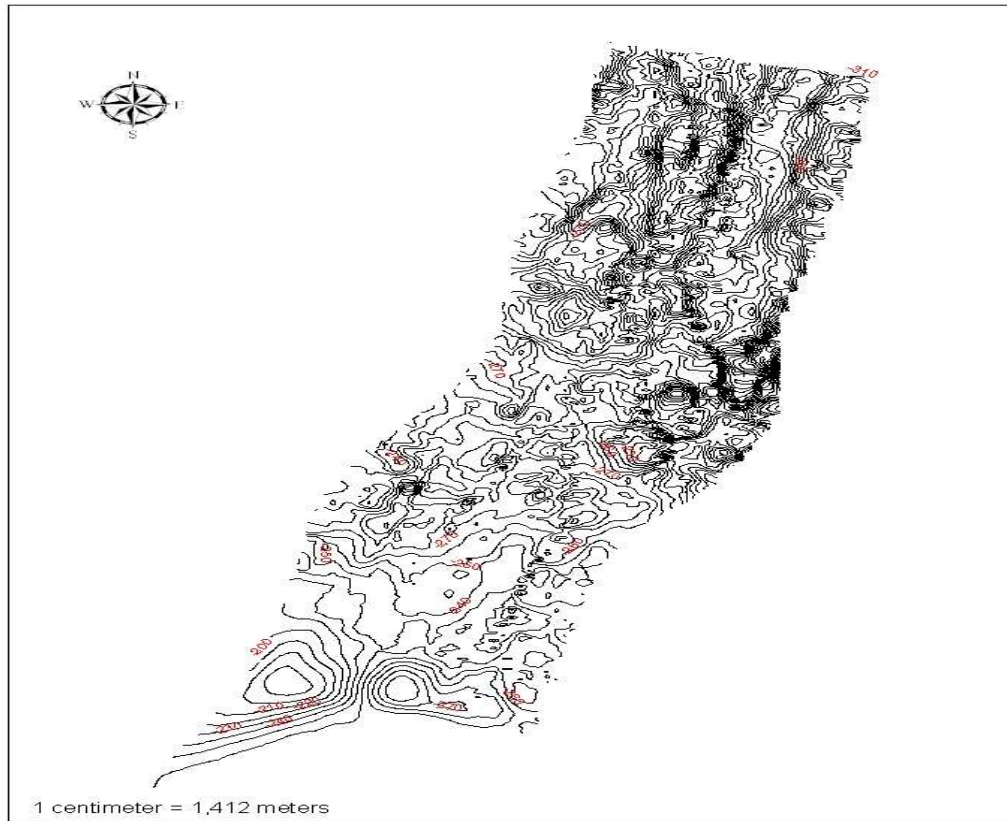
جهت تعیین پارامترهای هیدروژئولوژیکی و ژئومکانیکی در هر یک از نقاط شبکه مورد استفاده از نقشه های هم تخلخل، هم ضخامت و هم تراوایی مخزن استفاده می گردد. این نقشه ها در شکل های (۶-۳)، (۶-۴) و (۶-۵) نمایش داده شده اند. دیگر پارامترهای ورودی مورد استفاده در شبیه سازی مطابق با جدول (۶-۱) است.

جدول ۶-۱ پارامترهای ورودی شبیه سازی عددی مخزن فلهلیان

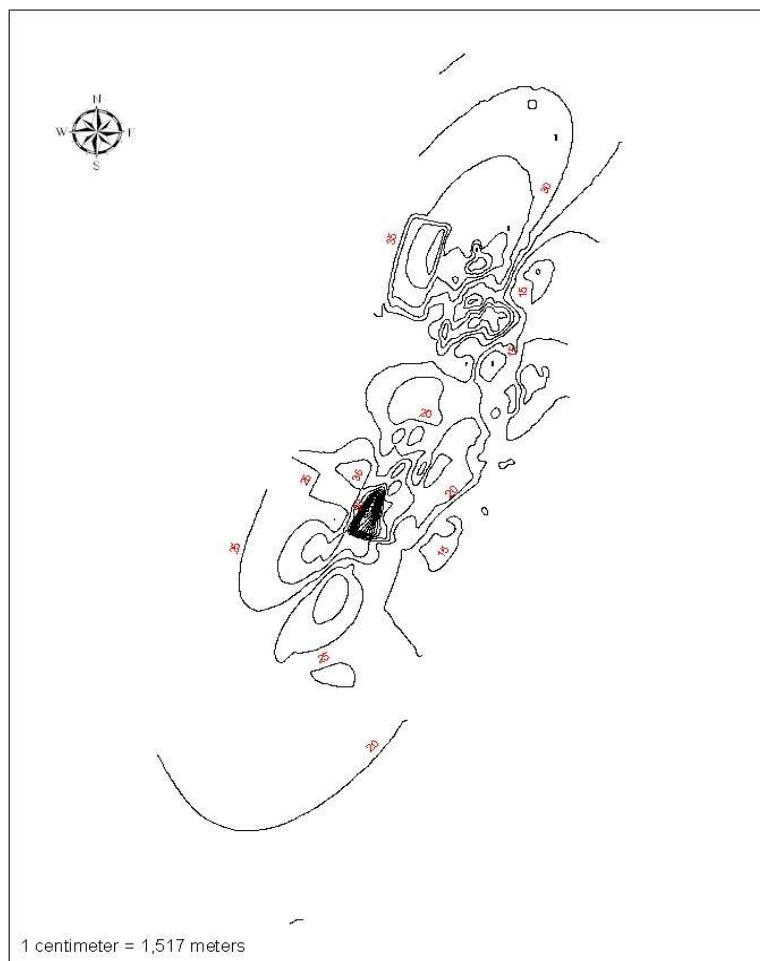
نام پارامتر	مقدار پارامتر	واحد پارامتر
ضریب پواسون مخزن (ν)	۰,۳۱	-
مدول یانگ مخزن (E)	۶۹۰۳۴۶,۷	psi
پارامتر شتاب دهنده تکرار (ω)	۱,۵	-
ضریب تراکم پذیری سیال مخزن (C_f)	۰,۰۰۰۰۱۳۴	1/ psi
ضریب بایوت (α)	۰,۷	-
فشار اولیه مخزن (P_0)	۴۰۰۰	psi
ویسکوزیته سیال (μ)	۰,۵	cp
گام زمانی (Δt)	۱	day



شکل ۳-۶ نقشه آیزوپروستی (هم تخلخل) مخزن فهلیمان



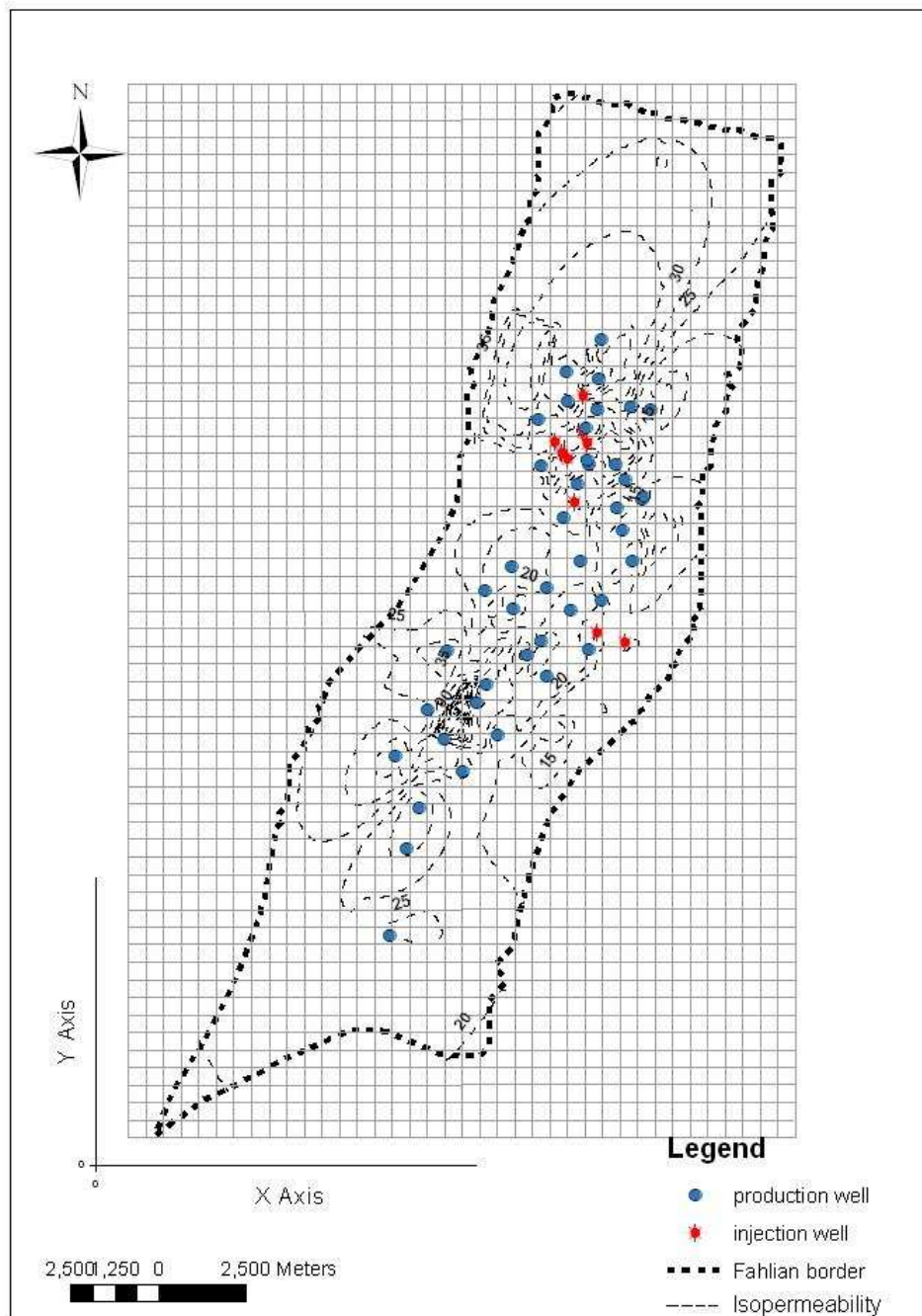
شکل ۴-۶ نقشه آیزوپیک (هم ضخامت) مخزن فهلیمان



شکل ۵-۶ نقشه آیزوپرمی ایبیلیتی (هم تراوایی) مخزن فهلیان (برحسب سانتی پواز)

۶- ۵- ۲ شبکه اختلاف محدود

یک شبکه یکپارچه با مش های مربعی ($\Delta x = \Delta y$)، به عنوان شبکه ای برای معادلات دیفرانسیل استفاده می شود. از آنجایی که نرخ تولید و تزریق چاه ها در نقاط تقاطع مش های شبکه وارد می شوند، ابعاد مش کمتر از کوتاه ترین فاصله چاه ها از هم و ۵۰ متر در نظر گرفته شده است. به این ترتیب شبکه ای با ۲۲۸۰۰۰ مش با ابعاد ۵۰×۵۰ متر خواهیم داشت (شکل ۶-۶). مدل با ورود اختصاصی ضخامت سازند در گره های شبکه، بعد سوم را در حل اختلاف محدود شبیه سازی می نماید.



شکل ۶-۶ شبکه یکپارچه اختلاف محدود که نقشه آیزوپرمی ابیلیتی (هم تراوایی) مخزن بر روی آن قرار داده شده. تمامی نقاط شبکه که در خارج و روی مرزها قرار دارند با تراوایی صفر مشخص می شوند (به منظور نمایش بهتر شبکه، ابعاد مش های شبکه بزرگتر از مقدار واقعی نمایش داده شده اند).

۳-۵-۶ شرایط اولیه و مرزی مدل سازی

برای تعیین مرزها و شرایط مرزی مخزن در نظر گرفتن عوامل تکتونیکی بسیار حائز اهمیت می باشد. با توجه به گزارش تکتونیکی منطقه، امکان وجود گسل عرضی جنوب شرق - شمال غرب که بخش مرکزی ساختار را قطع کرده باشد، وجود دارد. اما ارزیابی آن با توجه به داده های لرزه ای، زمین شناسی و داده های مخزن (فشار مخزن) بسیار مشکل می باشد. برخی از نشانه هایی که موافق با این فرضیه می باشند در بخش (۲-۲-۳) از فصل دوم بیان شده است. طبق این گزارش این مشاهدات دلایلی بر وجود گسل های معکوس امتداد لغز می باشند. با این حال، باور بر این است که تولید چاه ها هیچگونه مدرکی دال بر تغییر شکل جریان سیال در ناحیه و انقطاع دینامیکی بخش های غربی و شرقی میدان در اختیارمان قرار نمی دهد. بنابراین چنانچه یک گسل معکوس امتداد لغز در منطقه موجود باشد، پیوستگی مخزن نمی تواند آسیب جدی دیده باشد. با استناد بر این گزارش گسل های سازند مخزن، مشخص کننده مرزهای سازند نیستند. همچنین با در نظر نگرفتن آنها در مدل سازی، خطای زیادی متوجه شبیه سازی نخواهد گردید.

معمولاً شرایط مرزی در شبیه سازی مخزن، مرزهای بدون جریان در لبه های (مرزهای) مخزن و چاه های تزریق/تولید با شرط فشار یا دبی معین شده در بلوک های داخلی می باشند. از آنجایی که گزارشی مبنی بر نفوذ آب از دیواره ها بدرون مخزن فلهلیان وجود ندارد، مرزهای مخزن محدوده سازند فلهلیان و غیرجریانی در نظر گرفته می شود. بنابراین در شبکه مورد استفاده مرزهای مخزن که در آنها جریان وجود ندارد، و نقاط خارج از محدوده مخزن با تراوایی صفر مشخص می شوند. با توجه به داده های تولید موجود، ابتدای سال ۲۰۰۰ میلادی به عنوان مبدأ زمانی مدل سازی در نظر گرفته شده است. برای اعمال شرایط اولیه مخزن در مرحله اول شبیه سازی، فشار مخزن درون مرزهای شبکه برابر با متوسط فشار مشاهده شده در چاه های مخزن در انتهای سال ۱۹۹۹ میلادی یعنی ۴۰۰۰ psi در نظر گرفته شده است. در مراحل بعدی شبیه سازی، نتایج بدست آمده از مرحله

قبل شرایط اولیه شبیه سازی را تعیین می نمایند. در نقاط مرزی شبکه شرایط اولیه با برابر صفر قرار دادن فشار ($P_{i,j} = 0$)، اعمال می گردد.

۶-۶ محاسبه تراکم مخزن فهلیمان در مقیاس چاه

پس از مش بندی شبکه اختلاف محدود مدل سازی و اعمال شرایط مرزی و اولیه بر روی آن، همانطور که قبلاً نیز اشاره گردید، هر یک از نقشه های (۳-۶)، (۴-۶)، (۵-۶) به عنوان لایه های اطلاعاتی موجود بر شبکه منطبق می گردند. تخلخل، تراوایی و ضخامت سازند مخزن بدست آمده از این نقشه ها، در هر نقطه از شبکه معین می گردد. پس از انجام این مراحل و با اجرای برنامه COMPAC پارامترهای ورودی همچون، ω ، پارامتر شتاب دهنده تکرار در ماتریس سه قطری برای حل معادله حاکم به روش حذفی گوس، برای برنامه تعریف می گردد. در این شبیه سازی مقدار ω برابر با ۱,۵ در نظر گرفته شده است. تعداد چاه های تولیدی و تزریقی از دیگر پارامترهایی هستند که در ابتدای شبیه سازی تعریف می گردند. کل چاه های تولیدی و چاه های تزریقی مخزن فهلیمان در شکل (۶-۶) نمایش داده شده است. در سال هایی که شبیه سازی انجام می پذیرد تمامی چاه ها مورد بهره برداری قرار نمی گیرند. بنابراین در هر سال همان تعداد چاهی که هیدروکربن از آنها استخراج می شود، در شبیه سازی استفاده می گردد. تعداد چاه های استفاده شده در هر سال از شبیه سازی طبق جدول (۲-۶) می باشد.

جدول ۲-۶ تعداد چاه های تولید/تزریق مخزن، در هر کدام از سال های شبیه سازی

سال	۲۰۰۰	۲۰۰۱	۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷
تعداد چاه های تولید	۳۲	۳۲	۳۲	۳۲	۳۲	۳۲	۳۲	۳۲
تعداد چاه های تزریق	-	-	-	-	-	۹	۹	۹

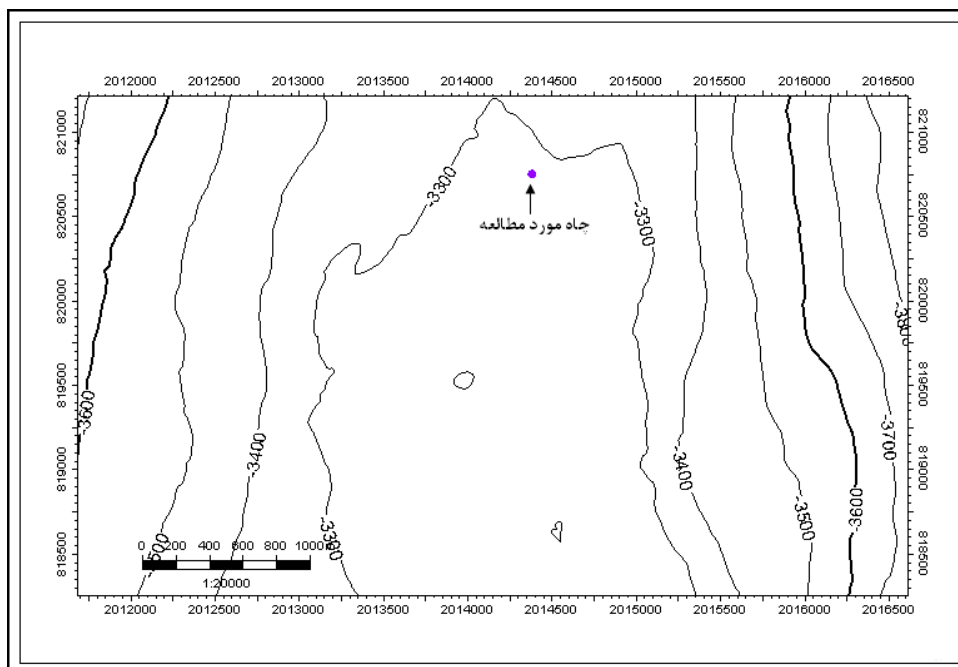
طبق داده هایی که بخش مخزن شرکت فلات قاره در اختیار محقق قرار داده است، عمل تزریق سیال به درون مخزن از ابتدای سال ۲۰۰۵ صورت پذیرفته است. بنابراین از این سال به بعد چاه های تزریقی در مدل سازی در نظر گرفته می شوند. نرخ تولید هیدروکربن ($-Q_{i,j}$) و نرخ تزریق سیال به

درون هر چاه $(Q_{i,j} +)$ ، و موقعیت چاه های تولیدی و تزریقی در شبکه اختلاف محدود مشخص می گردند. جمله دبی چاه در همه نقاطی که در آنها چاه وجود ندارد، صفر است و برای بلوک های حاوی چاه غیر صفر است. این جمله برای چاه های تولید منفی و برای چاه های تزریق مثبت است. با توجه به داده های تولید و تزریق مدت زمان شبیه سازی ۸ سال و در بازه های یک ساله انجام می گیرد. افزایش زمان در شبیه سازی (Δt) ، برای برنامه ۱ روز تعریف می شود. علاوه بر این موارد، پارامترهای ویسکوزیته سیال بر حسب سانتی پواز و تراکم پذیری تک محوره هیدروکربن مخزن بر حسب $(1/psi)$ به عنوان پارامتر ورودی در شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

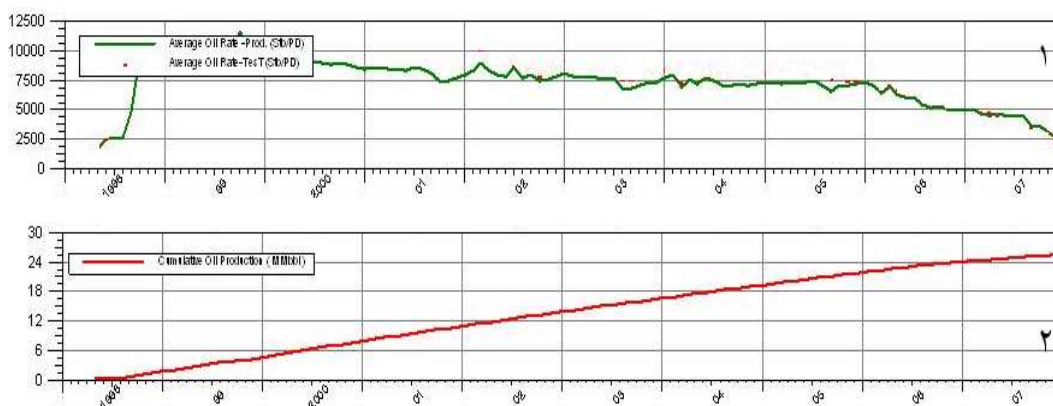
پس از تعریف پارامتر های ورودی، معادله (۶-۴) برای هر یک از نقاط درون مرزهای شکل (۶-۶) نوشته شده و تشکیل یک گروه معادله جبری را می دهد که با زیر مجموعه های سه قطری روش حذفی گوس حل می شوند. $P_{i,j}$ برای همه نقاط درون مرز های شکل (۶-۶) محاسبه شده و توزیع کاهش فشار مخزن به عنوان تابعی از نرخ های تزریق و تولید سیال در مخزن بدست می آید. پس از محاسبه فشار در هر نقطه، تراکم ناشی از کاهش فشار محاسبه می گردد. کد COMPAC تراکم مخزن را با توجه به میزان تولید چاه، محاسبه نموده و نتایج را به صورت رشته ای از اعداد چاپ می نماید. نتایج به ترتیب از محل هر چاه تا مرز های بدون جریان شبکه اختلاف محدود نوشته می شود. به عنوان نمونه تراکم محاسبه شده برای یکی از چاه های مخزن مورد بررسی قرار می گیرد. موقعیت چاه مورد مطالعه در سازند یاماما در شکل (۶-۷) نمایش داده شده است. این چاه در کل دوره شبیه سازی مورد بهره برداری قرار گرفته است. تخلخل مخزن در محل این چاه ۱۵٪ و تراوایی ۳۰ میلی داری می باشد. همچنین ضخامت مخزن در این نقطه برابر ۲۵۰ متر می باشد.

نرخ تولید روزانه و تولید تجمعی از این چاه در شکل (۶-۸) نمایش داده شده است. به طور کلی با نزدیک شدن به پایان عمر یک چاه، تولید از چاه کاهش خواهد یافت. همانطور که در شکل مشاهده می گردد منحنی ها نشان از کاهش تدریجی تولید در چاه طی سال های شبیه سازی دارد.

کاهش در تولید، کاهش در نرخ افت فشار را در پی خواهد داشت و کاهش در نرخ افت فشار، کاهش در نرخ تراکم را در بر دارد.



شکل ۶-۷ موقعیت و عمق چاه مورد مطالعه در مخزن فلهلیان



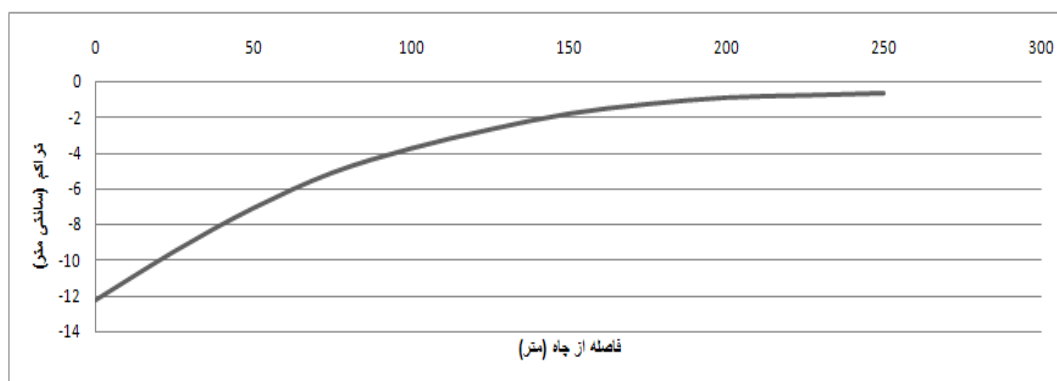
شکل ۶-۸ (۱) منحنی نرخ تولید هیدروکربن از چاه مورد مطالعه (بشکه در روز) (۲) مجموع هیدروکربن استخراج شده از چاه (هزار بشکه)

حداکثر میزان تراکم محاسبه شده در هر سال شبیه سازی مطابق با جدول (۶-۳) است. نتایج حاکی از افزایش تراکم مخزن با گذشت زمان در محل این چاه دارد. البته نرخ این افزایش تراکم متغییر بوده و متناسب با میزان تولید، تغییر می نماید.

جدول ۳-۶ میزان تراکم محاسبه شده در محل چاه مورد مطالعه در سال های مختلف شبیه سازی

سال	۲۰۰۰	۲۰۰۱	۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷
حداکثر تراکم (سانتی متر)	۲,۰۳۳	۱,۸۹۲	۱,۷۸۹	۱,۷۳۱	۱,۷۲۱	۱,۶۴۷	۰,۸۹۷	۰,۵۴۳

حداکثر تراکم مخزن در فضای اطراف هر چاه در محل خود چاه رخ خواهد داد. به تدریج و با افزایش فاصله نسبت به چاه، میزان افت فشار منفذی ناشی از استخراج هیدروکربن کاهش خواهد یافت، و این امر باعث کاهش تدریجی تراکم در فضای اطراف چاه خواهد گردید. در پایان شبیه سازی، پروفیل تراکم در اطراف چاه مورد مطالعه به صورت شکل (۶-۹) خواهد بود. همانطور که در شکل مشاهده می گردد، مخزن در محل چاه ۱۲,۲۵ سانتی متر متراکم گردیده است. این میزان به تدریج و با دور شدن از چاه کاهش یافته و تقریباً در ۲۵۰ متری چاه بسیار ناچیز می گردد. این میزان تراکم باعث تغییر خواص فیزیکی محیط متخلخل (تخلخل و تراوایی) می گردد که در بخش بعدی مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۶-۹ پروفیل تراکم مخزن در فضای اطراف چاه مورد مطالعه

۶-۷ محاسبه تغییرات تخلخل و تراوایی مخزن فهلیان

۶-۷-۱ رابطه بین تخلخل و تراوایی مخزن فهلیان

بعلت تغییرات عمومی شدید در خواص مخزن که معلول تغییرات ناگهانی در محیط رسوب گذاری می باشد، تخمین نفوذپذیری در مخازن کربناتی ناهمگن^۱ و پیچیده معمولاً دشوار است.

¹ Heterogeneous

نفوذپذیری یکی از پارامترهای اساسی سنگ است که بیان کننده توانایی سنگ در انتقال سیال تحت گرادیان فشار می باشد. معمولاً تخلخل و نفوذپذیری پارامترهای مستقل مخزن می باشند. با این حال در صورتی که خلل و فرج ماتریکس سنگ مخزن به هم مرتبط نباشند و تخلخل غیر مؤثر باشد تراوایی کم خواهد بود و در صورت مؤثر بودن تخلخل، تراوایی سنگ مخزن بالا خواهد بود. از آنجایی که تراوایی مغزه های بدست آمده از چاه ها در دسترس است، روش های آماری در حل مسائل مربوط به تراوایی مخزن گسترش یافته اند. رگرسیون به عنوان روشی آماری جهت تعیین رابطه میان تراوایی و تخلخل مغزه های بدست آمده از مخزن کاربرد فراوانی یافته است. روش رگرسیون معمولاً پراکندگی داده های تجربی را نادیده گرفته و پراکندگی نفوذپذیری هموار شده را تخمین می زند. در این روش از روابطی مانند رابطه زیر استفاده می شود.

$$\ln(K) = a.\phi + b$$

علاوه بر روش های آماری انواع روابط تجربی تخلخل- نفوذپذیری برای سازند های مختلف توسط Chilingarian (1975) و D.Tiab و Donaldson (2004) شرح داده شده است.

با استفاده از روابط کرنش- تخلخل و معادله خطی تنش مؤثر و کرنش می توانیم از رابطه تجربی Kozeny-Carmen جهت مدل کردن تأثیر تغییرات تخلخل بر نفوذپذیری، استفاده نماییم (Dung, 2007). تئوری Kozeny-Carmen بین تخلخل، تراوایی و سطح مخصوص سنگ متخلخل که به صورت ایده آل مجموعه ای از لوله های مویین فرض می شود، ارتباط برقرار می سازد (E.Shokeir et al., 2006).

می توان رابطه Kozeny-Carmen را به صورت زیر نوشت (Behrenbruch and Biniwale, 2005)

$$0.0314 \sqrt{\frac{k}{\phi}} = \frac{\phi}{(1-\phi)} \left(\frac{1}{\sqrt{F_{ps}} \tau S_{vgr}} \right) \quad (6-6)$$

در این رابطه تراوایی، k ، بر حسب میلی داری می باشد. ϕ تخلخل مؤثر، S_{vgr} نسبت مساحت سطح مخصوص به حجم دانه بوده و واحد آن μm^{-1} می باشد، F_{ps} فاکتور شکل است و ثابت Kozeny نیز

نامیده می شود (مقدار این فاکتور برای استوانه دایره ای برابر با ۲ می باشد). τ نیز ضریب انحنای یا پیچ و خم^۱ می باشد. S_{vgr} برابر است با

$$S_{vgr} = \frac{\text{area of spheres}}{\text{volume of sphere}} = \frac{\pi d_{gr}^2}{\frac{\pi}{6} d_{gr}^3} = \frac{6}{d_{gr}} \quad (7-6)$$

بنابراین می توان معادله (۶-۶) را به صورت زیر نوشت

$$0.0314 \sqrt{\frac{k}{\phi}} = \frac{\phi}{(1-\phi)} \left(\frac{d_{gr}}{6\sqrt{2\tau}} \right) \quad (8-6)$$

با توجه به رابطه بدست آمده بیان این نکات در اینجا ضروری است

(۱) رابطه بین تراوایی و تخلخل مستقیم خواهد بود و با کاهش تخلخل تراوایی نیز کاهش خواهد یافت. لازم به ذکر است که تغییرات تخلخل نیز رابطه مستقیم با تراکم مخزن دارد و با استفاده از رابطه (۶-۲) محاسبه خواهد شد.

(۲) تراوایی با شعاع دانه بندی ذرات محیط متخلخل، d_{gr} ، نسبت مستقیم دارد.

(۳) تراوایی با ضریب انحناء، τ ، نسبت عکس دارد.

با ساده سازی این رابطه و ثابت در نظر گرفتن d_{gr} و τ در کل مخزن، به رابطه بین تخلخل و

تراوایی دست خواهیم یافت. که می توان آن را به صورت زیر نوشت

$$k = a.f(\phi) \quad (9-6)$$

ضریب a با استفاده از تخلخل و تراوایی اولیه در نقاط روی شبکه اختلاف محدود بدست

خواهد آمد. در این معادله $f(\phi)$ برابر با رابطه زیر می باشد

$$f(\phi) = \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (10-6)$$

با توجه به روابط بالا، جهت تعیین رابطه میان تخلخل و تراوایی در مخزن ابتدا بایستی مقدار ضریب a در مخزن مشخص گردد. برای تعیین این ضریب از متوسط مقادیر اولیه تخلخل و تراوایی

¹ Tortuosity

مخزن که از آنالیز مغزه یا داده های لاگینگ بدست آمده اند استفاده می گردد. این مقادیر در جدول (۴-۶) آورده شده است.

جدول ۴-۶ مقادیر تراوایی، $f(\phi)$ و ضریب a محاسبه شده برای مخزن فلهیان

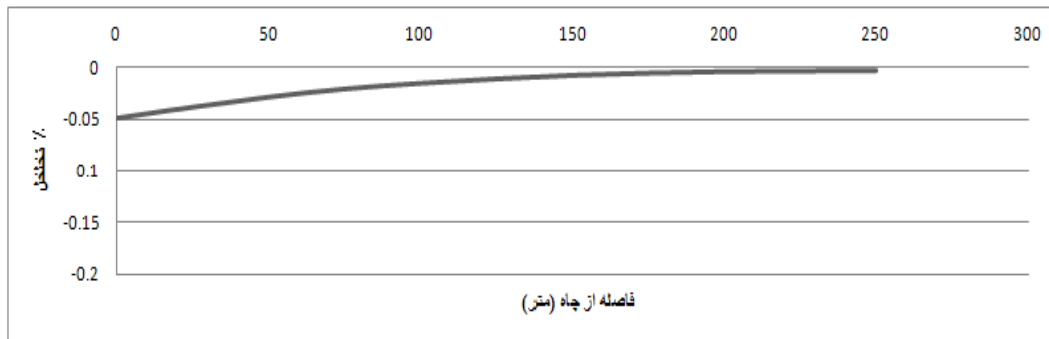
$F(\phi)$	k	a
۰,۰۰۴۱۷۴	۲۵,۲۴۶۶۵	۶۰۴۸,۷۳

بنابراین رابطه نهایی میان تراوایی و تخلخل مخزن برابر است با

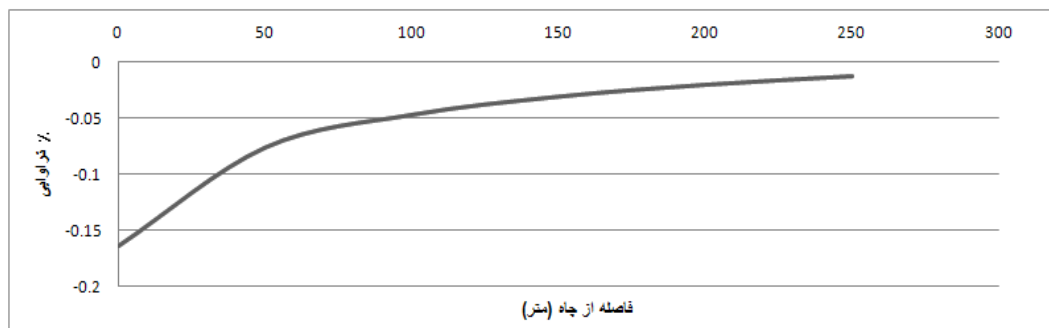
$$k = 6048.73 \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (۱۱-۶)$$

۶-۷-۲ محاسبه تغییرات تخلخل و تراوایی مخزن در مقیاس چاه

همان طور که قبلاً نیز اشاره گردید تغییر در وضعیت تنش مؤثر مخزن، مشخصات پتروفیزیکی مخزن را تحت تأثیر قرار می دهد. کاهش تخلخل زون تراکم در واقع تغییر در حجم کل مخزن بوده و در هر نقطه از شبکه محاسبه می شود. این کاهش در تخلخل طبق رابطه (۱۱-۶) باعث کاهش تراوایی در هر نقطه می گردد. برای چاه مورد مطالعه درصد تغییرات تخلخل و تراوایی در فضای اطراف چاه به ترتیب به صورت شکل های (۱۰-۶) و (۱۱-۶) می باشد. همانطور در شکل (۱۰-۶) مشاهده می گردد، تغییرات تخلخل در محل چاه ۰,۰۴۹ در صد تخلخل اولیه در محل چاه می باشد و به تدریج با فاصله از چاه کمتر می گردد، همچنین با توجه به شکل (۱۱-۶) تغییرات تراوایی در مجاورت چاه ۰,۱۶۴ در صد می باشد. این نتایج نشان دهنده حساسیت بیشتر تراوایی مخزن به کاهش فشار منفذی و افزایش تنش مؤثر، نسبت به تخلخل می باشد. همچنین میزان پایین تغییرات تخلخل و تراوایی به دلیل در صد پایین تغییرات ضخامت مخزن می باشد. تغییرات کم ضخامت نیز خود معلول تراکم پذیری کم و جنس سنگ مخزن می باشد.



شکل ۶-۱۰ درصد تغییرات (کاهش) تخلخل در فضای اطراف چاه مورد مطالعه



شکل ۶-۱۱ درصد تغییرات (کاهش) تراوایی در فضای اطراف چاه مورد مطالعه

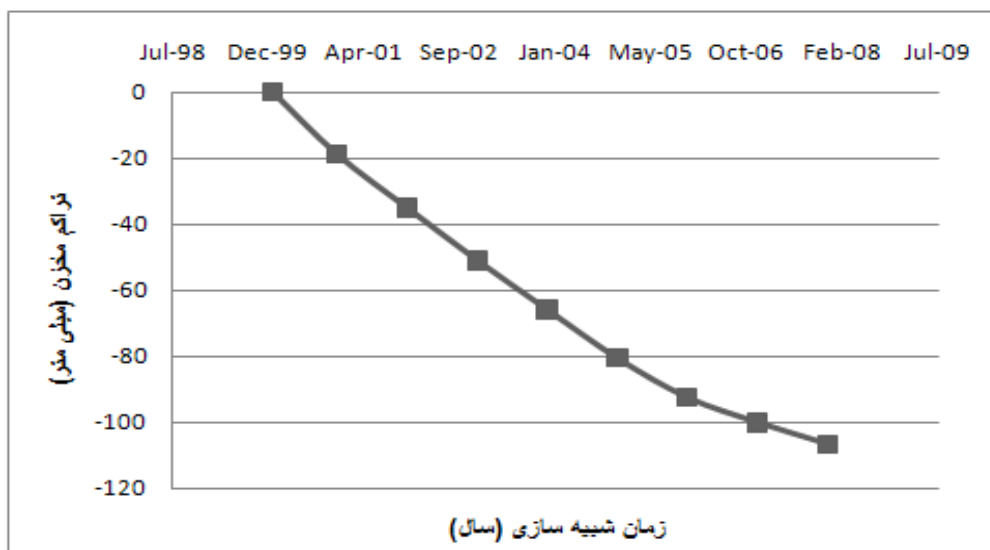
۶-۸ نتایج مدل سازی در مقیاس میدان

به طور کلی متوسط تولید از چاه های میدان، همچنین متوسط تزریق سیال به مخزن جهت حفظ فشار مخزن در طول دوره شبیه سازی، مطابق با جدول (۶-۵) می باشند. همانطور که در جدول مشاهده می شود عمل تزریق به مخزن از سال ۲۰۰۵ میلادی انجام پذیرفته است. متوسط میزان تراکم مشاهده شده در کل چاه ها که در نتیجه این تولید و تزریق ها، و با کاهش فشار منفذی و افزایش تنش مؤثر وارد بر مخزن ایجاد می شود، در شکل (۶-۱۲) نمایش داده شده است. در طول این سال ها همواره چاه های مخزن در حال تولید بوده اند، بدیهی است این امر کاهش فشار مخزن را به همراه داشته و طبق روابط حاکم تراکم مخزن همواره در حال افزایش خواهد بود. اما بدلیل متغییر بودن نرخ تولید هیدروکربن و تزریق سیال به میدان در این سال ها، میزان افت فشار و به تبع آن میزان تراکم مخزن متغییر خواهد بود. طبق محاسبات انجام شده نرخ تولید متوسط ۵۷۱۸ بشکه در روز، در سال ۲۰۰۰ میلادی باعث تراکم ۱۸٫۸ میلی متری مخزن فلهلیان گردیده است.

جدول ۵-۶ متوسط نرخ تولید هیدروکربن و تزریق سیال در چاه های مخزن

سال	۲۰۰۰	۲۰۰۱	۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷
نرخ تزریق (بشکه در روز)	۰	۰	۰	۰	۰	۵۹۶۴,۴	۱۵۴۹۱,۴	۱۶۴۱۰,۱
نرخ تولید (بشکه در روز)	۵۷۱۸,۷	۴۹۵۴,۸	۴۹۱۰,۳	۴۶۴۳,۱	۴۵۹۹,۵	۴۱۴۲,۲	۳۵۰۵,۸	۳۴۵۱,۷

در سال های بعدی شبیه سازی میزان تولید همواره کاهش می یابد به طوری که متوسط نرخ تولید در سال ۲۰۰۴ میلادی به ۴۵۹۹ بشکه در روز می رسد. این کاهش در تولید، با کاهش میزان تراکم همراه بوده و میزان تراکم مخزن محاسبه شده در این سال به ۱۴,۷ میلی متر می رسد. تغییر نرخ تراکم مخزن از سال ۲۰۰۰ تا انتهای سال ۲۰۰۴ تنها تابعی از تغییرات نرخ تولید هیدروکربن از چاه ها می باشد، اما با شروع تزریق سیال به مخزن در ابتدای سال ۲۰۰۵، نرخ تزریق نیز فاکتوری مهم در تعیین میزان تراکم مخزن خواهد بود. تزریق سیال بدون مخزن با کاهش نرخ افت فشار مخزن از میزان تراکم مخزن نیز خواهد کاست.

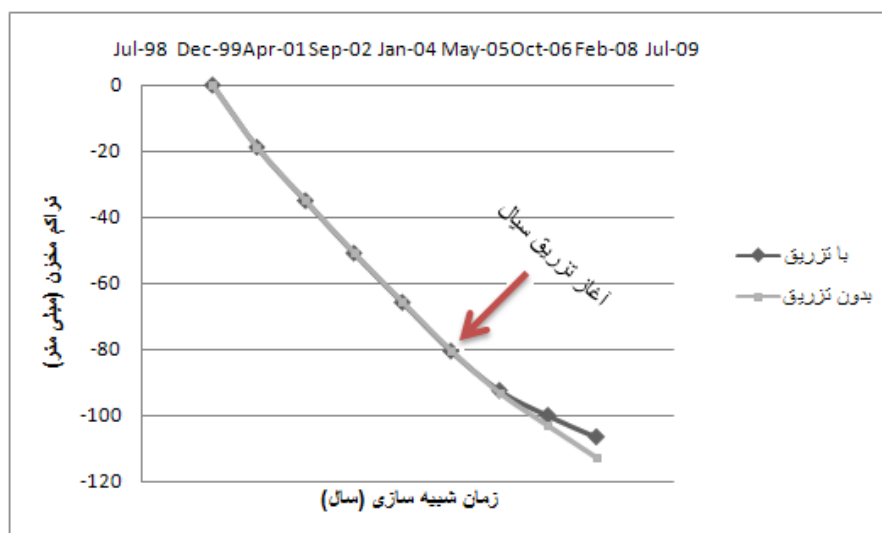


شکل ۶-۱۲ افزایش تراکم مخزن در طول دوره شبیه سازی

بنابراین در سال ۲۰۰۵ عمل تزریق آب به درون مخزن اثری مضاعف بر کاهش نرخ تراکم مخزن دارد. میزان تراکم محاسبه شده در پایان این سال ۱۱,۹ میلی متر می باشد. در سال های پایانی شبیه سازی نرخ تولید نفت از چاه ها به حداقل میزان خود در بازه زمانی شبیه سازی می رسد. همچنین با

توجه به جدول (۵-۶) نرخ تزریق سیال در این سال ها روندی افزایشی دارد، بنابراین میزان تراکم مخزن در این سال ها کمتر از سال های قبل می باشد بطوریکه میزان تراکم در سال ۲۰۰۶، به ۷,۵۶ و در سال ۲۰۰۷ به ۶,۵۲ میلی متر می رسد.

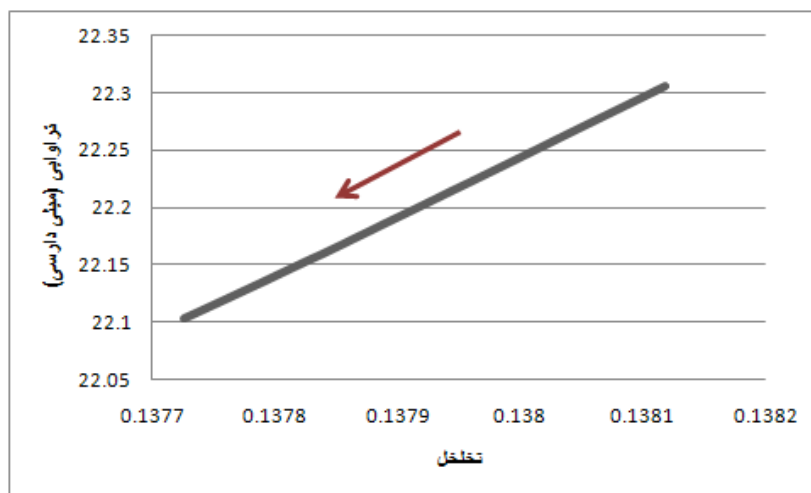
برای درک بهتر نقش تزریق سیال به درون مخزن در حفظ فشار مخزن و جلوگیری از تراکم بیشتر مخزن، ۳ سال پایانی بدون در نظر گرفتن تزریق سیال دوباره مدل سازی می گردد. در شکل (۶-۱۳) نتایج بدست آمده از مدل سازی با در نظر گرفتن تزریق سیال، با حالتی که در آن از چاه های تزریق صرف نظر شده مقایسه می گردد. مجموع تراکم مخزن در این سه سال برای حالت اول (با در نظر گرفتن چاه های تزریق) ۲۶,۰۶ میلی متر و در حالت دوم (بدون در نظر گرفتن چاه های تزریق) ۳۲,۵۵ میلی متر می باشد. بنابراین تزریق سیال، باعث کاهش ۲۰ درصدی تراکم مخزن گردیده است. این میزان با توجه به تعداد کم چاه های تزریقی نسبت به چاه های تولیدی نشان از کارآمدی تزریق سیال به مخزن در جهت حفظ فشار مخزن و جلوگیری از کاهش فشار در مخزن فلهیان دارد. مهمترین دلیل این امر را می توان ویسکوزیته پایین نفت این مخزن (۵,۰ سانتی پواز) دانست.



شکل ۶-۱۳ متوسط تراکم مخزن در محل چاه های مخزن. (۱) با در نظر گرفتن چاه های تزریقی (منحنی تیره رنگ) (۲) بدون در نظر گرفتن چاه های تزریقی (منحنی با رنگ روشن)

در فصل قبل با استفاده از روش تحلیلی نرخ سالانه تراکم ۱,۳۲ سانتی متر محاسبه گردید. بنابراین برای ۸ سال میزان تراکم محاسبه شده با استفاده از این روش برابر با ۱۰,۵۶ سانتی متر می باشد. متوسط مجموع تراکم محاسبه شده در طول این ۸ سال با استفاده از روش عددی در چاه های مخزن برابر با ۱۰,۶۷ سانتی متر می باشد. نزدیکی جواب دو روش کارآیی روش تحلیلی در محاسبه تراکم را تأیید می نماید. البته در روش تحلیلی فرض بر این است که حداکثر تراکم در نتیجه کاهش یکنواخت فشار در سرتاسر مخزن و دقیقاً در مرکز مخزن رخ می دهد، اما روش عددی میزان تراکم را در محل واقعی کاهش فشار مخزن یعنی چاه های مخزن محاسبه می نماید. از آنجایی که ضخامت مخزن در حدود ۳۰۰ متر می باشد، نسبت تراکم مخزن به ضخامت آن کمتر از ۰,۰۵٪ می باشد. بنابراین کرنش قائم در مخزن کمتر از این نسبت بوده و بررسی الاستیک تراکم آن منطقی می نماید.

تغییرات تخلخل و تراوایی مخزن، در نتیجه استخراج هیدروکربن به صورت شکل (۶-۱۴) می باشد. همانطور که در بررسی تغییرات تخلخل و تراوایی چاه مورد مطالعه عنوان شد به دلیل عمق زیاد و خواص ژئومکانیکی سازند مخزن که از جنس سنگ های کربناته تحکیم یافته می باشد، و نرخ پایین تغییر ضخامت مخزن، تغییرات تخلخل و تراوایی مخزن نسبتاً کم می باشد. نکته دیگری که می توان از نتایج بدست آمده استنباط نمود، حساسیت بیشتر تراوایی مخزن به کاهش فشار منفذی و تراکم مخزن می باشد.



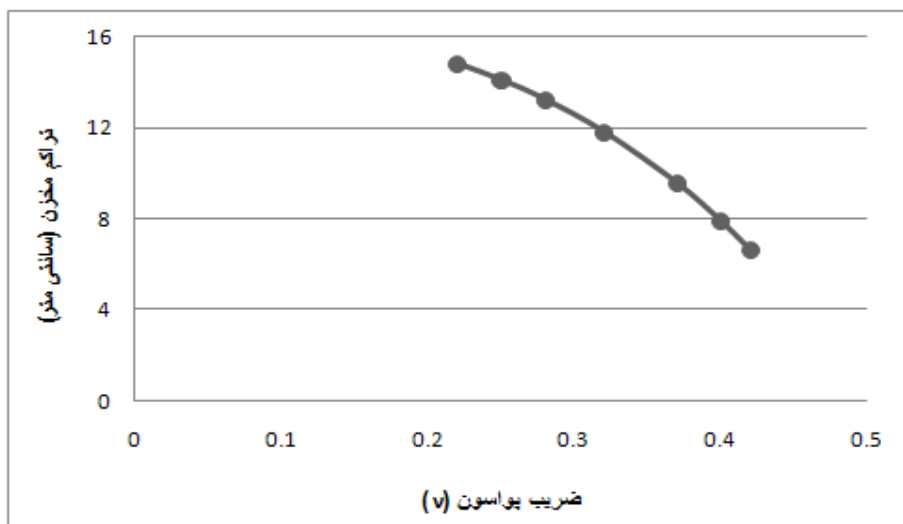
شکل ۶-۱۴ تغییرات تخلخل و تراوایی مخزن، در نتیجه استخراج هیدروکربن

۶-۹ آنالیز حساسیت پارامترهای تأثیرگذار بر شبیه سازی ۶-۹-۱ بررسی تأثیر مدول یانگ و ضریب پواسون بر نتایج مدل سازی

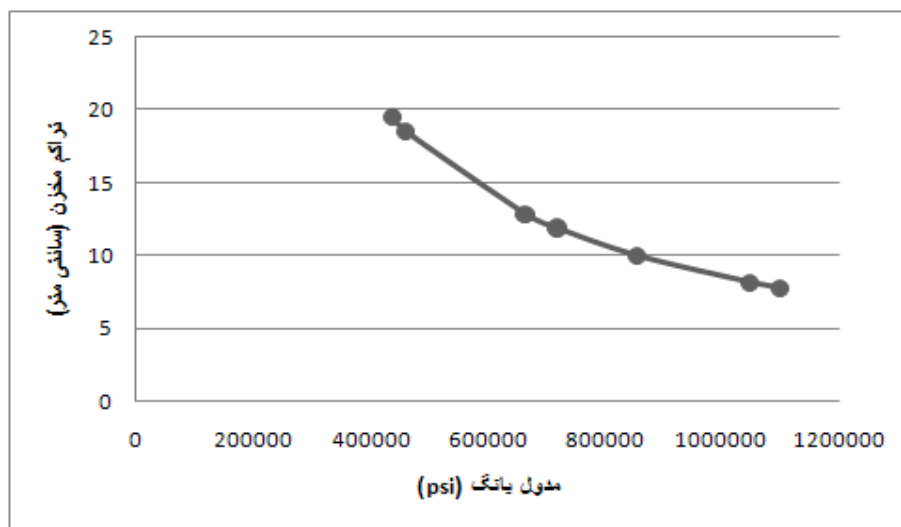
استخراج سیال از مخزن، باعث افت فشار مخزن می گردد این افت فشار باعث افزایش تنش مؤثر می گردد. بنابراین، مخزن تغییر شکل یافته و متراکم می گردد که میزان آن در بخش های قبلی محاسبه گردید. اما میزان تأثیر پارامترهای سنگ در مقدار تراکم بررسی نگردیده است. پارامترهای ژئومکانیکی سنگ مخزن که جهت محاسبه تراکم مخزن در نقاط شبکه اختلاف محدود بکارگرفته می شوند، محیط متخلخل الاستیک خطی را توصیف می نمایند. مدول یانگ (E) و ضریب پواسون (ν) از جمله این پارامترها می باشند. برای بررسی تأثیر این پارامترها بر تراکم مخزن شبیه سازی مخزن را چندین بار با استفاده از مقادیر متفاوت ضریب پواسون و مدول یانگ تکرار می نماییم. شکل (۶-۱۵) کل میزان تراکم مخزن را برای چند مدل مخزن با ضرایب پواسون متفاوت نمایش می دهد. همانطور که در شکل مشاهده می گردد با افزایش ضریب پواسون از ۰,۲۲ به ۰,۴۲ میزان تراکم مخزن از ۱۴,۸ سانتی متر به ۶,۶۲ سانتی متر کاهش می یابد. بنابراین، هرچه ضریب پواسون بالاتر باشد، تراکم مخزن کمتر خواهد بود.

با تغییر مدول یانگ و ثابت نگه داشتن دیگر پارامترها مدل سازی را جهت بررسی تأثیر این پارامتر بر تراکم مخزن تکرار می نماییم. شکل (۶-۱۶) تغییرات تراکم مخزن را به ازای مقادیر مختلف مدول یانگ نمایش می دهد.

مدول یانگ نیز رابطه ای عکس با تراکم مخزن داشته و با افزایش مدول یانگ، تراکم مخزن کاهش خواهد یافت. به عنوان مثال با افزایش مدول یانگ از ۴۳۷۰۵۷ psi به ۱۰۹۸۳۷۴ psi، تراکم مخزن از ۱۹,۵ سانتی متر به ۷,۷ سانتی متر کاهش می یابد. نتایج این بخش باید در طراحی توسعه زیرساخت هایی همچون سکوه های تولید مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۶-۱۵ تغییرات تراکم مخزن به ازای مقادیر مختلف ضریب پواسون

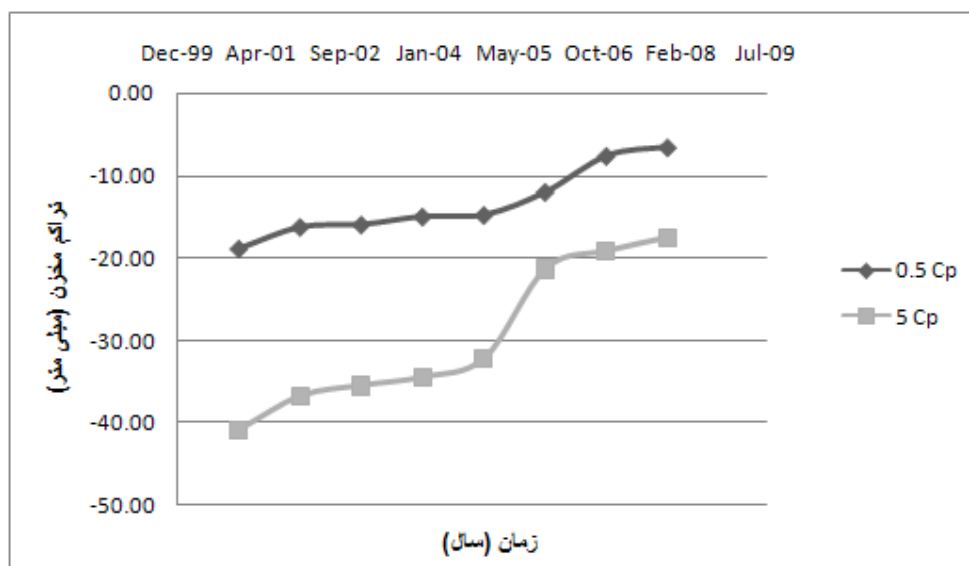


شکل ۶-۱۶ تغییرات تراکم مخزن به ازای مقادیر مختلف مدول یاتنگ

۶-۹-۲ بررسی تأثیر ویسکوزیته بر نتایج مدل سازی

تراکم منجر به فرونشست در سازندهای زیر سطحی میادین نفتی در واقع فرآیند کاهش حجم مخزن است که در رسوبات تحکیم نیافته به هنگام کاهش فشار سیال مخزن بسیار شدید است. اگر با تزریق آب به مخزن نفت بتوان فشار آن را کنترل کرد، می توان از تراکم بزرگ مقیاس جلوگیری

نموده و پایداری مخزن را حفظ کرد. چنانچه ویسکوزیته نفت بسیار بالا باشد تزریق سیال به چاه ها نمی تواند از تراکم محلی چاه های تولید جلوگیری نماید. با این حال تزریق سیال می تواند تا حدودی به کاهش آن کمک نماید (Donaldson et al., 1995). ویسکوزیته نفت مخزن فهلیان ۰,۵ cp می باشد. برای بررسی تأثیر مقدار ویسکوزیته بر نتایج، مدل سازی را بار دیگر و با ویسکوزیته ۵ cp انجام می دهیم. با تغییر ویسکوزیته از ۰,۵ cp به ۵ cp، متوسط تراکم مخزن در محل چاه ها از ۱۰,۶۷ سانتی متر به ۲۳,۷۱ سانتی متر افزایش پیدا می کند. شکل (۶-۱۷) میزان تراکم سالیانه مخزن را برای دو حالت با ویسکوزیته های مختلف مقایسه می کند. همانطور که در بخش های قبلی اشاره شد، تزریق سیال به مخزن در میدان درود علی رغم تعداد کم چاه های تزریق، از نرخ تراکم سالیانه مخزن کاسته است. با توجه به نتایج این بخش می توان یکی از دلایل اصلی تأثیر گذاری تزریق سیال را ویسکوزیته پایین هیدروکربن مخزن دانست.



شکل ۶-۱۷ مقایسه نرخ تراکم سالیانه مخزن برای دو حالت با ویسکوزیته های مختلف

فصل هفتم

نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

۱-۷ نتیجه گیری

در این پژوهش به منظور ارزیابی تراکم و فرونشست ناشی از استخراج هیدروکربن در مخزن فهلیان میدان نفتی درود، از تداخل سنجی تصاویر رادار و مدل سازی های تحلیلی و عددی استفاده گردید. همچنین سایر روش های موجود جهت ارزیابی تغییر شکل مخازن نفتی مورد بررسی قرار گرفتند. به طور کلی نتایج حاصله از پژوهش را می توان به صورت زیر خلاصه نمود.

پس از اخذ تصاویر سنجنده راداری ASAR، مراحل مختلف پیش پردازش تصاویر با استفاده از نرم افزار تخصصی GAMMA صورت گرفت و تداخل نماهای تصاویر جزیره خارگ (بخش خشکی میدان درود) با استفاده از این تصاویر و مدل رقومی ارتفاعی SRTM منطقه تشکیل گردید. بررسی این تداخل نماها نشان می دهد که شرایط اقلیمی حاکم بر منطقه، تبخیر بسیار بالا در خلیج فارس و تراکم زیاد بخار آب، سبب نوفه اتمسفری شدید تصاویر منطقه گردیده و میزان همدوسی تصاویر اخذ شده را که یکی از ملزومات جهت تشکیل تداخل نما می باشد به شدت کاهش داده است. بنابراین بررسی های اولیه نشان از عدم موفقیت تکنیک InSAR در میدان درود داشت. امکان استفاده از روش های جایگزین مانند PS (Permanent Scatterer) بدلیل نبود شبکه نقاط پایه ارتفاعی (Benchmark)، وسعت کم جزیره خارگ در مقایسه با آب های اطرافش، و نبود خشکی و جزیره ای در اطراف آن، وجود ندارد. همچنین امکان پیاده سازی تکنیک های حذف نوفه اتمسفری، بدلیل نبود داده های GPS یا رادیوسوند هواشناسی جهت کالیبراسیون تصاویر MODIS، عملاً ممکن نیست. بنابراین با توجه به مطالب این بخش، می توانیم از نظر علمی بر عدم کارآیی روش تداخل سنجی تفاضلی رادار در تخمین میزان تغییرات سطحی میدان مذکور اذعان نماییم.

مخازن میدان درود شامل قسمت بالایی بخش ماسه ای اهواز (آسماری) و سازند فهلیان (یاماما و منیفا) می باشد. مخزن فهلیان به طور کلی از سنگ آهک دانه متوسط تا دانه درشت متخلخل و با نفوذپذیری بالا تشکیل شده است. با توجه به پارامترهای ژئومکانیکی و عمق سنگ مخزن و با استفاده از نمودار های تجربی Geertsma، سنگ مخزن در رده سنگ های به خوبی تحکیم یافته، و سخت قرار

می گیرد، بنابراین مدل سازی تراکم و فرونشست مخزن با فرض رفتار الاستیک سنگ مخزن، توجیه پذیر بوده و خطای کمتری در مدل وارد می سازد. مدل تحلیلی Geertsma با اعمال تصحیحات Raddish، بر اساس معادلات هسته کرنش مکانیک سنگ، جهت مدل سازی تراکم و فرونشست مخزن استفاده شده است. مدل بکار برده شده حداکثر تراکم در مرکز مخزن را بین سال های ۱۹۶۴ تا ۲۰۰۷، ۵۶٫۹ سانتیمتر محاسبه نمود. با فرض دیسکی شکل بودن مخزن، و با همگن و الاستیک در نظر گرفتن مواد روباره تأثیر تراکم مخزن بر سطح میدان و حداکثر فرونشست آن ۳۰ سانتیمتر محاسبه گردید. نتایج مدل سازی تحلیلی نشان می دهد که نرخ تراکم مخزن تقریباً دو برابر فرونشست سطح میدان می باشد. دلیل این امر نسبت عمق مخزن به گسترش جانبی مخزن بوده و نشانه ای از جابجایی کف میدان به سمت بالا می باشد.

گزارشات مربوط به شکستگی لوله های جداری در مخزن فهلیان و نرخ تراکم نسبتاً بالای مخزن لزوم بررسی دقیق این پدیده و تعیین نقش پارامترهای هیدروژئولوژیکی و ژئومکانیکی مؤثر بر آن را بیشتر می نماید. از یک کد اختلاف محدود، جهت شبیه سازی عددی تغییرات فشار و تراکم مخزن فهلیان میدان نفتی درود، استفاده گردید. با توجه به داده های موجود تولید هیدروکربن و تزریق سیال در مخزن، شبیه سازی در یک بازه زمانی هشت ساله و از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ میلادی انجام شد. متوسط مجموع تراکم محاسبه شده در طول این ۸ سال با استفاده از روش عددی در چاه های مخزن برابر با ۱۰٫۶۷ سانتی متر می باشد. این در حالی است که میزان تراکم محاسبه شده با استفاده از روش تحلیلی برای این ۸ سال برابر با ۱۰٫۵۶ سانتی متر می باشد. از آنجایی که ضخامت مخزن در حدود ۳۰۰ متر است، نسبت تراکم مخزن به ضخامت آن کمتر از ۰٫۰۵٪ می باشد. بنابراین کرنش قائم در مخزن کمتر از این نسبت بوده و بررسی الاستیک تراکم آن منطقی می نماید.

در طول این سال ها همواره چاه های مخزن در حال تولید بوده اند، بدیهی است این امر کاهش فشار مخزن را به همراه داشته و طبق روابط حاکم تراکم مخزن همواره در حال افزایش خواهد بود. اما بدلیل متغییر بودن نرخ تولید هیدروکربن و تزریق سیال به میدان در این سال ها، میزان افت فشار و

به تبع آن میزان تراکم سالیانه مخزن متغییر خواهد بود. تغییر نرخ تراکم مخزن از سال ۲۰۰۰ تا انتهای سال ۲۰۰۴ تنها تابعی از تغییرات نرخ تولید هیدروکربن از چاه ها می باشد، اما با شروع تزریق سیال به مخزن در ابتدای سال ۲۰۰۵، نرخ تزریق نیز فاکتوری مهم در تعیین میزان تراکم مخزن خواهد بود. تزریق سیال، باعث کاهش ۲۰ درصدی تراکم مخزن در سه سال پایانی شبیه سازی گردیده است. مجموع تراکم مخزن در این سه سال با در نظر گرفتن چاه های تزریق ۲۶,۰۶ میلی متر و بدون در نظر گرفتن چاه های تزریق ۳۲,۵۵ میلی متر می باشد. با توجه به نتایج به دست آمده می توان انتظار داشت که با افزایش تعداد چاه های تزریقی در میدان از میزان افت فشار تا حد قابل قبولی کاسته شده و نرخ تراکم مخزن ناچیز گردد.

همان طور که در فصول قبل اشاره گردید تغییر در وضعیت تنش مؤثر مخزن، مشخصات پتروفیزیکی مخزن را تحت تأثیر قرار می دهد. از رابطه تجربی Kozeny-Carmen اصلاح شده جهت مدل کردن تأثیر تغییرات تخلخل بر نفوذپذیری استفاده گردید. نتایج حاکی از کاهش تخلخل و تراوایی مخزن در نتیجه تراکم مخزن بود. حداکثر این تغییرات در محل چاه های مخزن محاسبه گردید. به دلیل عمق زیاد و خواص ژئومکانیکی سازند مخزن که از جنس سنگ های کربناته تحکیم یافته می باشد، و نرخ پایین تغییر ضخامت مخزن، تغییرات تخلخل و تراوایی مخزن نسبتاً کم می باشد. نکته دیگری که می توان از نتایج بدست آمده استنباط نمود، حساسیت بیشتر تراوایی مخزن به کاهش فشار منفذی و تراکم مخزن می باشد.

پارامترهای ژئومکانیکی سنگ مخزن که جهت محاسبه تراکم مخزن در نقاط شبکه اختلاف محدود بکار گرفته می شوند، محیط متخلخل الاستیک خطی را توصیف می نمایند. برای بررسی تأثیر مدول یانگ (E) و ضریب پواسون (ν) بر تراکم مخزن، شبیه سازی مخزن چندین بار و با استفاده از مقادیر متفاوت ضریب پواسون و مدول یانگ تکرار گردید. نتایج حاکی از این بود که تراکم مخزن به ازای مقادیر بالاتر ضریب پواسون کاهش می یابد. مدول یانگ نیز اثری مشابه داشته و با افزایش این پارامتر تراکم مخزن کمتر شد.

همانطور که در بخش های قبلی اشاره شد، تزریق سیال به مخزن در میدان درود علی رغم تعداد کم چاه های تزریق، از نرخ تراکم سالیانه مخزن کاسته است. با توجه به نتایج این بخش می توان یکی از دلایل اصلی تأثیر گذاری تزریق سیال را ویسکوزیته پایین هیدروکربن مخزن دانست. نتایج بررسی حساسیت نتایج به پارامتر ویسکوزیته نشان داد که چنانچه ویسکوزیته نفت میدان درود بالاتر می بود تزریق سیال به چاه ها نمی توانست از تراکم محلی چاه های تولید جلوگیری نماید.

به طور کلی وضعیت عمق مخزن فهلپان به گسترش جانبی آن، پارامترهای ژئومکانیکی مخزن و به طور کلی جنس سنگ مخزن که از نوع سنگ های کربناته تحکیم یافته می باشد، خواص نفتی که از مخزن استخراج می گردد، همچون ویسکوزیته آن، و شرایط تکتونیکی حاکم بر منطقه به گونه ای است که میزان تراکم و فرونشست ناشی از آن، دارای نرخ شدید و بحرانی نمی باشد. اما همین مقدار تراکم و فرونشست نیز می تواند باعث بروز مشکلاتی در تولید نفت از میدان گردد (مانند شکست لوله های جداری در مخزن که موارد متعددی از آن توسط بخش حفاری شرکت فلات قاره گزارش شده است). بنابراین با توجه به میزان تراکم مخزن در اثر تولید هیدروکربن از آن و سعی در کاهش میزان آن می توان از کاهش تخلخل تشکیلات میزبان نفت، کاهش میزان تولید، فعال سازی گسل های موجود در سازند، افزایش لرزه خیزی در منطقه، شکستگی چاه ها، از بین رفتن یکپارچگی ساختار سازند میزبان هیدروکربن و مهاجرت هیدروکربن ها به سمت مناطق و یا سازند های دیگر جلوگیری نمود.

۲-۷ پیشنهادات

- استفاده از روش ناوش تفاضلی GPS جهت ارزیابی نتایج بدست آمده از مدل سازی. از آنجایی که در نقشه برداری به وسیله GPS احتیاجی به وجود خط دید بین دو ایستگاه گیرنده GPS نیست این روش با دقتی قابل قبول، تنها راه نقشه برداری فرونشست سکوه های حفاری درون آب می باشد.

- استفاده از تکنیک InSAR در تشخیص تغییر شکل مخازن نفتی با رطوبت ناچیز، توپوگرافی نسبتاً مسطح و عمق کمتر.
- استفاده از امکانات پایش برجای تراکم در چاه های میدان درود، همچون تیلت متر های سطحی و درون چاهی و انبساط سنج ها.
- بررسی نقش تکتونیک تاقدیس درود در فرآیند تراکم مخزن.
- تکرار شبیه سازی عددی مخزن فهلپان در بازه زمانی طولانی تر و اعمال این روش بر مخزن آسماری، دیگر مخزن میدان درود.
- استفاده از چاه های تزریقی بیشتر به منظور کاهش افت فشار مخزن و جلوگیری از تراکم بیشتر مخزن.
- انجام تست های آزمایشگاهی (ژئومکانیکی) بر روی مغزه های بدست آمده از میدان درود برای بدست آوردن پارامتر های مورد نیاز برای پیاده سازی مدل تغییر شکل Drucker-Prager/Cap جهت مدل سازی پلاستیک و با جزئیات بیشتر میدان.

منابع و مأخذ

الف (منابع فارسی

- خسروتهرانی خ. (۱۳۸۴)، "زمین شناسی ایران"، جلد دوم، چاپ نخست، انتشارات کلیدر، تهران، ص ۱۱۱-۱۱۵ و ص ۲۳۵-۲۴۹.
- زینالی م. (۱۳۸۱)، پایان نامه ارشد: "پهنه بندی زونهای مخزنی سازند آسماری میدان درود با استفاده از سیستم های اطلاعات مکانی (GIS)"، دانشگاه تهران، دانشکده فنی.
- گزارش شرکت نفت فلات قاره شماره زش ۱-۱۳۸۲.
- فولادی مقدم ن. (۱۳۸۸)، پایان نامه ارشد: "پایش میزان فرونشست زمین در میدان نفتی آغاچاری بر پایه تداخل سنجی تفاضلی رادار"، دانشگاه شهید پزشکی، دانشکده علوم زمین.

References:

(ب) منابع انگلیسی

- Addis M.A. (1997), "The stress-depletion response of reservoirs", Proc. SPEATCE, SPE 38720 , pp. 55–65, San Antonio.TX.
- Adham S., Valadan Zoej M. J., Mobasheri M.R., Dehghani M., (2008), "Atmospheric effects removal of asar-derived InSAR products using meris data and GPS", Remote sensing and spatial information science, pp 151-156, Beijing.
- Allen D.R. and Mayug, M.N., (1969), "The mechanics of compaction and rebound, Wilmington Oilfield Land Subsidence", IASH-UNESCO, pp410-413, Tokyo.
- Allen D.R., Chilinger G.V., Mayuga M.N. and Sawabini C.T., (1971), "Studio eprevisione della subsidenza", Enciclopedia della Scienza e della Tecnica, pp 281-292, Milan.
- Beamer A., Bryant I., Denver L., Mead P., Rossi D. and Sharma S., (1998), "From Pore to Pipeline, Field Scale Solutions", Oilfield Review. summer, pp.1-62.
- Behrenbruch P. and Biniwale S., (2005), "Characterisation of classic depositional environments and rock pore structure using the Carmen_Kozeny equation, Australian sedimentary basins". **Journal of Petroleum science and engineering**.
- Bissell H.J., (1970), "Realms of Permian tectonism and sedimentation in western Utah and eastern Nevada", **Assoc. Pet. Geol**, No 54, pp 285-312.
- Brun L., Hilbert J. R., (2003), Reservoir compaction, subsidence and well damage, pp 321-374, In: "**Numerical analysis and modeling in geomechanics**", Bull J. W., Spon Press, London.
- Bruno M.S. (1992), "Subsidence-induced well failure", SPE Drilling Engineering June, pp148-152.
- Bull J. W. (2003), "**Numerical analysis and modelling in geomechanics**", Vol. 1, Spon Press, London, pp 323.
- Burgmann R., Rosen P.A. and Fielding E.J., (2000), "Synthetic Aperture Radar Interferometry to measure earth surface topography and its deformation", **Annu.Rev.Earth Planet.Sci**, Vol.28, pp.169-209.

- Chilingar G.V., Yen T.E, Rieke, H.H.and Fertl W.H., (1983), “Compressibilities of sands and clays”, pp. 25-32, In: “**Proceedings of 1982 Forum on Subsidence due to Fluid Withdrawals**”, Donaldson E.C. and Van Domselaar H. (Editors), U.S. DOE, Bartlesville Energy Technology Center, Bartlesville, Okla.
- Chilingarian G.V. and Wolf K.H.,(1975), “**Compaction of Coarse-Grained Sediments**”, I. Elsevier, Amsterdam, pp 552.
- Chrzanowski A., Szostak-Chrzanowski A. and Forrester D.J., (1998), “100 years of subsidence studies”, Proceedings of the 100th Annual Meeting of CIM, Montreal.
- Chrzanowski A., Szostak-Chrzanowski A. and Ortiz E., (2006),”Modeling of ground subsidence in oil Fields”, **Technical science**, No 9. pp 133-146.
- Currie J.B., (1967), “Evolution of stress in rocks of a sedimentary basin”, pp. 41-51, In: **Rock Mechanics in Oilfield Geology**, Drilling and Production. Proceedings World Petroleum Congres. Mexico City, Elsevier, Amsterdam.
- Dallmus K.E, (1958), “Mechanics of basin evolution and its relation to the habitat of oil in the basin”, pp (883-931), In: **Habitat of Oil**, Weeks L.C. (Editor), Am. Assoc. Pet. Geol., Tulsa, Okla.
- Danklmayer A., Archibald E., Boerner T., Hounam D., Chandra, (2004), “Atmospheric effects in the application of SAR Interferometry”, EUSAR, pp 89-93.
- Donaldson E.C., Kendall R.E, Pavelka E.A. and Crocker M.E., (1980),. “Equipment and Procedures for Fluid Flow and Wettability Tests of Geological Materials”, DOE/BETC. NTIS, 40 pp, Springfield.
- Donaldson E.C., Civan E and Alam M.W.U., (1988). “Relative permeability at reservoir conditions”. **Soc.Pet. Eng., Res. Eng.**, pp1323-1327.
- Donaldson E.C. and van Domselaar H., (1983), “Subsidence Due to Fluid Withdrawal”, Proceedings of 1982 Joint DOE-Venezuelan Forum on Subsidence. CONF-821199, 141 pp, Springfield.
- Donaldson E.C., Chilingarian G.V., and Yen T.F., (1995), Simulation of reservoir compaction due to fluid withdrawal, pp. 425-438, In: ”**Subsidence due to fluid withdrawal**”, G.V. Chilingarian, I. Elsevier, Amsterdam.

- Dorood field structural update, (1999), internal report, Iran Offshore Oil Company, Research and Development Dep.
- Dung Q., (2007), PhD. Thesis, “Coupled fluid flow-geomechanics simulation applied to compaction and subsidence estimation in stress”, Australian School of Petroleum, university of Adelaide.
- Dusseault M.B., (1983), “Identifying reservoirs susceptible to subsidence due to fluid withdrawal”, pp. 25-32, In: **Proceedings of 1982 Forum on Subsidence due to Fluid Withdrawals**, Donaldson E. and van Domselaar H, U.S Energy Technology Center, Bartlesville, Okla.
- Eclipse (2005), Simulation software Manuals 2005 A, Schlumberger.
- Evans R.D., (1983), “Fluid withdrawal from an anisotropic compressible porous media”, pp 25-32, In: **Proceedings of 1982 Forum on Subsidence due to Fluid Withdrawals**, Donaldson E.C. and Van Domselaar H. (Editors), U.S. DOE, Bartlesville Energy Technology Center, Bartlesville, Okla.
- Fatt I., (1958), “Pore volume compressibility of sandstone reservoir rocks”, **J. Pet. Technol.**, 10, 3, pp 64-66.
- Ferretti A., Ferrucci F., Prati C. and Rocca F., (2000), “SAR analysis of building collapse by means of the permanent scatterers technique”, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium—IGARSS, pp 3219–3221, Honolulu, USA.
- Fielding E. J., Blom R. G. and Goldstein R., (1998), “Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry”, **Geophysical research letters**, Vol. 25, No.17, pp. 3215-3218.
- Fokker P. A. (2002), “Subsidence prediction and inversion of subsidence data”, SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Irving, Texas.
- Fokker P. A. and Orlic B. (2006), “Semi-analytical modeling of subsidence”, **Mathematical Geology**, 38, 5 , pp 565-589.
- Fredrich J. T., Arguello J. G., Deitrick G. L. and de Rouffignac, E. P. (2000), “Geomechanical modeling of reservoir compaction”, surface subsidence, and casing damage at the belridge diatomite field, SPE Reservoir Evaluation and Engineering, pp 348–359.

- Ge L., Rizos C., Han, S. and Zebker H.A., (2001), “Mining subsidence monitoring using the combined InSAR and GPS approach”, 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, CA, USA.
- Geertsma J., (1957), “The effect of fluid pressure decline on volumetric changes of porous rocks”. **Trans.Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.**, No210 pp 331-340.
- Geertsma J., (1966), “Problems of Rock Mechanics in Petroleum production Engineering”, 1st Cong. of the Intl. Soc. Of Rock Mech, I, 585 Lisbon.
- Geertsma J.(1973a), “A basic theory of subsidence due to reservoir compaction”, the homogeneous case, *Verhandelingen van het Koninklijk geologisch mijnbouwkundig Genootschap*, pp.43–62, Netherland.
- Geertsma J. (1973b), “Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs”, **Journal of Petroleum Technology**, pp. 734–744.
- Geertsma J. and van Opstal, G. (1973), “A numerical technique for predicting subsidence above compacting reservoirs, based on the nucleus of strain concept”, *Verhandelingen van het Koninklijk geologisch mijnbouwkundig Genootschap*, pp. 63–78, Netherland.
- Hanssen R.F., (2001), “**Radar Interferometry: Data interpretation and Error Analysis**”, Vol.2, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 197-244.
- Hejmanowski R. and Sroka A. (2000), “Time-space ground subsidence prediction determined by volume extraction from the rock mass”, *Proceedings of the Sixth International Symposium on Land Subsidence (SISOLS 2000)*, pp. 367–375, Ravenna, Italy.
- Holt R. M. (1990), “Permeability Reduction Induced by a Nonhydrostatic Stress Field”, **SPE Formation Evaluation**, Vol 5, No 4, pp. 444-448.
- ITC, (1990), “**Principles of remote sensing**”, ITC core module, version 1, Enschede, Netherlands.
- Kenter C.J., Blanton T.L., Schreppers G.M.A., Baaijens, M.N., and Ramos, G.G., (1998) “Compaction study for the Shearwater Field”, **SPE/ISRM. Rock Mechanics in Petroleum Engineering**, Norway, No 47280, pp 63–68.
- Knothe S., (1953), “**Rate of advance and ground deformation**”, *Bergakademie*, 5(12), pp 513-518.

- Li Z., Muller J, Cross P., Fielding E., (2005), “InSAR atmospheric correction”, *J.Geophys. Res.*, 110, B03410.
- Lofgren B.E. and Klausing R.L., (1969), “Land subsidence due to ground-water withdrawal”, **Tulare-Wasco area, California US. Geol. Sum.**, 437B, pp 103.
- Lyons S., and Sandwell, D., (2003), “Fault creep along the southern san andreas from interferometric synthetic aperture radar”, **J. Geophys. Res.**, 108(b1), 2047.
- Mahafza B.R., (2000), “**Radar system analysis and design using matlab**”, **Chapman & Hall/CRC**, Florida, chapter 12&13.
- Martin J.C and Serdengecti, S. (1984), Subsidence over oil and gas reservoirs, pp 23-34, In: “**Man induced land subsidence**”, Holzer T.L, geology society of america.
- Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F. and Peltzer G., (1993),” The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry”, **Nature**, Vol. 364, pp.138-142.
- Maxwell S.C. et al., (1998), “Microseismic logging of the Ekofisk reservoir”, *Proc. SPE/ISRM rock mechanics in petroleum engineering*, Trondheim, Norway.
- Mayuga R.F., (1970),”Geology and development of California giant; the Wilmingtonoil field”, **Geology of Giant Petroleum Fields**, Vol.14,pp158-184.
- McCann G. D. and Wilts C. H. (1951), “A Mathematical Analysis of the Subsidence in the Long Beach-San Pedro”, internal report, california institute of Technology, Pasadena.
- Mindlin R. D. and Cheng D. H., (1950), “Thermo-Elastic Stress in the Semi-Infinite Solid”, **J. Applied Phys.**, 21, 931.
- Morita N., Whitfill D.L., Nygaard O. and Bale A., (1988). “A quick method to determine subsidence, reservoir compaction, and in situ stress induced by reservoir depletion”, *Society of Petroleum Engineers Formation Damage Control Symposium*, pp 73-84, Bakersfield, Calif.
- Motagh M., Djamour Y., Walter T., Wetzel H., Zschau J., (2007), “Monitoring of land subsidence in mashhad valley”, *Envisat symposium*, Montreux, Switzerland.

- Nagel N.B., (2001): “Compaction and Subsidence issues within the petroleum industry from Wilmington to Ekofisk and beyond”, **Phys.Chem.Earth (A) .Elsevier Science**, Vol.26, No.1-2, pp.3-14.
- Patillo P.D., Kristiansen Sund G.V., and Kjelstadli R.M., (1998), “Reservoir compaction and seafloor subsidence at Valhall”, **SPE/ISRM. Rock Mechanics in Petroleum Engineering . Norway**, No. 47274, pp 377– 386.
- Petrat L. and Al-Enezi A., (2006), “Monitoring oil field-induced subsidence using satellite based radarinterferometry”, GEO Middle East Conference and Exhibition, Bahrain.
- Prokopovich N.P., (1978), ”Genetic classification of land subsidence”, Evaluation and Prediction of Subsidence. Engineering Foundation Conference pp. 389-399, New York.
- Prokopovich N.P., (1983), “Tectonic framework and detection of aquifers susceptible to subsidence”, pp. 25-32, In: **Proceedings of 1982 Forum on Subsidence due to Fluid Withdrawals**, Donaldson E. and van Domselaar H., U.S.Energy Technology Center ,Bartlesville, Okla.
- Raghavan R. and Miller EG., (1975), Mathematical analysis of sand compaction, pp.403-524, In: “**Compaction of Coarse-Grained Sediments**”, G.V. Chilingarian and K.H. Wolf (Editors), I. Elsevier, Amsterdam.
- Reddish D.J., Yao X.L., Waller M.D., (1994), “Computerised prediction of subsidence over oil and gas fields”, Eurock SPE/ISRM Rock Mechanics in petroleum engineering conference,pp 621-630, Delft, Netherlands.
- Richards J. A., (2009), “**Remote sensing with imaging radar**”, Springer, Heidelberg. Germany, pp 181-208.
- Rieke H.H. III, Ghose S., Fahhad S. and Chilingar G.V., (1969), Some data on compressibility of various clays, pp.817-828, In:“**Proceedings International Clay Conference**”, Israel University Press, Jerusalem.
- Rieke H.H. III and Chilingarian, G.V., (1974), “**Compaction of Argillaceous Sediments**”, Elsevier, Amsterdam, pp 424.
- Roberts J.E., (1969) “Sand compression as a factor in oil field subsidence”, Symposium on Land Subsidence IASH/UNESCO, pp368-376, Tokyo.

- Roberts J.E. and De Souza, J.M., (1958) "The compressibility of sands", **Proc. ASTM**, No 58, pp 1269-1277.
- Saif U. D., Al-Dousari A., Al-Ghadban A., Aritoshi M., (2005), "Use of interferometric techniques for detecting subsidence in the oil fields of Kuwait using Synthetic Aperture Radar Data" **Journal of petroleum science**, 5, pp1-10
- Sawabini C.T., Chilingar G.V. and Allen D.R., (1974). "Compressibility of unconsolidated arkosic oil sands" **Soc. Pet. Eng. J.**, No14, pp 132-138.
- Sen B. (1950), "Note on the Stress Produced by nuclei of Thermoplastic Strain in a Semi-Infinite Elastic Solid", **Quarterly Applied Math**, 8, 635.
- Sharp J.M. Jr., (1974), "An Investigation of Energy Transport in Thick Sequences of Compacting Sediments", PhD. thesis, University of Illinois, Urbana.
- Sharp J.M. Jr., (1976), "Momentum and energy balance equations for compacting sediments", **Math. Geol.**, No 8, pp 305-322.
- Shokir E., Alshughayer E., Alateegh A., (2006), "Permeability estimation from well log response", **canadaian. Pet. Tech. J.**, vol 45, No 11, pp 41-46.
- Smith E.K., and Weintraub S., (1953), " the constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies", **Proc.IRE**, 41, pp 1035-1037.
- Smith J.E., (1971a), "Shale compaction", **Soc. Pet. Eng. J.**, No 13 pp 12-22.
- Smith J.E., (1971b), "The dynamics of shale compaction and evolution of pore-fluid pressures" **Math.Geol.**, No 3, pp 239-263.
- Smith J.E., (1977), "Thermodynamics of salinity changes accompanying compaction of shaly rocks", **Soc.Pet. Eng. J.**, No17, pp 377-386.
- Sroka A. and 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.
- Stein A. and Zhou Y., "Use of geostatistics to integrate interferometric sar data with leveling measurement of land subsidence", 7500 AA Enschede, the netherlands.

- Teeuw D., (1973), "Laboratory Measurements of Compaction Properties of Groningen Reservoir Rock", *Verhandelingen Koninklijk Geologisch Mijnbouwkundig Genootschap*, 2S, pp 19, Netherland.
- Terzaghi K. (1923), "**Theoretical Soil Mechanics**", John Wiley, New York.
- Van der Knaap W. and Van der Vlis, A.C., (1967), On the cause of subsidence in oil-producing areas, *Proceedings of 7th World Petroleum Congress*, pp85-95, Mexico.
- Van der Kooij M.W.A. and Mayer D., (2002), "The application of satellite radar interferometry to subsidence monitoring in the Belridge and Lost Hills fields, California", **Geoscience and Remote Sensing Symposium**. IGARSS apos; 02. 2002 IEEE International, Vol.1, pp.201-202.
- Wegmüller U., Werner, C., Strozzi, T. and Wiesmann, A., Santoro, M., (2006b), GAMMA SAR and interferometry software, *GAMMA Remote Sensing*, 4 pages.
- Whittaker B.N and Reddish D., (1989), "**Subsidence occurrence, prediction and control**", vol 56, Elsevier, Amsterdam, pp475-488.
- Wicks C., Tatcher W. and Dzurisin D., (1998), "Migration of fluids beneath Yellowstone caldera inferred from satellite radar interferometry", **Science direct**, Vol.282, 17 pages.
- Thompson T. W. and Gray K.E., (1983), "Reservoir mechanics for geopressured-geothermal reservoirs", pp.25-32, In: **Proceedings of 1982 Forum on Subsidence due to Fluid Withdrawals**, Donaldson E.C. and Van Domselaar H. (Editors), U.S. DOE, Bartlesville Energy Technology Center, Bartlesville, Okla.
- Tiab Dj., Donaldson E., (2004), "**Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties**", second edition, elsevier. Gulf professional publishing, U.S, pp 105-193.
- Zebker H.A., Rosen P.A. and Hensley S., (1997) "Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps", **J. Geophys. Res.**, Vol 102 (B4), pp 7547-7563.

پیوست

**تکنولوژی آشکارسازی و پایش اثرات فرونشست
و تراکم مخازن هیدروکربن**

A-1 مقدمه

تکنیک های مختلفی جهت نظارت بر آشکارسازی و پایش اثرات تراکم و فرونشست مخازن هیدروکربور وجود دارند که از جمله این تکنیک ها می توان از مدل سازی های تحلیلی و عددی، تست های آزمایشگاهی بر روی نمونه های سنگ، ارزیابی تغییر شکل لوله جداری و پایش زیر سطحی و برجای تراکم بر اساس تکنیک های ژئوفیزیکی کابلی¹، استفاده از GPS و استفاده از تداخل سنجی تصاویر رادار نام برد. تکنیک تداخل سنجی رادار و انواع مدل سازی های تحلیلی و عددی در فصل های ۴ تا ۶ مورد بررسی قرار گرفته اند، در این بخش مروری بر سایر روش هایی که در مخازن مختلف جهت پایش تراکم و فرونشست مورد استفاده قرار گرفته اند، خواهیم داشت.

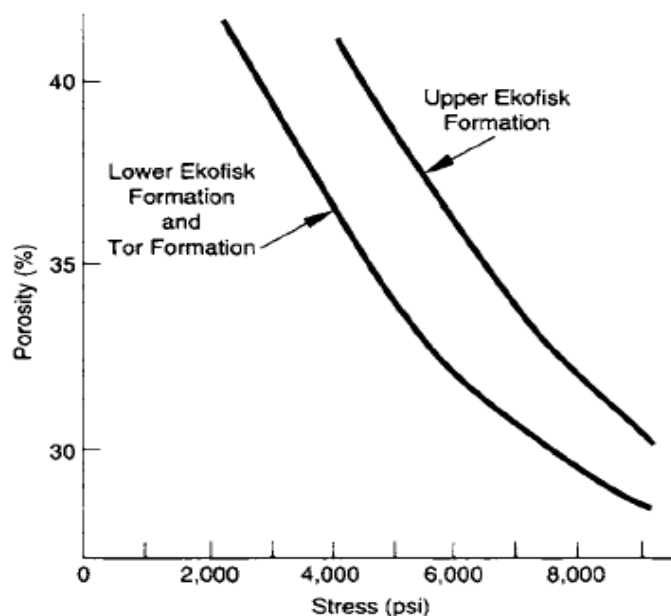
A-2 تست های مغزه

برای اینکه روش های مورد استفاده جهت شبیه سازی تخمین دقیق تری از میزان تراکم و فرونشست سطح ارائه دهند و به منظور توصیف رفتار تراکمی انواع سنگ های موجود در مخزن و شبیه سازی همه شرایطی که این سنگ ها ممکن است مواجه شوند، وجود اطلاعات عددی کافی و پارامترهای دقیق الزامی است. به عبارت دیگر شرایط تست، تنش، دما و اشباع شدگی سیال را شبیه سازی می نماید.

تست های آزمایشگاهی تراکم شامل تست کرنش تک محوره و تست هیدرواستاتیک می باشد (Johanson, 1988). در تست هیدرواستاتیک، تنش های محوری و شعاعی یکسان بوده و مغزه نمونه در پاسخ به تنش وارد شده در همه راستاها تغییر شکل خواهد یافت. اما تست آزمایشگاهی که رفتار تراکمی بیشتر سنگ های مخزن را شبیه سازی می کند، تست کرنش تک محوره می باشد. در این تست تنش محوری وارد بر نمونه سنگ افزایش می یابد و تنش شعاعی طوری تنظیم شده است که شعاع نمونه مغزه در طول انجام تست ثابت باقی بماند. به عبارت دیگر در این آزمایش، نمونه های سنگ به صورت محوری فشرده شده و تغییر شکل شعاعی آنها صفر می باشد.

¹ Geophysical wireline techniques

Smits و همکارانش (1986) مشاهده نمودند که منحنی های تراکم تخلخل - تنش نوع معینی کالک^۱ در ناحیه فروپاشی^۲ خلل وفرج به یک مقدار مشخص همگرا می باشند، ولو اینکه مقدار تخلخل اولیه نابرابر داشته باشند. به عنوان مثال درون سازند کالک Ekofisk همانطور که مورد انتظار بود دو نوع کالک غنی از کوارتز و کالک کم کوارتز رفتار ژئومکانیکی متفاوتی تحت فشار و در حالت تراکم نشان می دهند، شکل (۱-A).



شکل ۱-A رابطه میان تنش و تخلخل مخازن کالک Ekofisk (Johnson et al., 1988)

A - ۳ تکنیک های پایش فرونشست

فرونشست پلتفرم های Ekofisk در اواخر سال ۱۹۸۴ شناسایی شد (Danielse and Sulak, 1988) چندین برنامه مطالعاتی جهت مشخص نمودن شکل کاسه فرونشست همچنین تاریخچه فرونشست و نرخ فرونشست در کف دریا از همان تاریخ شروع به کار کرد (Mes and Rentsch, 1988). فرونشست کل از پیمایش های خط لوله^۳ و ژرفاسنجی^۱ به همراه اندازه گیری های فاصله هوایی^۲ (تغییر ارتفاع

^۱ chalk

^۲ collapse

^۳ Pipeline survey

پلتفرم نسبت به متوسط سطح دریا) بدست آمد. نرخ فرونشست از اندازه گیری سطح آب توسط رادار و GPS (پیمایش ماهواره ای) حاصل شد.

A-4 تکنیک های ارزیابی تغییر شکل لوله جداری چاه

دلیل شکست جداره چاه می تواند یکی از این موارد باشد: (۱) تخلیه مخازنی که در ابتدا تحت فشار مضاعف و در حال تراکم بودند (۲) حرکت قائم و یا جانبی نمک (۳) شرایط یخبندان دائم (۴) زلزله. شناسایی مکانیسم واقعی شکست بسیار مشکل است، زیرا غالباً مکانیسم های شکست متفاوتی وجود دارند. به طور کلی این مکانیسم ها به دو بخش اصلی تقسیم می شوند: (۱) ناپایداری ساختاری (پیچش محوری نوع اولر) (۲) انواع شکستگی هایی که به دلیل مقاومت ذاتی لوله اتفاق می افتد (کلاپس و تسلیم محوری).

Yodovich (1988) شکستگی لوله جداره میدان Ekofisk را در سازند مخزن هیدروکربن، همچنین فواصل بالایی (با حداکثر تمرکز در فاصله ۴۰۰ تا ۹۰۰ فوت بالای مخزن) بررسی کرد. شکست جداره در محدوده مخزن تأثیر محسوسی بر تولید نداشت، در حالی که تغییر شکل لوله جداری در لایه های بالایی مخزن باعث نشت لوله جداری یا لوله استخراج و یا هر دو شده بود.

Yodovich (1988) یک رابطه آماری بر اساس کرنش افزایشی چاه های مجاور^۱ و زاویه انحراف چاه ارائه نمود که می تواند شکست لوله جداری در Ekofisk را پیش بینی کرده و احتمال شکست چاه برای یک چاه منفرد را به عنوان تابعی از زمان تخمین بزند. در جدول (A-1) زمان متوسط پیش از شکست برای چهار سایز متفاوت لوله جداری/آستری تولیدی غیر هم محور، به طور خلاصه آورده شده است. تجربه نشان داده است که حفاری با زوایای بالاتر و استفاده از لوله هایی با قطر بیشتر میزان شکست چاه را کاهش می دهد.

¹ Bathymetry

² Air-gap measurements

³ Near-well incremental strain

از آنجایی که سختی محوری جداره بیش از سختی محوری سازند است، رشته جدار تحت همان باری که باعث تراکم سازند می گردد، متراکم نخواهد شد. این بدان معناست که سازند به وسیله لوله جداری در مجاورت چاه خالی از بار^۱ خواهد شد. بدلیل ضعیفتر بودن مقاومت اتصال لوله - سیمان یا سیمان - سازند انتقال بار در این قسمت ها متوقف شده و بار در این نقاط متمرکز خواهد شد. بنابراین نیروی برشی در امتداد این دو فصل مشترک می تواند باعث جابجایی نسبی یا لغزش اصطحاکایی گردد.

لاگ های طوقه لوله جداری^۲ (CCL) در چندین چاه Ekofisk بکار برده شدند و شواهد غیر مستقیمی مبنی بر وقوع لغزش، فراهم کردند. به روش مشابه پایش فرونشست و تراکم در میدان California, Long Beach, Wilmington و در مخازن Permian Rotligendes که در Groningen هلند واقع شده، با استفاده از CCL انجام گرفته است (Allen, 1969).

Deלוos (1973) مشاهده نمود که در مراحل آخر تراکم، هنگامی که کوتاه شدگی لوله جداری بیشتر از ماکسیمم تغییر شکل الاستیک لوله جداری می شود، جابجایی های طوقه دیگر معرف جابجایی سازند نیست.

جدول A - ۱ زمان متوسط پیش از شکست برای لوله های غیر هم محور جداری/آستری تولیدی (Yudovich et al., 1988)

Casing	Mean time before failure (months)	
	Ekofisk	Eldfisk
3.5 in 9.2 lb/ft	2	-
5 in 18 lb/ft	16	28
7 in 29 lb/ft	91	52
7 in 35 lb/ft	102	-

¹ Unloaded

² Casing collar logs

جدول ۲-A مقایسه لاگ های طوقه یاب جداره در میدان Ekofisk (Yudovich et al., 1988)

Well	Well angle	Time elapsed between logs (months)	Length change (ft)	Length of reservoir interval (ft)
2/4A-2	24	26	0	420
2/4A-5	28	24	0	363
2/4A-7	7	48	0	403
2/4A-7A	7	21	0	474
2/4A-11	28	12	+1	574
2/4A-12	42	71	+2	438
2/4B-6	34	104	-2	650
2/4B-18	18	79	-1	529
2/4B-21	36	41	0	616
2/4B-22	17	74	-1	581
2/4B-23	21	50	-3	447
2/4C-1	40	113	-3	449

لاگ های قطرسنج^۱ به عنوان آشکارساز تغییر شکل می توانند به مشخص نمودن مکانیسم های شکست لوله جداری کمک بکنند. به عنوان مثال قطرسنج های چند انگشتی^۲ (MFC) از چندین بازوی حسگر جهت اندازه گیری شعاع درونی جداره چاه استفاده می شوند. بازوها به طور مستقل شعاع را حول محیط درونی جداره اندازه گیری می نمایند. شعاع های ماکسیمم و مینیمم توسط دستگاه ثبات در سطح، ثبت می شوند و بدین طریق این دستگاه درجه غیر مدور بودن لوله جداری را ارزیابی می نماید.

MFC ها بسته به اندازه دستگاه دارای ۴۰ تا ۶۰ بازوی حسگر می باشند. در طول عملیات، دستگاه قطر سنج در مرکز چاه متمرکز می شود و تمامی بازوهای حسگر از بدنه دستگاه به سمت خارج باز شده و با دیواره جداره چاه تماس برقرار می کنند. در دستگاه کالیپر دو کانال انتقال اطلاعات توسط کابل های فولادی به نام های کوچکترین شعاع داخلی اندازه گیری شده و بزرگتری شعاع داخلی اندازه گیری شده، طراحی شده است. هر یک از بازوی های حسگر می توانند به هر دوی کانال های ارتباطی تأثیرگذار باشند. در نتیجه بازوی حسگری که کمترین مقدار را اندازه گیری کرده پاسخ کانالی که کوچکترین شعاع را انتقال می دهد مشخص می کند و بازویی که بیشترین مقدار را اندازه

¹ Caliper logs

² Multi-Finger Caliper

گیری کرده پاسخ کانالی که ماکسیمم شعاع را انتقال می دهد، معین می سازد. بالاترین و کمترین شعاع توسط دستگاه ثبات، ثبت می شوند.

یک لاگ MFC ممکن است در دو فرمت نمایش داده شود: (۱) اثر^۱ سمت چپ ماکسیمم شعاع اندازه گیری شده و ثبت شده می باشد که از راست به چپ افزایش می یابد (۲) اثر سمت راست که در آن مینیمم شعاع اندازه گیری شده از چپ به راست افزایش می یابد. طوقه های لوله جداری باعث افزایش هر دو شعاع شده و به صورت منظم بر روی اثرها ظاهر می شوند.

نوع دیگری از لاگ های قطر سنج چند انگشتی بالاترین و کوچکترین شعاع ثبت شده را در کنار هم نمایش می دهد که از چپ به راست افزایش می یابد. دو خط چین قائم نیز رسم شده اند. خط چین سمت چپ شعاع داخلی جداره و خط چین سمت راست شعاع خارجی جداره را نشان می دهد، که توسط خصوصیات API مشخص می شود.

اثر خط مینیمم شعاع و اثر خط چین ماکسیمم شعاع ثبت شده می باشد. چنانچه جداره ساییده و فرسوده نشده باشد، هر دو اثر به خط چین سمت چپ نزدیک خواهند بود. در صورتی که لوله جداری مقطعی و جزئی ساییده شده باشد، اثرها در میانه خط چین ها ظاهر خواهند شد و چنانچه جداره شدیداً فرسوده و ساییده شده باشد، هر دو اثر نزدیک به خط چین سمت راست ظاهر می شوند. معمولاً طوقه های جداره به صورت منظم باعث برآمدگی جزئی اثر به سمت راست ماکسیمم و مینیمم شعاع ها می گردند. کشش کابل فولادی به صورت اثر دست راست مشخص می باشد.

A-۵ پایش برجای تراکم

پایش تراکم مخزن درون لوله جداری، بوسیله چندین روش امکان پذیر است. به عنوان مثال، پایش فشردگی در میدان Ekofisk با بررسی و آنالیز لاگ های نوترون صورت گرفت (Meghini, 1988). به منظور مشخص نمودن جابجایی هایی که با گذشت زمان صورت پذیرفته، ویژگی های سازند که از دو لاگ متفاوت از یک چاه بدست آمده اند، مقایسه می شوند. علاوه بر این

¹ Trace

کار بین لاگ های نوترون اصلاح شده^۱ که از چاه اولیه و چاه های کنارگذر^۲ بدست می آیند، نیز مقایسه صورت می گیرد.

همچنین داده های تراکم میدان Ekofisk که بر اساس مقایسه لاگ های جذب نوترون ضربه ای^۳ (PNC) با هرکدام از لاگ های نوترون اصلاح شده مبنا یا نوترون پالسی بدست آمده اند، در جدول (A-۳) آورده شده است.

برای اولین بار پتانسیل لاگ های جذب نوترون پالسی (PNC) به عنوان دستگاه پایش و آشکارسازی فشارهای مضاعف، تهی شدگی و کم فشار شدن پشت جداره چاه توسط Fertl و Timko (1970)، همراه با مثال های موردی از میدان ارائه شد. این نویسندگان به وضوح نشان دادند که مقادیر Σ در رسوبات آواری که به صورت طبیعی متراکم شده اند به طور منظم با عمق کاهش می یابد در حالی که رسوبات با فشار مضاعف با واگرایی از روند Σ در تراکم نرمال به سمت مقادیر بالاتر، مشخص می شوند. Σ مقطع عرضی ماکروسکپی از جذب نوترون حرارتی می باشد.

بنا به نظر Fertl (1976) لاگ های PNC در پایش برجای تراکم دارای چندین کاربرد می باشند که از جمله آنها می توان به این موارد اشاره نمود: (۱) ایجاد نمایشی کمی از توزیع سیال و تغییرات اشباع شدگی در مخزن مورد نظر، با گذشت زمان (۲) در ارزیابی فشار سازند کاربرد دارد، و می تواند درون چاه های جداره گذاری شده و لوله های حفاری به ارزیابی و شناسایی تغییرات فشار بپردازد و (۳) کمک در بررسی مشکلات خاص مخزن، به عنوان مثال، در بلوک های مجاور گسل با برقراری ارتباط به تخلیه زون های موردبهره برداری^۴ به وسیله چاه ها کمک می کند، همچنین بررسی تغذیه سفره های آب زیرزمینی با نفت و دوباره تحت فشار قرار گرفتن این سفره ها توسط زون های تحت فشار مضاعف مجاور از جمله این کاربردهاست. چنین مشاهداتی در مهندسی مخزن، هنگام حفاری در مناطقی که قسمت هایی از آن تهی از فشار می باشند حائز اهمیت می باشند.

¹ Compensated neutron log

² Side-tracked well

³ Pulsed neutron capture logs

⁴ Pay zone

شکل (۲-۸) کاربردهای مفید لاگ های PNC را برای ارزیابی کمی فشار سازند نمایش می دهد (Fertl, 1970). در شکل (۸۲-۸) مقاومت شیل، R_{sh} ، برحسب عمق برای یک چاه حفاری شده در سال ۱۹۶۴، در منطقه Louisiana، نمایش داده شده است. در این ناحیه همه ماسه های با عمق بیش از ۸۲۰۰ فوت برای حداقل ۲۵ سال مورد بهره برداری قرار گرفته اند. پس از شکست جداره در عمق بیش از ۸۱۰۰ فوت، طرحی به منظور تولید دوباره از چاه اجرا شد. در این طرح، کنارگذری در عمق ۹۰۶۰ فوتی و بالای شکستگی جداره (در ماسه ناحیه A) حفر گردید.

جدول ۳-۸ تراکم تجمعی بدست آمده از لاگ الکتریکی میدان Ekofisk تا ژانویه سال ۱۹۸۵ (Yudovich et al., 1988)

Well	Comparison logs	Time (years)	Ekofisk FM, compaction (ft)	TOR FM, compaction (ft)	Total compaction (ft)
2/4A-8	07/74 ¹ and 12/84 ³	10.5	5	1	6
2/4A-9	08/78 ³ and 10/81 ³	3.5	1		1
2/4A-10	10/81 ³ and 01/84 ³	2	1		1
2/4A-12	08/76 ³ and 10/81 ³	5	2		2
2/4A-13	12/73 ¹ and 08/83 ³	9.6	6		6
2/4A-14	09/78 ² and 06/84 ³	8	6		6
2/4B-1	10/77 ³ and 12/84 ³	7	3	1	4
2/4B-3/B-3A	08/74 ² and 12/81 ²	7	5		8
2/4B-3A	12/81 ² and 12/84 ³	3	4	2	6
2/4B-6	08/78 ² and 12/84 ³	9.5	3		3
2/4B-10	08/78 ³ and 09/22 ³	4	4		4
2/4B-10	08/22 ³ and 12/83 ³	1	1		1
2/4C-3A	12/83 ² and 12/84 ³	2	4		4
2/4C-8A	12/82 ² and 12/84 ⁴	2	4	1.5	8.5
2/4C-3/C-3A	08/74 ² and 12/82 ²	8	6	2	8
2/4C-9	12/74 ² and 12/84 ³	10	4	4	8
2/4C-13	04/75 ² and 12/84 ³	9.5	8		8
2/4C-14A	08/82 ² and 01/85 ⁴	2	8		5
2/4C-14C-14A	03/78 ² and 08/82 ²	7.5	8		8

¹ BHCS = Borehole compensated sonic; ² CNL = Compensated neutron log; ³ TDT = Thermal decay time; ⁴ NDL = Neutron detector log.

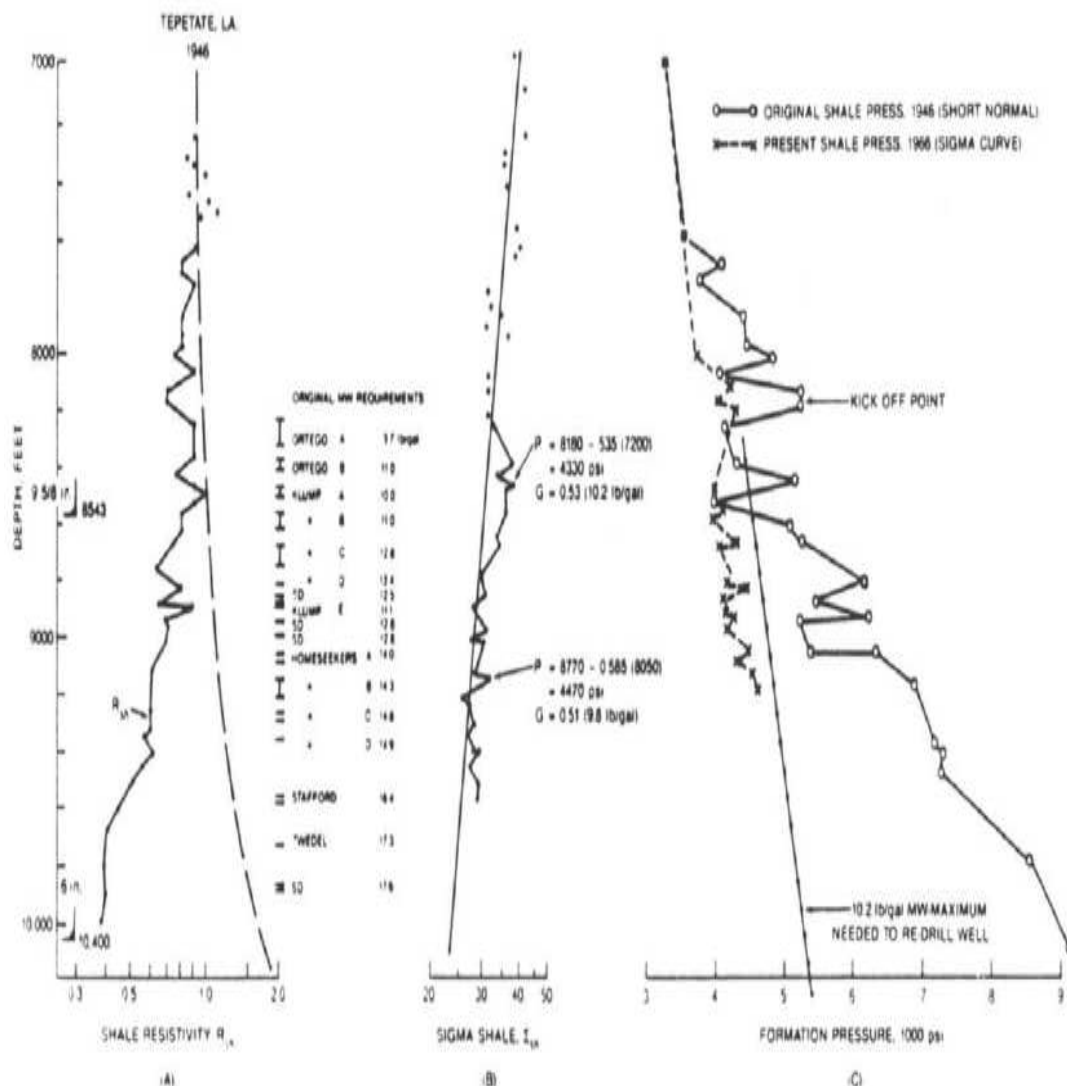
وزن گل حفاری مورد نیاز به منظور حفاری ایمن و بدون خطر این چاه تا ناحیه A در ابتدای حفاری آن در سال ۱۹۶۴، تقریباً ۱۴ پوند در هر بشکه بود. این وزن مخصوص گل حفاری معادل با وزن مخصوص هردوی ماسه و شیل در ناحیه تحت فشار مضاعف بوده است. به دلیل کاهش فشار ناشی از استخراج هیدروکربن در طی سالیان متمادی، ماسه ها گرادیان فشار بسیار کمتری نسبت به قبل در

سرتاسر میدان از خود نشان می دهند. بنابراین واضح است، در فواصلی که دوباره حفاری می گردند احتیاجی به استفاده از گل های حفاری با وزن مخصوص بالاتر نیست.

در نتیجه، لاگ PNC در چاه لوله گذاری شده قدیمی به منظور ارزیابی شرایط حال حاضر فشار، انجام شد. شکل (A-B₂) روند Σ را برحسب عمق، تا عمق ۹۱۱۰ فوت نمایش می دهد. برای رسیدن به ناحیه A، ماکسیمم وزن گل حفاری استفاده شده، ۱۰,۲ پوند بر فوت بوده است. شکل (A-C₂) به وضوح تغییرات فشار شیل را که ناشی از تخلیه فشار ماسه ها می باشد، نشان می دهد. در عمق ۸۱۲۰ فوتی چاه کنار گذر زده شده و تا عمق ۹۲۱۵ فوتی با وزن گل ۱۰,۴ پوند در بشکه، بدون مشکل حفاری شده است. در حالی که در شروع حفاری وزن مخصوص گل حفاری ۱۴,۳ پوند در بشکه بوده است. در این مطالعه میدانی اعمال روش عمق معادل^۱ با موفقیت همراه بود (Fertl, 1976). نفوذ آب از شیل های تحت فشار مضاعف و در حال تراکم به مخازن ماسه سنگی نفوذپذیر از نقطه نظر مهندسی مخزن و با جزئیات کامل در مقالات متعددی تشریح شده است. همچنین بررسی امکان آشکارسازی و پایش چنین رفتار برجایی، به وسیله تکنیک های چاه پیمایی درون چاه جداره دار مورد توجه محققین بوده است.

نتایج مطالعه مدلهای ریاضی حاکی از متغیر بودن گرادیان فشار منفذی در شیل های تحت فشار مضاعف می باشد و بنا بر این مطالعات، بالاترین فشار اضافی در نزدیکی مرکز شیل های توده ای متمرکز شده است. فشارهای اضافی کمتر در مجاورت زون های نفوذپذیر مانند ماسه و ماسه سنگ ها متمرکزی شوند. این مطالب با مشاهدات حاصل از حفاری هایی که اخیراً انجام شده تأیید می شود.

¹ Equivalent depth method



شکل ۲-۳-۳ (A) به منظور ارزیابی کمی فشار سازند استفاده گردیده است. نمودار رزیستویته شیل چاهی در میدان Louisiana، که در سال ۱۹۴۶ حفر گردیده است؛ نمودار سیگمای شیل بر اساس لاگ PNC در یک چاه جدا شده در سال ۱۹۶۶ انجام شده است؛ (C) فشار اولیه شیل (که از لاگ نرمال کوتاه بدست آمده، ۱۹۴۶) و فشار های شیل تخلیه شده از هیدروکربن (از نمودار سیگما، ۱۹۶۶) (Donaldson et al., 1995).

در شکل (۳-۳-۳)، تخلیه آب شیل ها^۱ به ماسه های مولد^۲ درون یک چاه تحت فشار مضاعف در جنوب Louisiana در دوره های نسبتاً کوتاه زمانی مورد بررسی قرار گرفته است. دو نوبت لاگینگ PNC به صورت مجزا در یک سال برای پایش تغییرات اشباع شدگی ماسه ها در زون تولیدی صورت گرفت. تغییرات مقدار Σ در ماسه های مولد به دلیل افزایش اشباع شدگی آب می باشد، تغییراتی نیز

¹ Shale water depletion

² Pay sands

پس از اندازه گیری موفقیت آمیز تراکم زون نفتی با استفاده از اندازه گیری تغییر شکل اتصالات لوله جداری در سال ۱۹۴۹، چند صد لاگینگ در میدان Wilmington کالیفرنیا انجام شد (Allen, 1969). دقت اندازه گیری ۰,۰۴ فوت (۱,۲ سانتی متر) در هر اتصال بود. در سیستم شرح داده شده توسط Allen از دو یا سه مکان یاب طوقه جداری و مکان یاب های گلوله رادیواکتیو با فاصله ای در حدود یک اتصال از هم برای اندازه گیری مستقیم تراکم سازند استفاده شده است. محاسبات با ثبت فیلم های در مقیاس ۵۰ تا ۶۰ اینچ (۱,۲۷ تا ۱,۵۲ متر) در هر ۱۰۰ فوت (۳۰,۴۸ متر) از چاه های نمودارگیری شده انجام شد. تکنیک مشابهی توسط سازمان زمین شناسی ژاپن در میدان گازی Niigata، انجام شد که در آن از شلیک گلوله های رادیواکتیو بدرون سازند و پلت های رادیواکتیو متصل به جداره چاه، استفاده شد (Allen, 1969).

پیشرفت های اخیر در این تکنیک ها دقت اندازه گیری را به طور قابل توجهی بهبود بخشیدند. این پیشرفت ها ابتدا در کالیفرنیا مورد استفاده قرار گرفت. به صورت تصادفی طول اتصالات جداره مکرراً اندازه گیری شد. انحراف معیار این اندازه گیری های مجدد ۰,۰۱۵۹ فوت (۰,۴ سانتی متر) بود. این پیشرفت با ایجاد مسافت سنج^۱ های درون چاهی و تکنیک های جدید ثبت تکمیل شد که می توانند به طور روزمره به اندازه گیری تصادفی طول اتصالات جداره در : (۱) چاه هایی با عمقی در حدود ۹۰۰۰ فوت (۲۷۴۳ متر)، (۲) چاه های قدیمی با بدنه داخلی ناهموار به دلیل فرسایش و خوردگی لوله استخراج و در (۳) چاه های انحراف دار، بپردازند.

محدودیت بزرگ تجهیزات لاگینگ در دقت اندازه گیری مقادیر کوچک تراکم، پرش^۲ این تجهیزات می باشد. حرکت نامنظم دستگاه لاگینگ به دلیل کشیدگی و کشش کابل، در حالی که اطلاعات لاگینگ در سطح با مقیاس یکنواخت ثبت می شود، دلیل این عدم دقت می باشد. برای رفع این مشکل یک سیستم ردیابی درون چاهی ایجاد شده است که از چرخ های کوچک مسافت سنج استفاده می کند، (Frost et al., 1981).

¹ Odometer

² bounce

گلوله های رادیواکتیو مکان یاب با سرعت لاگینگ ۲۵ فوت بر دقیقه (۷,۶ متر در دقیقه) دقتی برابر با ۰,۱ فوت یا (۳ سانتی متر) دارند. در صورتی که سرعت لاگینگ به سرعت بسیار پایین ۲ تا ۳ فوت بر دقیقه (۳,۱ تا ۶,۱۲ متر در دقیقه) کاهش یابد، دقت به مقدار قابل قبولی بهبود خواهد یافت. این حالت جهت حمل لاگینگ، به چرخ دنده های هیدرولیک نیاز دارد.

دستگاه های مشابه لاگ برداری درون چاهی شامل دو مکان یاب مغناطیسی طوقه جدار، دو آشکارساز رادیواکتیو و دو چرخ مسافت سنج است که سوار بر بدنه ای به طول ۴۵ فوت (۱۳,۷ متر) می باشند، شکل (A-۴). آشکار سازهای گلوله های رادیواکتیو با فاصله ۲۰ فوت (۶,۱) متر از هم قرار گرفته اند. اندازه گیری های همه چهار آشکار ساز و نشانگرهای چرخ های مسافت سنج در یک لحظه بر روی فیبر ثبت می شوند (با مقیاس ۵۰ تا ۶۰ اینچ (۱,۲۷ تا ۱,۵۲ متر) معادل ۱۰۰ فوت (۳۰,۴۷ سانتی متر) فاصله درون چاه). لاگینگ در پنج چاه میدان Wilmington کالیفرنیا نشان داد که ۸۸ درصد تکرار مفید اندازه گیری ها در بازه (۰,۰۲ + تا ۰,۰۲ -) فوتی اولین لاگینگ بودند و انحراف معیار آنها ۰,۰۱۵۹ فوت (۴,۸ میلیمتر) بود.

دیگر سیستم های لاگینگ از دو جفت طوقه یاب با فاصله دو فوت از هم (معادل ۰,۶۱ متر) ساخته شده اند. فاصله طوقه یاب ها از هم در هر دو جفت یکسان و برابر با طول های مخصوص اتصال لوله جداره می باشند، همچنین این سیستم ها از ثبت کننده های دیجیتال داده و تکنیک های همبستگی متقابل تحلیلی بهره می گیرند. این تکنیک ها برای پردازش سیگنال هایی که از پنج تکرار لاگینگ بدست می آیند، استفاده می شود. (Ruedrich et al., 1974).

استفاده از نشانگرهای رادیواکتیو^۱ در اواسط دهه شصت شروع شد و اولین اندازه گیری تراکم با استفاده از دستگاه اشعه گامای معمولی (GR) انجام گرفت (Schoonbeek, 1976). متعاقباً دستگاه های آشکارساز دوگانه و سه گانه (GR) به همراه تکنیک های پیشرفته اندازه گیری تراکم معرفی شدند که اجازه اندازه گیری دقیق و درست حرکت کابل را می دادند (Allen, 1981). در سال ۱۹۸۲،

¹ Radioactive markers

یک دستگاه GR با چهار آشکارساز برای اندازه گیری تراکم در میدان گازی Groningen هلند با دقت ۰,۰۶ اینچ (۰,۱۵ سانتی متر) در هر ۳۴,۴ فوت (۱۰,۵ متر) فاصله پایش استفاده شد.

به عنوان فاز دوم برنامه پایش تراکم میدان Ekofisk در اواخر سال ۱۹۸۷، ده چاه با نشانگرهای رادیواکتیو مجهز شدند و داده ها در طی ۶ ماه در شش چاه اکتساب شدند (Menghini, 1988). در این تکنیک یک منبع رادیواکتیو ضعیف (سزیم ۱۳۷ با شدت ۱۰۰ تا ۱۵۰ میکروکوری) درون کپسول کرومی از جنس فولاد، مقاوم در برابر خوردگی، با ۰,۰۹ اینچ (۲,۰۳ میلیمتر) قطر قرار داده می شود. این کره درون گلوله ای از جنس فولاد مقاوم در برابر خوردگی جاسازی شده و از یک تفنگ مغزه گیر ۵ اینچی اصلاح شده شلیک می شود. تفنگ حامل ۱۲ گلوله نشانگر است که می توانند به صورت انتخابی شلیک شوند. آشکارساز GR مکان قرار گیری گلوله ها را بررسی می کنند.

برای دریافت پاسخی خوب از سیگنال GR نفوذ بهینه گلوله به درون سازند، در حدود ۸ اینچ (۲۰ سانتی متر)، می باشد. براساس داده های میدان، روابط میان (۱) سایز خرج منفجره^۱ و زمان انتقال صوت در سازند روباره، و (۲) اندازه خرج و تخلخل در سازند مخزن بدست آمده است، که در جدول (۴-۱) نمایش داده می شود. مطابق با جدول (۴-۱)، حداقل اندازه خرج منفجره ۵ گرم می باشد. در شیل های بسیار نرم، حتی این مقدار کم ماده منفجره نیز بیش از مقدار مورد نیاز جهت نفوذ بهینه گلوله به درون سازند می باشد. خرج های منفجره ویژه (پاراشوت^۲) سطح مقطع دماغه گلوله را افزایش داده و از نفوذ بیشتر گلوله به درون سازند جلوگیری می نماید. همچنین می توان به منظور کاهش سرعت گلوله به انتهای خرج منفجره یک فضاگیر^۳ اضافه نمود. ابزار لاگینگ درون چاه، ابزار پایش فرونشست سازند^۴ (FSMT) نامیده می شود. این ابزار متشکل از چهار آشکارساز اشعه گاما می

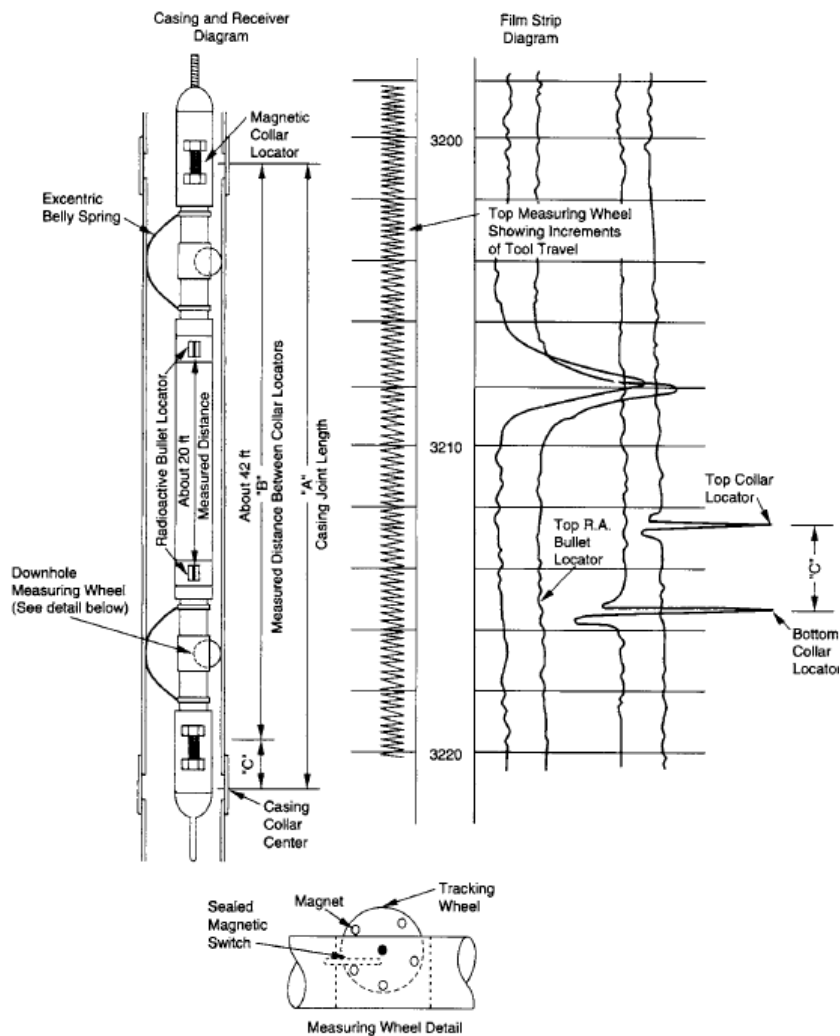
¹ Explosive charge sizes

² Parachute

³ Spacer

⁴ Formation Subsidence Monitoring Tool

باشد که با فواصل دقیق ۲ اینچ (۵ سانتی متر) بر روی چارچوبی از جنس اینوار^۱ (آلیاژی از آهن و نیکل) قرار داده شده اند. دلیل استفاده از آلیاژ اینوار ضریب انبساط کم آن می باشد.



شکل ۴-A اندازه گیری طول اتصالات جداره و فاصله بین گلوله های رادیواکتیو (Allen, 1981).

یک شتاب سنج حرکت ابزار در درون چاه را کنترل می کند. ابزار لاگینگ در حین تنظیم دستگاه و پیمایش اصلی با سرعت ۳۰۰ فوت در ساعت (۹۱ متر در ساعت) حرکت می کند. در هر فاصله نشانگر، سه بار نمودارگیری صورت می پذیرد. اندازه گیری های انجام شده (پاسخ خام اشعه گاما،

¹ Invar

پاسخ شتاب سنج، کشش کابل و سرعت نمودار گیری) به صورت دیجیتالی ثبت و در یک مرکز کامپیوتر آنالیز می شوند.

جدول A-5 سایز خرج منفجره استفاده شده در سازند روباره و سازند مخزن (Menghini et al, 1988)

Overburden		Reservoir	
ΔT ($\mu\text{sec}/\text{ft}$)	Charge size (g)	Porosity (%)	Charge size (g)
<130	10	10-18	10
130-140	8	19-22	13.5
140-160	6	23-27	10
160-180	5	28-31	8
>180	5 + parachute/spacer	32-33	6
		>33	5

Menghini (1988) تجربیات خود را در پایش تراکم میدان Ekofisk به صورت زیر خلاصه نمود.

(۱) جایگذاری بهینه نشانگر های رادیواکتیو برای آشکارسازی مناسب و آنالیز پاسخ اشعه گاما

(GRT) لازم است.

(۲) دانش اولیه و شناسایی تخلخل سازند و ویژگی های مکانیکی آن هنگام انتخاب اندازه های

مناسب خرج منفجره برای جایگذاری گلوله های نشانگر ضروری است.

(۳) دقت اندازه گیری FSMT تا حد زیادی به حرکت ملایم ابزار بستگی دارد (بزرگترین مشکلی

که در حین حرکت ابزار رخ می دهد، کشیدگی کابل بدلیل اصطحکاک می باشد).

(۴) بالاترین کیفیت اندازه گیری تراکم در چاه های غیر منحرف و چاه هایی که لوله های

تولیدی در آنها نصب نشده، صورت می پذیرد.

A-6 پایش فرونشست زمین با استفاده از GPS

مثال های متعددی از فرونشست زمین به دلیل تولید نفت و گاز و یا پمپاژ آب از سفره های آب

زیرزمینی در کل جهان ثبت شده است. در بسیاری از این موارد فرونشست پس از وقوع آن و پس از

به بار آمدن خسارات فراوان شناسایی شده است و یا در زمانی شناسایی شده که برای اقدام های

پیشگیرنده بسیار دیر می باشد.

به عنوان مثال در یک میدان نفتی فرونشست معمولاً کاسه ای شکل^۱ بوده و معمولاً بیشترین میزان فرونشست در نزدیکی مرکز میدان رخ خواهد داد. لبه کاسه فرونشست تقریباً لبه مخزن می باشد، اما در بعضی مواقع ابعاد این کاسه تا دو برابر ابعاد مخزن گسترش می یابد. همچنین، فرونشست قائم معمولاً همراه با جابجایی افقی می باشد، بخصوص در نواحی نزدیک لبه کاسه فرونشست.

در بعضی میادین نفت تکنیک های مرسوم نقشه برداری به منظور محاسبه فرونشست استفاده شده اند. اما این روش ها وقت گیر و پر هزینه می باشند، بخصوص چنانچه این کار با استفاده از شبکه ای از بنچ مارک های ثابت^۲ که در دوره های متناوب پایش می شوند، صورت گیرد. همچنین این روش نیاز به مسیر دید مستقیم بین بنچ مارک ها دارد که کاربرد آن را محدود می نماید و این روش را در بسیاری از عملیات های تولیدی درون دریا^۳ ناکارآمد می سازد.

گسترش عملیاتی سیستم موقعیت یاب جهانی^۴ (GPS) توسط وزارت دفاع آمریکا، پایش فرونشست را در مقایسه با روش های قدیمی نقشه برداری بمراتب مؤثرتر و ارزانتر نمود. بعلاوه روش GPS را می توان با سیستم سنتی بنچ مارک ها ترکیب نمود و مقدار قابل توجهی در وقت و هزینه صرفه جویی نمود.

همچنین پایش فرونشست سکوها های نفتی درون دریا با استفاده از سیستم GPS امکان پذیر می باشد. در حالی که در این سکوها به دلیل محدودیت هایی که در مسیر دید نقشه برداری^۵ وجود دارد تکنیک های قدیمی تر نقشه برداری کاربردی ندارند.

A - ۶ - ۱ سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS)

GPS شامل صورت فلکی^۶ از ماهواره های در حال چرخش در مدار می باشد که به طور پیوسته سیگنال های رادیویی منتشر می کنند. این ماهواره ها توسط وزارت دفاع آمریکا به فضا پرتاب شده

¹ Bowl-shaped

² Permanent bench marks

³ Offshore

⁴ Global Positioning System

⁵ Line-of-sight

⁶ Constellation

اند و سیگنال های آنها به طور رایگان در دسترس می باشد. تعدادی از شرکت های خصوصی اقدام به تهیه پکیجی از نرم افزارها و گیرنده هایی نمودند که قابلیت اجرای دقیق ناوش^۱ را دارند. تا مدتی، محدودیت اصلی استفاده از GPS قابلیت محدود مشاهده ماهواره ها بود، که از دقت ناوش می کاست. پرتاب ماهواره های مکمل چندین سال طول کشید. به منظور مکان یابی سه بعدی به روش مثلث بندی، نیاز به مشاهده چهار ماهواره توسط گیرنده داریم.

منظومه مدار عملیاتی GPS شامل ۲۴ ماهواره است که در شش صفحه مداری^۲ قرار داده شده اند. هر صفحه نسبت به خط استوا زاویه ای برابر با ۵۵ درجه دارد. هر ماهواره در یک دور ۱۲ ساعته و با فاصله ۱۰۸۹۸ مایلی از زمین و به دور آن می گردد. با استفاده از سیگنال های چهار ماهواره به طور همزمان چنین آرایشی به ما اجازه پیمایش زمین در هر کجای زمین، در هر موقعی از شب یا روز خواهد داد.

A - ۶ - ۲ استفاده از ناوش تفاضلی

دقت ناوش موقعیت یابی GPS در فضای سه بعدی به تنهایی برای پایش فرونشست کافی نیست. از آنجایی که فرونشست تقریباً شکل خالصی از تغییر شکل است، می توان از روش ناوش تفاضلی^۳ برای دست یابی به دقت مورد نظر استفاده نمود. در حقیقت، دست یابی به دقت بالا بوسیله سیستم GPS یکی از برتری های آن در مقایسه با استفاده روش های سنتی نقشه برداری می باشد. دقت سیستم GPS در راستای افقی و قائم به صورت زیر می باشد:

قائم : ۳ تا ۸ میلیمتر

افقی : ۳ تا ۵ میلیمتر

این میزان دقت حتی بیش از دقت مورد نیاز برای اندازه گیری نرخ فرونشستی است که معمولاً چند سانتی متر در سال می باشد.

¹ Navigation

² Orbital planes

³ Differential navigation

همچنین، قابلیت دست یابی به دقت بالا در اندازه گیری افقی پایش دقیق جابجایی های افقی را ممکن می سازد، به عنوان مثال در مجاورت حاشیه های کاسه فرونشست. یکی از قابلیت های مهم این روش ارزیابی مدل فرونشست، با بررسی متناوب همبستگی میان جابجایی جانبی حاشیه کاسه فرونشست و جابجایی قائم مرکز کاسه فرونشست می باشد.

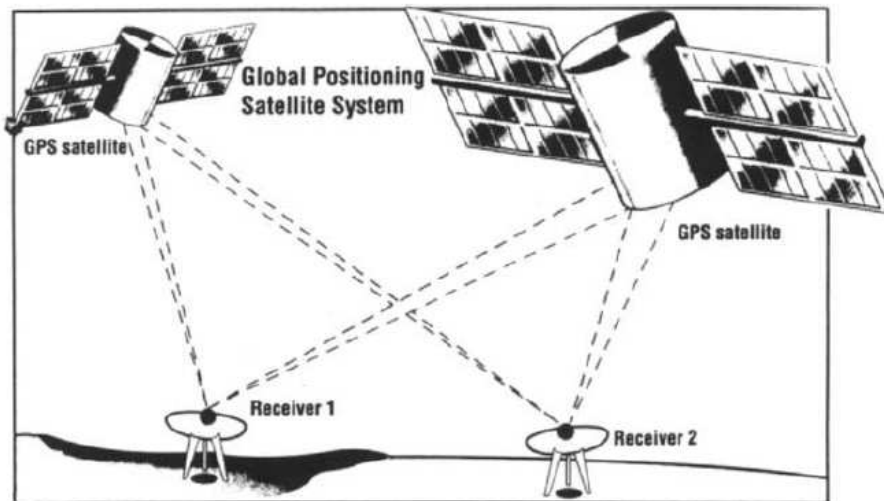
بایستی به این نکته اشاره کنیم که دست یابی به دقتی که در بالا ذکر شد مستلزم استفاده از دو دریافت کننده زمینی می باشد. اولین گیرنده در بنچ مارک مرجع قرار داده شده و موقعیت دریافت کننده دوم همیشه به عنوان اختلاف در فاصله سه بعدی میان ایستگاه های زمینی مشخص می شود. این کار دقت بالاتری نسبت به اندازه گیری موقعیت هر ایستگاه زمینی در فضای سه بعدی دارد (شکل A-۵).

A-۶-۳ مثال هایی از پایش فرونشست توسط GPS

تولید نفت در امتداد ساحل شرقی دریاچه Maracaibo در غرب ونزوئلا باعث ۵ متر فرونشست زمین شده است. نرخ فرونشست در این منطقه به ۰,۲ متر در سال رسیده است. یک سیستم نقشه برداری سنتی با استفاده ۱۶۰۰ بنچ مارک برای سالیان متمادی در منطقه اجرا شده است. پیمایش ها هر دو سال یک بار انجام گرفته است. با استفاده از ۵ نفر نقشه بردار، عملیات نقشه برداری سه ماه به طول می انجامید و هزینه ای بالغ بر ۲۰۰۰۰ دلار آمریکا در بر داشت (Leal, 1989).

در سال ۱۹۸۶، دانشکده مهندسی نقشه برداری در دانشگاه New Brunswick کانادا در جستجوی روش پایش اقتصادی تر در همکاری با اپراتور میدان نفتی Maracaibo، پروژه ای را برای آزمایش و استفاده از GPS نمود.

نتایج این پروژه حاکی از صرفه جویی ۳۰ درصدی در هزینه و کاهش اساسی در زمان اجرای نقشه برداری با استفاده از این روش جدید داشت (Chrzanowski, 1991).



شکل A-۵ آرایش گیرنده ها در ناوش تفاضلی (Donaldson et al., 1995)

GPS به منظور پایش فرونشست در دلتای Po River واقع در شمال شرقی ایتالیا استفاده شد. در دهه ۶۰ این منطقه که در نزدیکی دریای آدریاتیک قرار گرفته دچار فرونشست بزرگی گردید. میزان فرونشستی که به دلیل استخراج آب و گاز طبیعی رخ داده بود، در بعضی مناطق به ۳,۵ متر رسید. فرونشست منطقه ای به مساحت ۸۰۰ کیلومتر را پوشش داد و تمامی مسیرهای آبی که وارد دلتا می شدند را قطع کرد. GPS برای پایش بینی و شبیه سازی عملیات اصلاحی که برای رفع مشکل انجام می شد بکاربرده شد (Gambardella, 1991).

مثال دیگر استفاده موفقیت آمیز از GPS پایش فرونشست در قسمت شمالی هلند می باشد. از سال ۱۹۶۴ گاز طبیعی در استان های Groningen و Friesland هلند تولید شد. استخراج گاز باعث فرونشست پیوسته این مناطق از آغاز تولید آن شد. منطقه در حال حاضر زیر سطح آب است و احتیاج به پایش دقیق به منظور پایش بینی میزان خاکریز مورد نیاز و ارزیابی تأثیر هیدرولوژیکی بر کشاورزی، دارد (Pottgens, 1991).

Michael Hatch دانشجوی فارق التحصیل از دانشگاه Arizona در Tucson و راهنمایش پرفسور John Summer با استفاده از GPS فرونشست حوضه Tucson که ناشی از پمپاژ آب زیرزمینی

می باشد را اندازه گیری نمودند. مجموعاً ۲۱ ایستگاه پنج مارک در حوضه و ۴ پنج مارک بستر سنگ^۱ برای اندازه گیری فرونشست بین سال های ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۱ بکاربرده شدند. میانگین نرخ فرونشست در منطقه بین ۱ تا ۵ سانتی متر در سال بود.

مطالعات قبلی که با استفاده از متد های قدیمی نقشه برداری صورت گرفته بود نرخ ۳ میلیمتر نشست به ازای یک متر افت سطح ایستای آب را نشان می داد. اندازه گیری های GPS صورت گرفته ثابت نمود که این نرخ ۲۴ میلیمتر به ازای هر متر افت سطح ایستای می باشد، این نرخ ۸ برابر اندازه گیری های قبلی بود. نتایج این مطالعه اثبات نمود که مصرف ذخیره آب زیر زمینی می تواند خسارات و صدمات جبران ناپذیری به بار آورد (Earth, 1992).

A - ۶ - ۴ کاربردهای دیگر GPS

عملیات حفاری درون دریا مصون از مشکلات ناشی از فرونشست نخواهد بود. از آنجایی که در نقشه برداری به وسیله GPS احتیاجی به وجود خط دید بین دو ایستگاه گیرنده GPS نیست، یکی از گیرنده ها می تواند بر روی سکوی حفاری درون آب قرار گیرد و گیرنده دیگر بر روی خشکی. با وجود این که دقت اندازه گیری بسته به فاصله میان دو گیرنده، تنزل خواهد نمود، این روش با دقتی قابل قبول، تنها راه پایش برجای فرونشست سکوهای حفاری درون آب می باشد.

موارد فراوانی وجود دارد که در آنها پول های هنگفتی جهت بالا آوردن سطح سکوهای حفاری که به دلیل استخراج سیال دچار فرونشست شده بودند، خرج شده بود. بنابراین از GPS جهت پیش بینی و کنترل اثرات فرونشست بر روی این ساختارهای گران قیمت استفاده می گردد.

همچنین توانایی GPS در اندازه گیری دقیق جابجایی های افقی سطح زمین در پیش بینی زلزله های ناشی از فرونشست بسیار به کار می آید. برای مثال، اندازه گیری حرکت نسبی زمین در امتداد گسل های لرزه خیز می تواند جهت پیش بینی سطح تنش ایجاد شده استفاده گردد.

¹ Bedrock bench mark

References:

- Allen D.R., (1981), "Developments in precision casing joint and radioactive measurements for compaction monitoring", SPE California Regional Meeting, 9933, Bakersfield, Calif.
- Allen D.R., (1969), "Collar and radioactive bullet logging for subsidence monitoring", Paper G. SPWLA Trans.
- Boade R.R., Chin L.Y. and Siemers W.T., (1988), "Forecasting of Ekofisk reservoir compaction and subsidence by numerical simulation", SPE 20th Annual, OTC 5622, Houston, Texas.
- Chrzanowski A. and Chen Y.Q., (1991), "Use of the global positioning system (GPS) for groundsubsidence measurements in Western Venezuela oil fields", Fourth International Symp. LandSubsidence, No200, pp 419-431.
- Colazas X.C. and Olson L.J., (1982), "Subsidence monitoring methods and bench mark elevation response to water injection, Wilmington oil field", Proceedings of 1982 Forum on Subsidence due to Fluid Withdrawals, pp 121-132, Checotah.
- De Loos J.M., (1973), "In-situ compaction measurements in Groningen observation wells", **Verh. K. Ned.Geol. Mijnbouwk. Genoot**, 28, pp 79-104.
- Earth (1992), "Satellites monitor sinking basin", pp 15.
- Fertl W.H., (1976), "**Abnormal Formation Pressures**". Elsevier, Amsterdam, pp 385.
- Fertl W.H. and Timko D.J., (1970), "How abnormal pressure detection techniques are applied", **Oil Gas J.**, 82, 32, pp 81-86.
- Fertl W., Chilingarian G. V., Donaldson E. C., (1995), surveillance technology to detect and monitor compaction and subsidence effects, pp. 439-450, In: "**Subsidence due to fluid withdrawal**", G.V. Chilingarian, I. Elsevier, Amsterdam.
- Frost E., Fertl W.H. and Wichmann P.A., (1981), "A Computerized Wellsite Log Analysis System" SPE Middle East Tech. Conf., pp 395-409, Bahrain.
- Gambardella E and Bartolotto S., (1991), "The positioning system GPS for subsidence control of the terminal reach of the Po River", Fourth International Symp. Land Subsidence, No 200, pp 433-441.

- Johnson J.P., Rhett D.W. and Siemers, W.T., (1988), "Rock mechanics of the Ekofisk reservoir in the evaluation of subsidence", SPE 20th Annual OTC, OTC 5621, Houston, Texas.
- Leal J., (1989) "Integration of satellite global positioning system and leveling for the subsidence monitoring studies at the Costa Bolivar oil fields in Venezuela", Technical Report No. 114, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, Canada.
- Menghini, M.L., (1988), "Compaction monitoring in the Ekofisk area chalk fields", SPE 20th Annual OTC Meet., OTC 5620, Houston, Texas.
- Morita N., Whitfill D.L., Nygaard O. and Bale A., (1988), "A quick method to determine subsidence, reservoir compaction, and in-situ stress induced by reservoir depletion", SPE Formation Damage Control Symposium, pp. 73-84, Bakersfield, Calif.
- Pottgens Jan J.E., (1991), "Land subsidence due to gas extraction in the northern part of the Netherlands", Fourth International Symp. Land Subsidence, No. 200, pp 99-108.
- Rentsch H.C. and Mes M.J., (1988), "Measurement of Ekofisk subsidence", SPE 20th Annual OTC, OTC 5619, Houston, Texas.
- Ruedrich R.A., Perkins T.K. and O'Brien D.E., (1974), "Precise joint depth determination using a multiple casing collar locator tool", SPE 49th Annual Fall Meeting, SPE 5087, Houston, Texas.
- Schoonbeek J.B., (1976), "Land subsidence as a result of gas extraction in Groningen, The Netherlands", Internat. Assoc. Hydrol. Sci., Proceedings Symposium, Anaheim, Calif.
- Smits R.M.M., deWaal J.A. and van Kooten J.E.C., (1986), "Prediction of abrupt reservoir compaction and surface subsidence due to pore collapse in carbonates", SPE Annual Meeting New Orleans, SPE 15642, La.
- Sulak R.M. and Danielsen, J., (1988), "Reservoir aspects of Ekofisk subsidence", SPE 20th Annual OTC Meeting, OTC 5618, Houston, Texas.
- Yudovich A., Chin L.Y. and Morgan D.R., (1988), "Casing deformation in Ekofisk", SPE 20th Annual OTC Meeting, OTC 5623, Houston, Texas

ABSTRACT

One of the most serious problems in oil field development which could potentially cost millions of dollars, is ground subsidence caused indirectly as a result of petroleum production and the resulting compaction. Reservoir compaction can reactivate sub surface geological structures, which may compromise the integrity of reservoir seal, resulting in natural migration of hydrocarbons to other formations. Further, the compaction consequent to subsidence may lead to reduced porosity which can lower the production levels in a formation.

Several surveillance techniques are available to detect and monitor compaction and subsidence effects. In this study differential radar interferometry and geomechanical modeling applied to evaluation of reservoir compaction and surface subsidence of dorood oil field, south west of iran. Well failure is observed in this field, which may be attributed to the mass balance change in the oil reservoirs due to hydrocarbon extraction.

Differential Radar Interferometry is a relatively new method but results of tests and experiments demonstrated the capability of this technique to measure man induced surface movement to centimeter resolution. There are several sources which affect the accuracy of InSAR results; the most considerable one being atmosphere. The interferometric processing of kharg island, (on shore part of dorood oil field) SAR images, dating from 2000 to 2007, was carried using Gamma software. The study area showed over all very low correlation values due to high and periodic rate of water vapor in Persian Gulf.

Geertsma's equation based on nucleus of strain equations from rock mechanics, is quick and worthy tool in evaluation of subsiding and compacting reservoirs. Using these equation showed that maximum rate of reservoir compaction is twice the maximum subsidence rate.

Also in this study a finite difference code is tested and utilized to monitor and measure the reservoir compaction of Dorood oil field. This method has been used to analyze the effects of fluid viscosity, Poisson's ratio, Young's modulus, rates of fluid production and injection, and the extent of compaction as a function of time. Also, the relationship between reservoir permeability and porosity were determined and compaction related, reservoir porosity and permeability changes, were calculated.

The result of this study can be used together with levelling to optimize the development of compacting reservoirs to take advantage of the compaction drive while minimizing the other problems it creates.

Key words: Compaction of Oil Reservoirs, Subsidence, Radar Interferometry Method, Finite Difference Method, Dorood Oil Field.



Shahrood University of Technology

Faculty Of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

**Evaluation Of Reservoir Compaction and Surface
Subsidence In Hydrocarbon Fields Using Synthetic
Aperture Radar Interferometry and Geomechanical
Modeling: A Case Study In Dorood Oil Field.**

Arman Mohammadi

Supervisor:

Dr.Mansour ziaii

February 2011