

# بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی با استفاده از روش تداخل سنجی رادار

نرگس فتح‌الهی<sup>۱</sup>

مهدی آخوندزاده هنزائی<sup>۲</sup>

عباس بحرودی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۰۳/۲۵

\*\*\*\*\*

## چکیده

تولید از مخازن هیدروکربوری، سبب افت فشار منفذی در این مخازن می‌شود. این افت فشار، تنش ناشی از رسوبات روباره‌ی سنگ مخزن را که پیش از عملیات برداشت، توسط فشار سیال داخل مخزن و سنگ‌های پوششی کنترل می‌شد افزایش داده و موجب تراکم محیط متخلخل اطراف می‌شود. در صورتی که میزان تراکم مخزن از حدی فراتر رود، سنگ‌های روباره در اثر وزن خود شروع به فرونشست خواهند کرد که این امر می‌تواند تأثیرات مخربی از جمله شکستگی چاه‌ها، میچاله شدگی لوله‌های جداری و خسارات سرچاهی را به دنبال داشته و در نتیجه فرآیند تولید از این مخازن را با مشکل جدی مواجه کند. بنابراین مطالعه پدیده‌ی فرونشست ناشی از بهره‌برداری منابع هیدروکربوری، حائز اهمیت بوده و نیاز به توجه و بررسی دقیق دارد. برای این منظور روش‌های متعددی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد؛ لذا روشی که دارای سرعت و دقت بالا و هزینه‌ی پایین باشد همواره در اولویت خواهد بود. بدلیل هزینه‌بر بودن روش‌های ترازیبی دقیق و نقشه‌برداری زمینی و نیز عدم دسترسی به مشاهدات آنها در برخی شرایط خاص، بکارگیری روشی سریع‌تر و ارزان‌تر پیشنهاد می‌شود. خوشبختانه پیشرفت در زمینه‌ی ماهواره و تکنولوژی رادار باعث شده است که قادر به اندازه‌گیری جابجایی‌هایی بسیار کوچک سطح زمین در نواحی مستعد جابجایی از جمله میدان‌های تحت برداشت سیال‌های زیرسطحی باشیم. روش تداخل‌سنجی تفاضلی رادار (InSAR) فناوری نوینی است که از تصاویر ماهواره‌ای جهت آشکارسازی دگرریختی شکل سطح زمین استفاده می‌کند. در این راستا دو میدان بزرگ نفتی یکی واقع در منطقه‌ی جنوب غربی ایران و دیگری در کالیفرنیا مرکزی توسط تکنیک تداخل‌سنجی راداری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده بیانگر کارایی مناسب این روش به منظور بررسی جابجایی ناشی از فرونشست در میداین مذکور می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تداخل سنجی راداری، فرونشست زمین، برداشت سیال، مخازن هیدروکربوری.

\*\*\*\*\*

۱- کارشناس ارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، n.fatholahi@ut.ac.ir

۲- استادیار گروه سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) makhonz@ut.ac.ir

۳- استادیار گروه معدن، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران bahroudi@ut.ac.ir

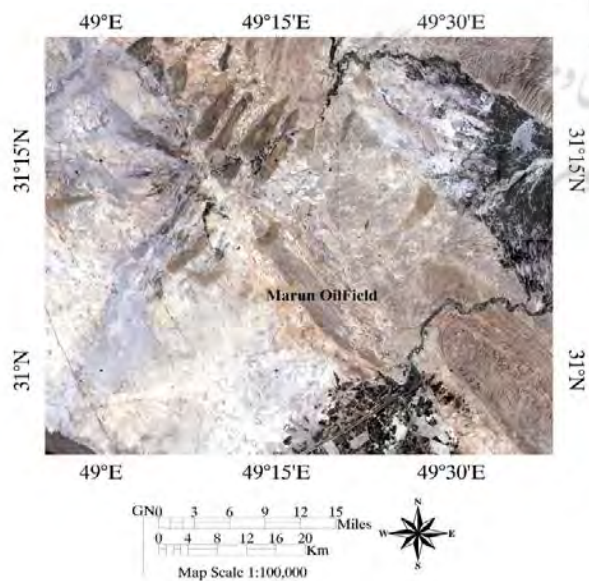
## ۱- مقدمه

شبکه‌ای از نقاط مبنا در منطقه‌ی مورد بررسی، تعداد زیاد مشاهدات منحصر بفرود جهت نمایش توزیع نشست، نیاز به دسترسی زمینی به مشاهدات و هزینه‌ی بالای این مشاهدات مواجه هستند.

روش تداخل‌سنجی تفاضلی رادار InSAR فناوری نوینی است که از تصاویر SAR جهت اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین استفاده می‌کند. این تکنیک دارای مزایایی نسبت به روش‌های معمول زمینی و ژئودتیک است. توان تفکیک مکانی و زمانی بالا عمده‌ترین مزیتی است که این تکنیک نسبت به روش‌های ذکر شده دارد.

استفاده از روش فوق‌الذکر این امکان را به ما می‌دهد که میزان جابجایی زمین را در مقیاس بالا مورد بررسی قرار دهیم. همچنین دقت این روش به همراه پایین بودن هزینه‌ی آن از مزایای دیگر کاربرد وسیع آن در مطالعه‌ی پدیده‌های ژئودینامیکی می‌باشد.

اندازه‌گیری‌های تداخل‌سنجی تفاضلی رادار از نشست در میدان‌های نفتی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را به منظور درک بهتر رفتار مخازن و سنگ‌های مخزنی به استراتژی‌های مختلف استخراج نفت فراهم آورد.



نگاره ۱: موقعیت جغرافیایی میدان مارون بر روی تصویر ماهواره‌ای Landsat 8

پدیده‌ی فرونشست که ممکن است به صورت نشست تدریجی یا ناگهانی در سطح زمین ایجاد شود، بطور کلی ناشی از عوامل عمده‌ای همچون انحلال تشکیلات زیرسطحی، تراکم رسوبات و یا افت سطح سیالات زیرزمینی می‌باشد. فرونشست تدریجی ناشی از روند طبیعی تراکم رسوبات بسیار رایج می‌باشد اما به ندرت باعث بروز مشکلاتی در مقیاس جوامع انسانی می‌شود. فرونشست سریع‌تر سطح زمین، که معمولاً به فعالیت‌های انسانی همچون استخراج سیالات از زیر سطح زمین مربوط می‌شود و تغییرات سریع محلی در ارتفاع زمین و واکنش‌های شدید سطحی را به دنبال دارد، می‌تواند آسیب قابل توجهی را به بسیاری از سازه‌های سطحی و زیرسطحی برساند که از نظر تعمیر و یا جایگزینی هزینه‌بر هستند. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که هزینه‌ی خسارات سالیانه ناشی از فرونشست در ایالات متحده‌ی آمریکا، به تنهایی بیش از صدها میلیون دلار را دربردارد (شورای ملی تحقیقات، ۱۹۹۱). مناطقی که تحت برداشت سیالات زیرسطحی نظیر نفت و گاز می‌باشند، معمولاً تحت تأثیر پدیده‌ی فرونشست سطح قرار می‌گیرند. این پدیده به ویژه در خطوط ساحلی که کاهش اندکی در ارتفاع ممکن است سبب طغیان شود بسیار قابل توجه می‌باشد و نخستین بار در میدان نفتی Goose Greek در ساحل خلیج تگزاس در ایالات متحده‌ی آمریکا اتفاق افتاد و به دنبال آن جاده‌ها و خطوط ساحلی دچار نشست شدند (Nagel, 2000). نمونه‌ی دیگر فرونشست سطح در میدان نفتی Wilmington در نزدیکی هوستون تگزاس اتفاق افتاد و بخش‌هایی از شهر و بندر لانگ بیچ به علت نشست سریع زمین تا ۰/۷۱ متر در سال تخریب شد (Alen & Mayuga 1969).

روش‌های زمینی بررسی نرخ فرونشست به کمک نقشه‌برداری زمینی و ترازبایی قابل اندازه‌گیری است. در سال‌های اخیر سیستم تعیین موقعیت جهانی GPS نیز مورد استفاده قرار گرفته است. تمامی این روش‌ها در اندازه‌گیری میزان فرونشست سطح با محدودیت‌هایی از جمله نیاز به

## ۲- مطالعه‌ی موردی

### ۲-۱- میدان نفتی مارون

میدان نفتی مارون یکی از بزرگترین میداین نفتی جنوب غرب ایران محسوب می‌شود که در فاصله‌ی ۶۰ کیلومتری شرق شهر اهواز و در مجاورت میداین کوپال، آغاچاری، رامین، شادگان و رامشیر واقع شده است. نگاره شماره ۱ تصویر ماهواره‌ی لندست ۸ از موقعیت جغرافیایی تاقدیس مارون را نشان می‌دهد.

از لحاظ زمین‌شناسی میدان مارون در قسمت شرقی حوضه‌ی فروافتاده‌ی دزفول شمالی قرار گرفته است. این میدان نفتی در سال ۱۳۴۲ به روش لرزه‌نگاری دوبعدی کشف شده و با حفر اولین چاه، وجود هیدروکربور در مخزن آسماری آن تأیید شد.

مخزن بنگستان در سال ۱۳۴۷ و با حفر چاه شماره ۲۱ و مخزن خامی با حفر چاه شماره ۱۲۳ در سال ۱۳۵۷ کشف گردیدند. طول ساختار مارون در سطح سازند آسماری ۶۷ کیلومتر و عرض آن حداکثر ۷ کیلومتر بوده و در افق سازند ایلام دارای ۶۳ کیلومتر طول و عرض حداکثر ۵ کیلومتر می‌باشد و این در حالی است که ابعاد مخزن در رأس سازند داریان به ۶۰ کیلومتر طول و ۳/۵ کیلومتر عرض کاهش می‌یابد. فاصله بین ستیغ مخزن و عمیق‌ترین سطح تماس آب و نفت در سازند آسماری حدود ۲۰۰۰ متر می‌باشد و ضخامت سازند آسماری در این میدان در حدود ۴۵۰ متر است. تاکنون بیش از ۳۸۰ حلقه چاه در میدان مارون حفر شده که ۲۳ حلقه آن در مخزن بنگستان و ۵ حلقه در مخزن خامی تکمیل شده است (شیخ‌زاده و حق‌پرست، ۱۳۸۷). میدان مارون دارای ساختمانی تاقدیسی است که با جهت شمال غرب-جنوب شرق بخصوص در قسمت‌های غربی و مرکزی مشخص می‌شود.

تنها شواهد سطحی این تاقدیس لایه‌هایی از سازند آغاچاری می‌باشند که رخنمون یافته‌اند. این میدان یک تاقدیس تقریباً نامتقارن است که دارای شیب متوسط ۶۰-۴۵ درجه در یال جنوب غربی و ۴۵-۲۵ درجه در یال شمال

شرقی می‌باشد. همچنین دارای پیچشی در وسط ساختار است که طی آن روند میدان تقریباً ۲۰ درجه از جهت N45W در شمال غرب به سمت N65W در جنوب غرب تغییر می‌کند. در میدان مارون به دلیل وقوع دو رخداد مهم تکنیکی بصورت چین‌خوردگی (Folding) که آثار اصلی کوهزایی زاگرس می‌باشد و خمش (Bending) که بعدها در اثر حرکت تحت تأثیر نیروهای تراکمی ایجاد شده و ادامه آن تا به امروز تغییر شیب را در یال‌های این مخزن بسیار متنوع نموده در نتیجه میزان شعاع انحنا در طول ساختمان در مقاطع مختلف با هم متفاوت گردیده است (قلی‌پور و حقی، ۱۳۶۹).

### ۲-۱-۱- داده‌های مورد استفاده

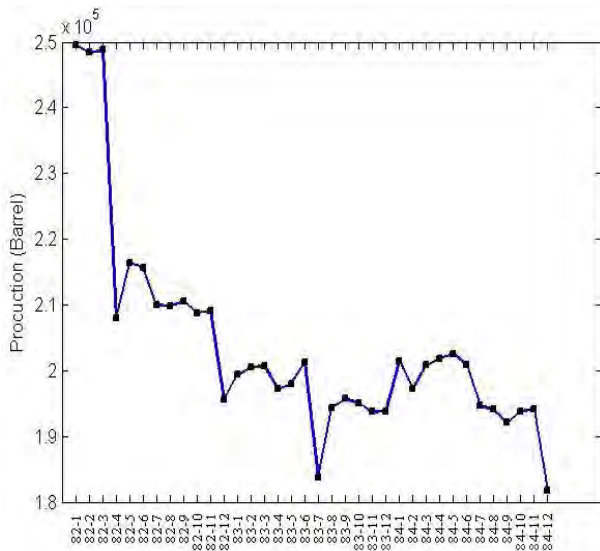
داده‌های راداری شامل ۱۰ تصویر خام سنجنده‌ی Envisat در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ با وضعیت تصویربرداری پایین گذر<sup>۱</sup> که توسط آژانس فضایی اروپا (ESA)<sup>۲</sup> به صورت online در اختیار قرار گرفت می‌باشد. مشخصات داده‌های مورد استفاده در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: لیست تصاویر راداری منطقه مارون

Track	Orbit	Date.	No.
۱۴۹	۸۲۱۹	۲۰۰۳۰۹۲۶	۱
۱۴۹	۹۲۲۱	۲۰۰۳۱۲۰۵	۲
۱۴۹	۹۷۲۲	۲۰۰۴۰۱۰۹	۳
۱۴۹	۱۰۲۲۳	۲۰۰۴۰۲۱۳	۴
۱۴۹	۱۱۲۲۵	۲۰۰۴۰۴۲۳	۵
۱۴۹	۱۱۷۲۶	۲۰۰۴۰۵۲۸	۶
۱۴۹	۱۲۷۲۸	۲۰۰۴۰۸۰۶	۷
۱۴۹	۱۶۷۳۶	۲۰۰۵۰۵۱۳	۸
۱۴۹	۱۷۷۳۸	۲۰۰۵۰۷۲۲	۹
۱۴۹	۱۸۲۳۹	۲۰۰۵۰۸۲۶	۱۰

1- Descending Orbit

2- European Space Agency



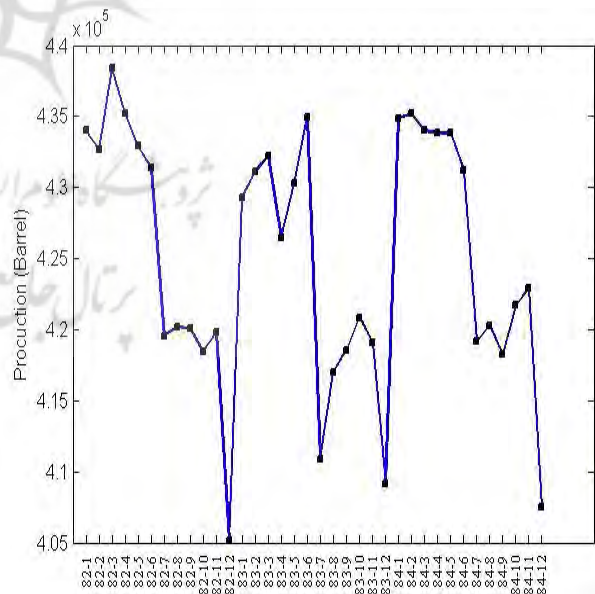
نمودار ۲: تولید ماهانه‌ی چاه شماره‌ی ۱۶۶ در بازه‌ی زمانی سال‌های ۸۵-۸۲

### ۲-۱-۲- آنالیز InSAR

یک سیستم SAR، امواج الکترومغناطیس را در طول موج‌های از چند میلی‌متر تا چند سانتیمتر و در هر شرایط آب و هوایی و در طول شب و روز گسیل می‌دهد و سیگنال بازتابی، هم از نظر شدت و هم از نظر فاز بازتابیده شده از هر المان، در سلول تفکیکی زمینی به صورت آرایه‌هایی از مقادیر موهومی ثبت می‌شود. این مقادیر موهومی میزان بازتابندگی سطح زمین را نشان می‌دهند. هر گاه دو تصویر رادار از یک منطقه و در زمان‌های متفاوت موجود باشد به شرط موجود بودن مدل ارتفاعی منطقه مورد نظر، تصویر اینترفروگرام مربوطه می‌تواند هر گونه جابه‌جایی اتفاق افتاده در منطقه را شناسایی نماید. اگر مسافت رادار تا نقطه زمینی در هر دو تصویربرداری مساوی باشد، فازهای برگشتی یکسان بوده و اختلاف آنها صفر می‌شود. اگر در مدت زمان بین دو تصویربرداری زمین دچار تغییر شود، مسافت رادار تا نقطه زمینی تغییر می‌کند، لذا فاز تصویر دوم نیز شیفت خواهد یافت. این شیفت دلالت بر تغییرات سطح زمین دارد. میزان این تغییرات متناسب با نصف طول موج می‌باشد که یک فرینج در اینترفروگرام تولید می‌کند.

پس از اخذ تصاویر ASAR با استفاده از فایل اطلاعات مداری و کالیبراسیون سنجنده، تصاویر خام توسط نرم‌افزار ROIPAC به تصاویر SLC تبدیل شده و نسبت به هم ثبت هندسی شدند. اینترفروگرام‌ها با استفاده از نرم‌افزار DORIS تهیه و پردازش‌های روش طول باز کوتاه (SBAS) توسط نرم‌افزار Stamps انجام شد. به منظور حذف اثرات توپوگرافی از اینترفروگرام‌ها، از مدل رقومی ارتفاع (SRTM) با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر استفاده شد.

بعلت نبود مشاهدات GPS در سطح میدان بصورت سری زمانی و همچنین اندازه‌گیری‌های ترازبایی، از داده‌های حاصل از تولید چاه‌های میدان در بازه‌های زمانی مشابه با تصاویر اینترفروگرام به منظور اعتبارسنجی نتایج استفاده شد. بدین ترتیب رفتار تولیدی دو چاه واقع در یال غربی میدان مورد بررسی قرار گرفت. نمودارهای شماره‌ی ۱ و ۲ تولید ماهانه‌ی چاه‌های ۷۸ و ۱۶۶ را در بازه‌ی زمانی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ نمایش می‌دهند.



نمودار ۱: تولید ماهانه‌ی چاه شماره‌ی ۷۸ در بازه‌ی زمانی سال‌های ۸۵-۸۲

1- Small Baseline Approach

2- Stanford Method for Persistent Scatterers

زمانی ثبت می‌شوند. بنابراین مناطق بزرگی یافت می‌شوند که دارای همبستگی پایینی باشند و لذا فاز تداخل سنجی در این مناطق بدون استفاده می‌شود.



نمودار ۳: فلوچارت مراحل پردازش اینترفرومتری

محدودیت دیگری که ایجاد می‌شود خطای اتمسفری است، چرا که در بازه اخذ تصاویر، اتمسفر و تأخیر فاز اتمسفری متغیر است. یک روش جهت غلبه بر این محدودیت‌ها استفاده از اینترفروگرام‌هایی است که مؤلفه قائم خط مبنای آنها کمتر از مقدار بحرانی است. در نتیجه مقدار

از آنجا که سیگنال رادار از میان اتمسفر عبور می‌کند، فاز تداخل سنجی شامل چند ترم به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi_G + \Delta\varphi_T + \Delta\varphi_D + \Delta\varphi_{Atm} + noise$$

در این رابطه  $\Delta\varphi$  فاز ناشی از جابه جایی پیکسل در راستای دید ماهواره یا همان فاز ناشی از تغییرات سطح زمین،  $\Delta\varphi_{Atm}$  فاز ناشی از اثرات اتمسفری،  $\Delta\varphi_D$  فاز باقیمانده ناشی از مدار ماهواره،  $\Delta\varphi_T$  فاز ناشی از توپوگرافی و در نهایت  $noise$  فاز نویز ناشی از خطای ثبت تصاویر، نویز حرارتی و سایر خطاهای پردازشی می‌باشد. مدل کردن مؤلفه حاصل از نویز سیستم دشوار است و معمولاً از آن صرف نظر می‌شود. اثرات اتمسفری نیز می‌تواند با استفاده از تصاویر تکراری (روش‌های مبتنی بر سری زمانی مانند SBAS) خنثی شود یا با استفاده از منابع دیگری همچون مدل‌های جهانی اتمسفر مانند MODIS یا MERIS و یا استفاده از مشاهدات ایستگاه‌های GPS تصحیح گردد. مؤلفه مداری نیز با استفاده از اطلاعات مداری دقیق ماهواره قابل حذف است.

مؤلفه ناشی از توپوگرافی را نیز می‌توان از طریق مدل‌های رقمی زمین حذف نمود. بنابراین تنها ترم باقیمانده اختلاف فاز ناشی از تغییر شکل خواهد بود. نمودار شماره ۳ مراحل پردازش اینترفرومتری را نمایش می‌دهد.

### ۳-۱-۲- تحلیل نتایج

در این روش تعداد قابل ملاحظه‌ای تصویر یا اینترفروگرام به کار گرفته شده و پردازش می‌شوند. از طریق تصاویری که در بازه زمانی مورد نظر اخذ شده‌اند با استفاده از آنالیز سری زمانی، نرخ تغییرات سطح زمین برآورد می‌شود. روش تداخل سنجی تفاضلی InSAR در صورتی موفق به شناسایی تغییرات زمین می‌شود که خط مبنای زمانی اینترفروگرام مورد استفاده کمتر از یک مقدار بحرانی باشد. در کاربردهایی که هدف آنها پایش سری زمانی تغییرات با نرخ پایین است، تصاویر متعددی در بازه‌های مختلف

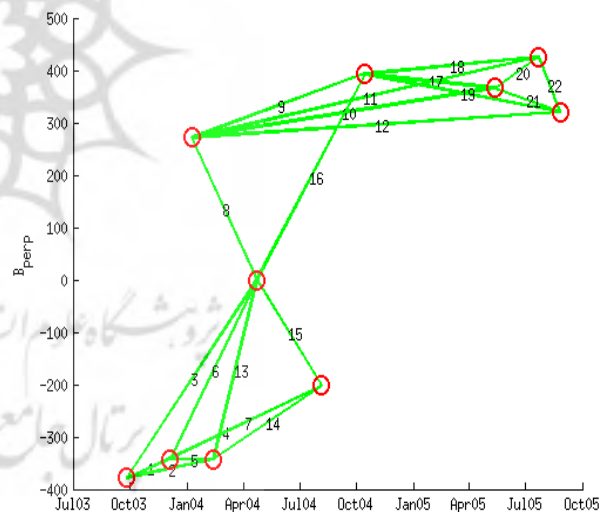
به منظور بررسی تأثیر میزان کاهش فشار ناشی از برداشت و تولید از میدان بر نرخ فرونشست سطح، رفتار تولیدی حاصل از دو چاه واقع در یال غربی میدان و منطقه‌ی فرونشست در بازه‌های زمانی یکسان با تصاویر اینترفروگرام مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۲- مشخصات اینترفروگرام‌های پردازش شده

Bperp	Slave Date	Master Date	No.
۳۵	۲۰۰۳۱۲۰۵	۲۰۰۳۰۹۲۶	۱
۳۴/۸	۲۰۰۴۰۲۱۳	۲۰۰۳۰۹۲۶	۲
۳۷۸	۲۰۰۴۰۴۲۳	۲۰۰۳۰۹۲۶	۳
۱۷۵/۷	۲۰۰۴۰۸۰۶	۲۰۰۳۰۹۲۶	۴
۳۴۳/۲	۲۰۰۴۰۲۱۳	۲۰۰۳۱۲۰۵	۵
۳۴۳	۲۰۰۴۰۴۲۳	۲۰۰۳۱۲۰۵	۶
۱۴۰/۷	۲۰۰۴۰۸۰۶	۲۰۰۳۱۲۰۵	۷
-۲۴۲/۲	۲۰۰۴۰۴۲۳	۲۰۰۴۰۱۰۹	۸
۱۲۱/۲	۲۰۰۴۰۱۰۹	۲۰۰۴۰۱۰۹	۹
۹۳/۷	۲۰۰۵۰۵۱۳	۲۰۰۴۰۱۰۹	۱۰
۱۵۳/۹	۲۰۰۵۰۷۲۲	۲۰۰۴۰۱۰۹	۱۱
۴۸/۱	۲۰۰۵۰۸۲۶	۲۰۰۴۰۱۰۹	۱۲
۳۴۳/۲	۲۰۰۴۰۴۲۳	۲۰۰۴۰۲۱۳	۱۳
۱۴۰/۹	۲۰۰۴۰۸۰۶	۲۰۰۴۰۲۱۳	۱۴
-۲۰۲/۳	۲۰۰۴۰۸۰۶	۲۰۰۴۰۴۲۳	۱۵
۳۹۳/۴	۲۰۰۴۰۱۰۹	۲۰۰۴۰۴۲۳	۱۶
-۲۷/۵	۲۰۰۵۰۵۱۳	۲۰۰۴۰۱۰۹	۱۷
۳۲/۷	۲۰۰۵۰۷۲۲	۲۰۰۴۰۱۰۹	۱۸
-۷۳/۱	۲۰۰۵۰۸۲۶	۲۰۰۴۰۱۰۹	۱۹
۶۰/۲	۲۰۰۵۰۷۲۲	۲۰۰۵۰۵۱۳	۲۰
-۴۵/۶	۲۰۰۵۰۸۲۶	۲۰۰۵۰۵۱۳	۲۱
-۱۰۵/۸	۲۰۰۵۰۸۲۶	۲۰۰۵۰۷۲۲	۲۲

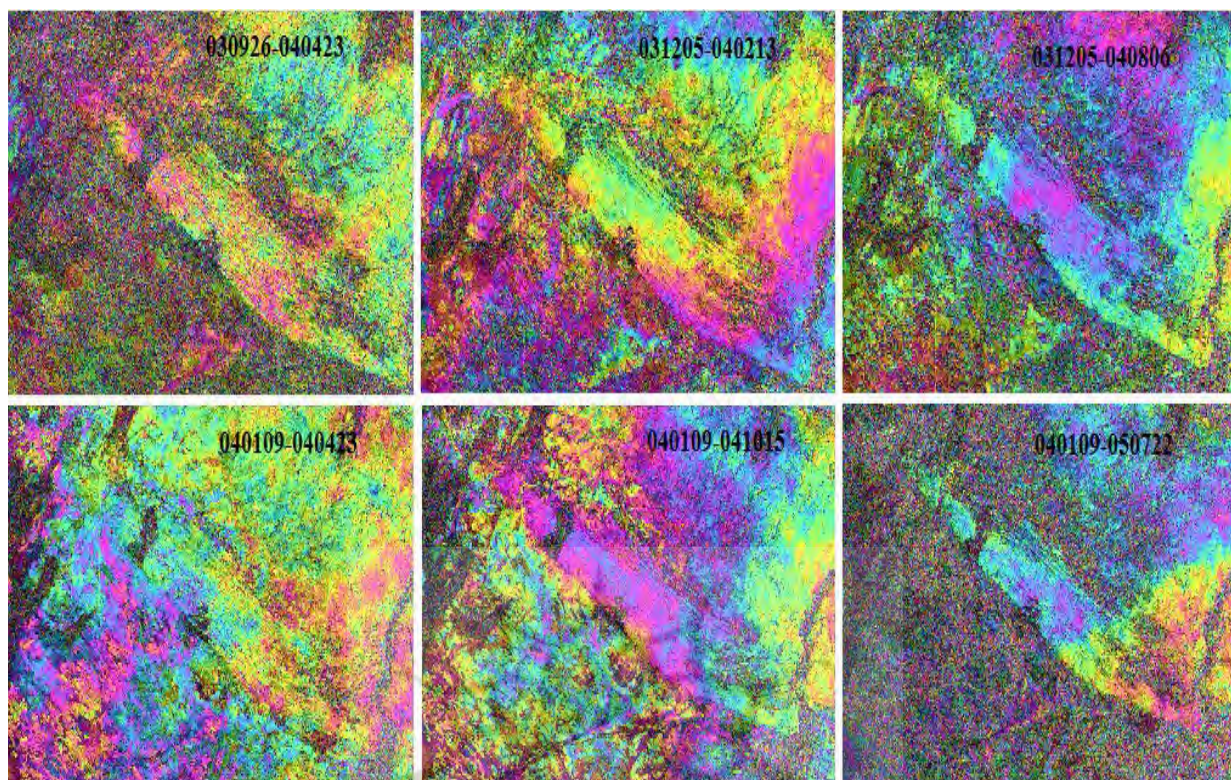
در این میان از بین ۲۲ اینترفروگرام تولید شده از آنالیز سری زمانی، ۱۷ اینترفروگرام با توجه به دارا بودن هم‌دوسی بالا و مطابقت بهتر با مدل وارد مرحله‌ی تفسیر نتایج با داده‌های حاصل از تولید شدند.

هم‌دوسی<sup>۱</sup> بیشینه و تأثیرات ناهمبستگی خط مبنا را کمینه می‌نماید. یک زیرمجموعه از خط مبنا کوتاه، مجموعه‌ای از تصاویر SAR است که مؤلفه قائم بیس‌لاین اینترفروگرام‌ها کوچک باشد و شبکه به‌دست آمده از اینترفروگرام‌ها پیوسته باشد. شبکه‌ای که به این طریق ایجاد می‌شود مشابه یک شبکه ژئودتیکی است، با این تفاوت که مشاهدات در آن اختلاف فاز جابه‌جایی بین زوج تصاویر و مجهولات آن فاز جابه‌جایی در زمان اخذ تصاویر است. در واقع با قرار دادن حد آستانه برای طول مبنا اینترفروگرام‌های تشکیل شده، شبکه SBAS تشکیل می‌شود. نمودار شماره ۴ شبکه‌ی حاصل از ۲۲ اینترفروگرام را در منطقه‌ی مارون نمایش می‌دهد. جدول شماره ۲ مشخصات اینترفروگرام‌های تولید شده را نشان می‌دهد و نگاره ۲ نمونه‌ای از این اینترفروگرام‌ها را نمایش می‌دهد.



نمودار ۴: شبکه‌ی اینترفروگرام‌های تولید شده جهت بررسی فرونشست در منطقه‌ی مارون

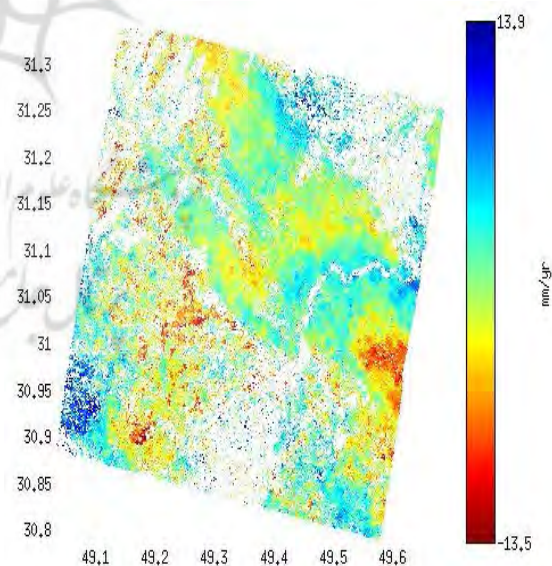
با توجه به نتایج حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری همان‌طور که در نمودار سرعت متوسط مشاهده می‌شود، بیشترین نرخ فرونشست تا ۱۳،۵ میلی‌متر در سال (نگاره ۳)، در راس و یال غربی میدان مشاهده می‌شود.



نگاره ۲: نمونه‌ای از اینترفروگرام‌های تشکیل شده از تاق‌دیس مارون

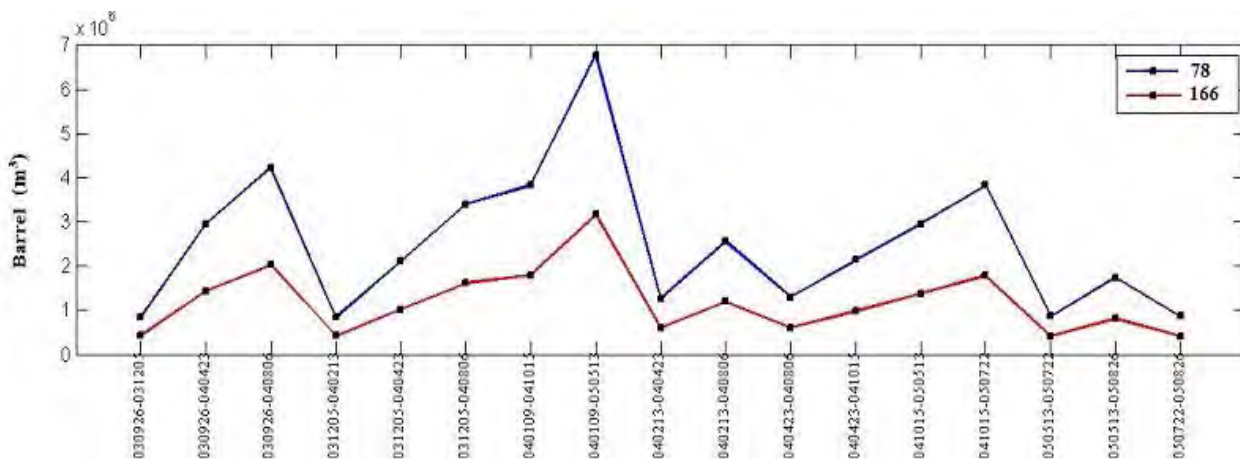
زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار مربوطه مشاهده می‌شود در اینترفروگرام دوم علیرغم زیاد شدن میزان تولید، نوعی بالآمدگی وجود دارد که پس از آن با افزایش روند تولید این بالآمدگی به نشست می‌انجامد. از اینترفروگرام چهارم تا هفتم با افزایش برداشت، به تدریج فرونشست افزایش یافته و در هفتمین اینترفروگرام (۰۴۱۰۱۵-۰۴۱۰۰۹) به حداکثر مقدار خود می‌رسد. پس از آن در اینترفروگرام هشتم علیرغم رسیدن به حداکثر تولید، نوعی جبران و بالآمدگی در یال غربی میدان مشاهده می‌شود.

در اینترفروگرام‌های نه، ده، یازده و دوازده همبستگی میان افزایش و کاهش تولید با میزان فرونشست و بالآمدگی برقرار می‌باشد. در سیزدهمین اینترفروگرام، علیرغم ادامه‌ی روند افزایش تولید، تغییر شدیدی در روند جابجایی رخ داده که بی‌شک وجود فرضیه‌ی دیگری را از جمله فعالیت‌های شدید گسل‌های زیرسطحی و دیگر عوامل

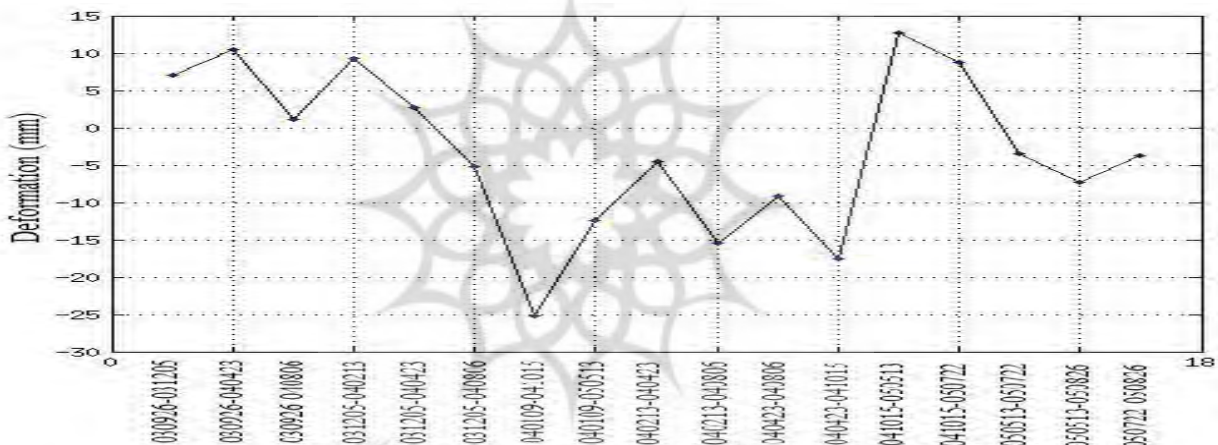


نگاره ۳: نقشه‌ی سرعت جابجایی در راستای دید سنجنده در میدان نفتی مارون

نمودارهای ۵ و ۶ به ترتیب میزان تغییرات در تولید و میزان تغییر شکل سطحی را در یال غربی میدان در بازه‌ی



نمودار ۵: میزان تغییرات در روند تولید از چاه‌ها (۷۸ و ۱۶۶) واقع در یال غربی میدان در زمان‌های مشابه با اخذ تصاویر



نمودار ۶: میزان تغییر شکل سطحی در نقطه‌ای با حداکثر نرخ فرونشست واقع در یال غربی میدان

در این میان تأثیر عوامل زمین ساختی همچون وجود گسل‌های رورانده در منطقه را در تغییر شکل‌های حاصل نمی‌توان نادیده گرفت و بررسی دقیق‌تر رفتار میدان و همچنین پیش‌بینی نرخ فرونشست در آینده منوط به مدل‌سازی سه بعدی میدان می‌باشد.

## ۲-۲ - منطقه‌ی نفتی Lost Hills

زمین‌های نفتی Lost Hills، در غرب دره‌ی سان‌خوآکین کالیفرنیا، ۷۵ کیلومتری غرب بیکرزفیلد و در محدوده عرض‌های ۳۵/۲۲° تا ۳۵/۹۱° شمالی و طول‌های ۱۱۹/۲۷° تا ۱۲۰/۲۱° غربی واقع شده است.

زمین‌ساختی به اثبات می‌رساند که این فرضیه در مورد پانزدهمین اینترفروگرام نیز صادق است. مقادیر بدست آمده از تغییر شکل را تماماً نمی‌توان به فعالیت‌های تولید از میدان نسبت داد.

قسمت عمده‌ای از این تغییر شکل‌ها قطعاً ناشی از عملیات برداشت است و همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود همبستگی بالایی بین تولید و کاهش فشار مخازن وجود دارد. از سوی دیگر با بررسی جزئی‌تر می‌توان مشخص کرد که تأثیر بخار آب اتمسفر بر این اندازه‌گیری‌ها تا چه اندازه بوده و چه میزان از آنها به عملیات تولید از میدان باز می‌گردد.



**فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (مهر)**  
 بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی ... / ۳۱

جمع‌آوری شده بود فرونشست میدان را اندازه‌گیری کردند. حداکثر میزان فرونشست بیش از ۴۰۰ میلی‌متر در سال تخمین زده شد که از طریق اینترفروگرام‌هایی با فاصله زمانی ۱ تا ۲۶ ماه بدست آمد. هدف از این مطالعه، بررسی فرونشست سطحی میدان با استفاده از تصاویر سنجنده‌ی Envisat می‌باشد.

**۲-۲-۱- داده‌های مورد استفاده**

در این مطالعه به منظور بررسی مجدد فرونشست در میدان مذکور، ۱۱ فریم از تصاویر خام سنجنده‌ی Envisat که در بازه‌ی زمانی ۲۰ دسامبر ۲۰۱۰ تا ۱۴ مارس ۲۰۱۲ با وضعیت تصویربرداری پایین‌گذر اخذ شده بودند، مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات داده‌های مورد استفاده در جدول شماره ۳ نشان داده شده است. به منظور حذف اثرات توپوگرافی از اینترفروگرام‌ها، مدل رقومی ارتفاع (SRTM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر مورد استفاده قرار گرفت.

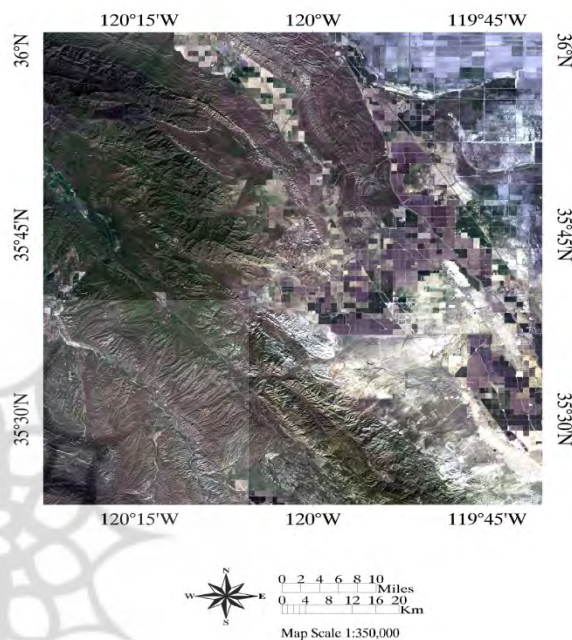
جدول ۳: لیست تصاویر راداری به همراه مشخصات آن

Frame	Orbit	Track	Date	No.
۲۸۸۹	۴۶۰۴۷	۳۴۳	۲۰۱۰۱۲۲۰	۱
۲۸۸۹	۴۶۹۰۹	۳۴۳	۲۰۱۱۰۲۱۸	۲
۲۸۸۹	۴۷۷۷۱	۳۴۳	۲۰۱۱۰۴۱۹	۳
۲۸۸۹	۴۸۶۳۳	۳۴۳	۲۰۱۱۰۶۱۸	۴
۲۸۸۹	۴۹۰۶۴	۳۴۳	۲۰۱۱۰۷۱۸	۵
۲۸۸۹	۴۹۴۹۵	۳۴۳	۲۰۱۱۰۸۱۷	۶
۲۸۸۹	۴۹۹۲۶	۳۴۳	۲۰۱۱۰۹۱۶	۷
۲۸۸۹	۵۰۳۵۷	۳۴۳	۲۰۱۱۱۰۱۶	۸
۲۸۸۹	۵۰۷۸۸	۳۴۳	۲۰۱۱۱۱۱۵	۹
۲۸۸۹	۵۲۰۸۱	۳۴۳	۲۰۱۲۰۲۱۳	۱۰
۲۸۸۹	۵۲۵۱۲	۳۴۳	۲۰۱۲۰۳۱۴	۱۱

**۲-۲-۲- تحلیل نتایج**

در میدان نفتی Lost Hills به منظور انجام روش طول باز کوتاه، ۴۱ اینترفروگرام تهیه شد. نگاره شماره ۴

زمین‌های نفتی منطقه‌ی Lost Hills مساحتی به طول ۳۵ کیلومتر و عرض ۴ کیلومتر را پوشش می‌دهند. نگاره شماره ۳ موقعیت زمین‌های نفتی Lost Hills را در کالیفرنیا مرکزی نشان می‌دهد.



نگاره ۳: موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی نفتی Lost Hills

ذخیره‌ی اصلی نفت در این منطقه مخازن دیاتومیت با تخلخل بالا و نفوذپذیری پایین است. تشکیلات دیاتومیت سرشار از نفت می‌باشند و با توجه به اینکه بسیار ضعیف هستند بدون حمایت فشار کافی، فشرده خواهند شد. استخراج حجم زیاد نفت از این تشکیلات واقع در اعماق حدود ۷۰۰ متری سطح زمین منجر به کاهش فشار مغذی و تراکم قابل توجه سنگ‌های پوششی و در نتیجه فرونشست سطح می‌شود. نخستین پروژه‌های انجام شده در این میدان نفتی توسط مرکز علمی Atlantis انجام شد و در اوایل سال ۱۹۹۷ به چاپ رسید (Van der Kooij, 2002).

Fielding و همکارانش در سال ۱۹۹۸ با استفاده از تحلیل داده‌های تداخل‌سنجی تفاضلی رادار که توسط ماهواره‌های سنجنش از دور آژانس فضایی اروپا (ERS-1, ERS-2)

نمونه‌هایی از این ایتترفروگرام‌ها را نمایش می‌دهند. در هر تصویر پیکسل‌هایی که هم‌دوسی بالاتر از ۰/۲ داشتند استخراج و پس از بازیابی فاز و سرشکنی شبکه به روش کمترین مربعات، سرعت سالیانه استخراج شد. با توجه به فاصله‌ی زمانی کم بین ایتترفروگرام‌ها و کیفیت بالای ایتترفروگرام‌های حاصل، به کارگیری این روش نتایج قابل قبولی را ارائه داده است.

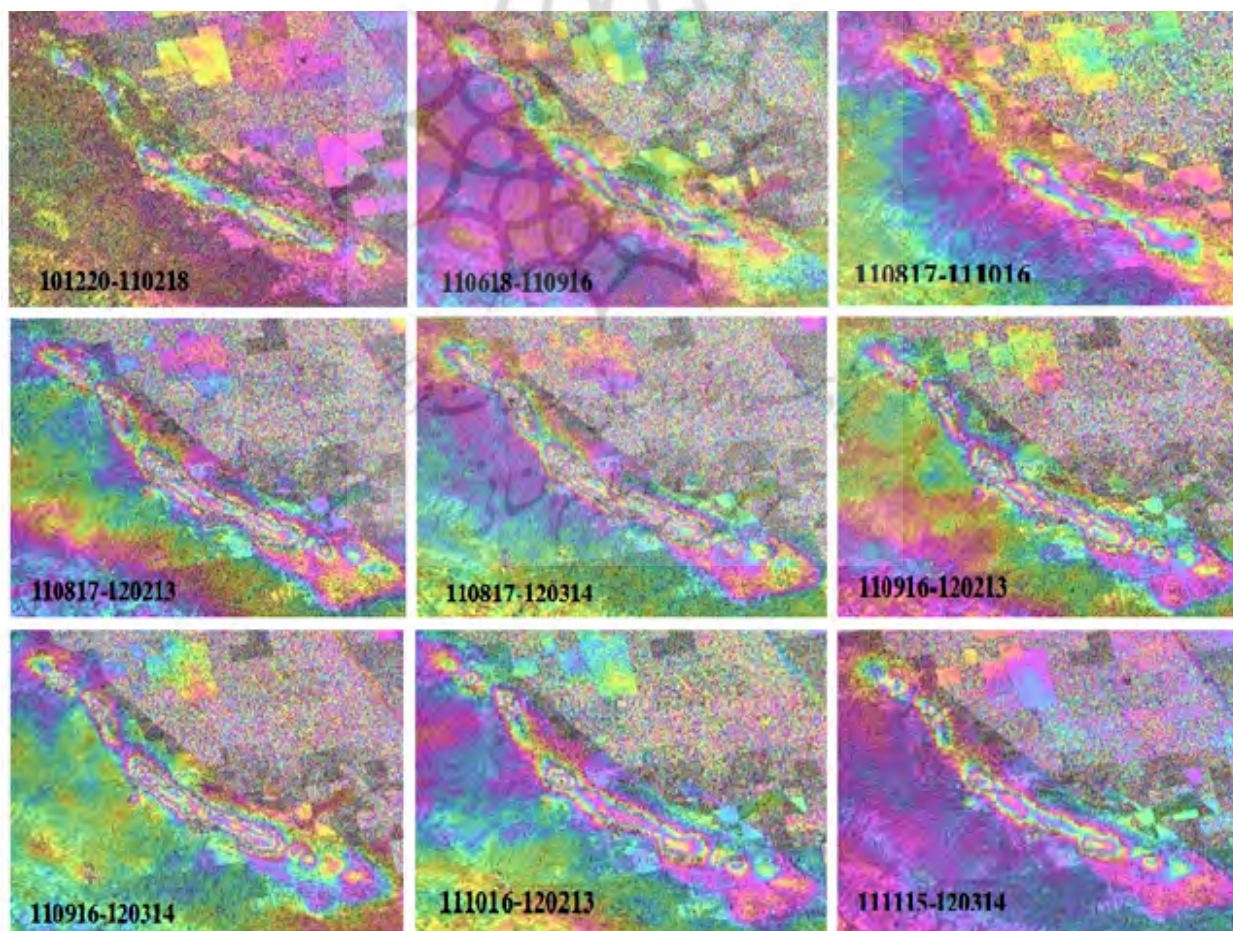
نمودار ۷ نشان دهنده‌ی شبکه‌ی ژئودتیک تشکیل شده از ایتترفروگرام‌های مناسب شرکت کننده در آنالیز سری زمانی می‌باشد. همانطور که در نمودار مربوطه مشاهده می‌شود، خطوط واصل بین نقاط نشان دهنده‌ی زوج تصاویر انتخابی، دایره‌های قرمز نشان دهنده‌ی تصاویر مورد استفاده، محور

افقی طول مبنای زمانی و محور عمودی طول مبنای مکانی را نشان می‌دهند.

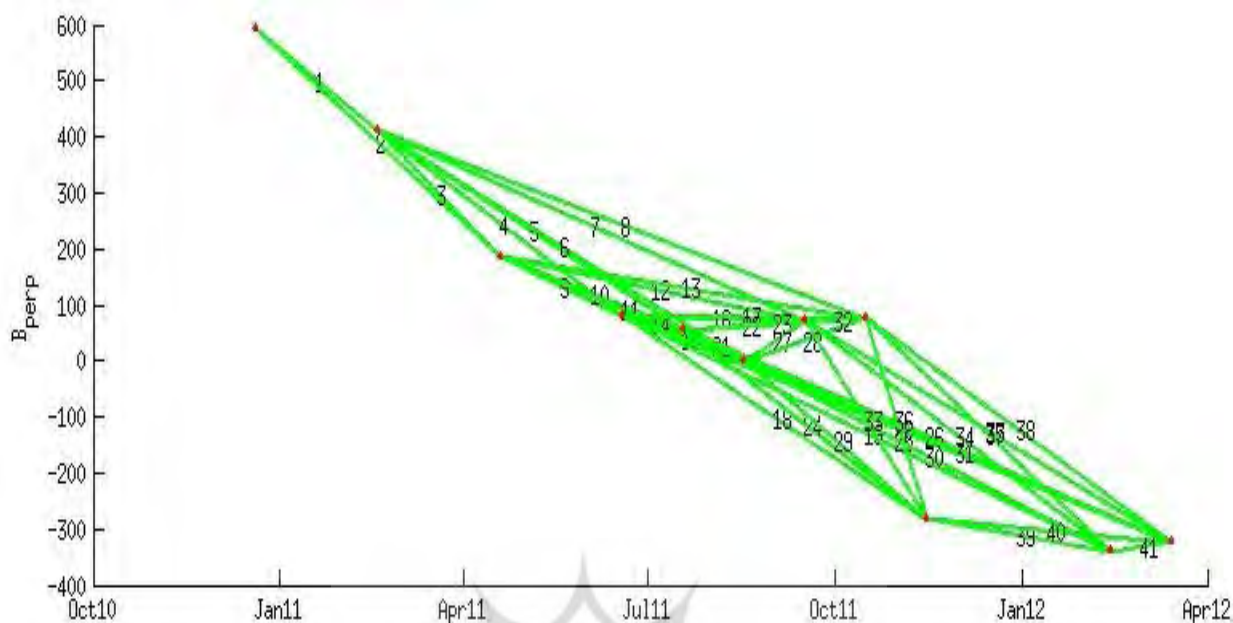
نقشه‌ی سرعت متوسط جابجایی به دست آمده از آنالیز سری زمانی در نگاره ۵ مشاهده می‌شود که نرخ فرونشست را در فاصله زمانی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ در راستای دید ماهواره نشان می‌دهد. مقادیر منفی بیانگر سیگنال‌های فرونشست و مقادیر مثبت میزان بالآمدگی را در سطح میدان نشان می‌دهند.

به منظور نمایش بهتر توزیع نشست و بالآمدگی در میدان نفتی Lost Hills، مقادیر بدست آمده از نقشه‌ی جابجایی بر روی تصویر Google Earth منطقه نمایش داده شده است (نگاره ۶).

بدین ترتیب پیکسل‌های رنگی میزان جابجایی سطحی را



نگاره ۴: نمونه‌ای از ایتترفروگرام‌های تشکیل شده از زوج تصاویر اخذ شده‌ی Envisat از منطقه نفتی Lost Hills

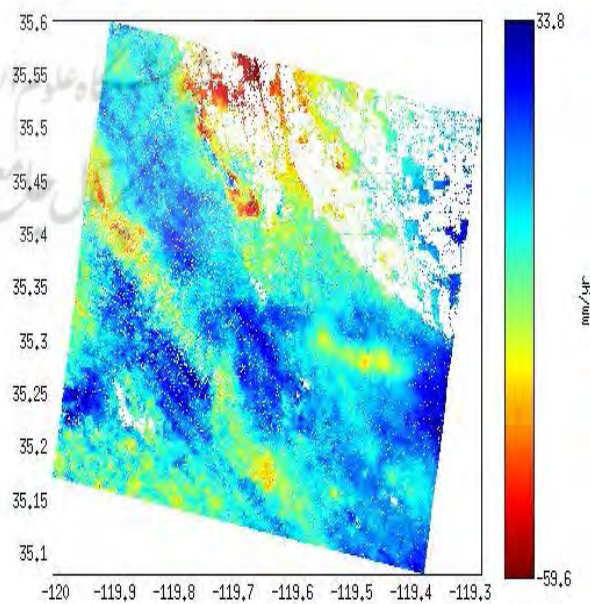


نمودار ۷: شبکه اینترفروگرام‌های تشکیل شده از منطقه Lost Hills



نگاره ۶: نمایش پیکسل‌های رنگی بر روی تصویر مایل  
 Lost Hills از منطقه نفتی Google earth

در راستای دید سنجنده نشان می‌دهد، بطوریکه پیکسل‌های آبی بیانگر نرخ فرونشست سطح با سرعت ۵/۹ سانتی متر در سال و پیکسل‌های قرمز میزان بالاآمدگی را تا ۳/۴ سانتی متر در سال نشان می‌دهند.



نگاره ۵: نقشه‌ی سرعت جابجایی در راستای دید سنجنده

### ۳- تقدیر و تشکر

در پایان بر خود لازم می‌دانیم که از شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب جهت در اختیار قرار دادن اطلاعات تولید و همچنین سازمان فضایی اروپا جهت دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای کمال تشکر را داشته باشیم.

of satellite radar Interferometry to subsidence monitoring in the Belridge and Lost Hills fields, California, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS apos, pp. 201-202, 2002.

15. Wegmuller, U., Werner, C., Strozzi, T. SAR interferometric and differential interferometric processing chain, in: Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Seattle, U.S.A, pp. 1106-1108, 1998.

#### ۴- منابع و مآخذ

- ۱- قلی پور، ع. م. و حقی، ع. (۱۳۶۹)، مطالعه جامع سازند آسماری میدان مارون، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب
2. Adams, T. D., and Burgeois, F., 1967, Asmari Biostratigraphy. Geological and Exploration Div., IOOC report No. 1074.
3. Adams, T. D., 1969, The Asmari Formation of Lurestan and Khuzestan Province.
4. Alavi, M., 2004, Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust Belt of Iran and its proforland evolution, Am. Journal of science, V. 304, pp. 1-20.
5. Fielding, E.J., Blom, R.G., Goldstein, R. Rapid subsidence over oil fields measured by SAR Interferometry. Geophys. Res. Lett. 25 (17), 3215-3218, 1998.
6. G.V. Chilingar B. Endres, Environmental hazards posed by the Los Angeles Basin urban
16. oilfields: an historical perspective of lessons learned, Environmental Geology (2005) 47:302-317.
7. Groshong, R.H., Epard, J. L., 1994. The role of strain in area constant detachment folding. Journal of Structural Geology 16(5), 613-618.
8. Intera ECL Petroleum Technologies, Ltd. (1992), Marun Field Study.
9. Ketelaar, V.B.H. Satellite Radar Interferometry, Subsidence Monitoring Techniques. Springer, Netherlands, 2009.
10. Mayuga, R.F. Geology and development of California giant; the Wilmington oil field, geology of giant petroleum fields. Am. Assoc. Pet. Geol. Mem. 14, 158-184, 1970.
11. McQuillan, H., 1974, Fracture patterns on Kuh-e Asmari anticline Southwest Iran, AAPG Bull., V. 58, No. 2, pp. 236-246.
12. Stancliffe, R.P.W., Van der Kooij, M.W.A. The use of satellite-based radar interferometry to monitor production activity at the cold lake heavy oil field, Alberta, Canada. AAPG Bull. 85 (5), 781-793, 2001.
13. Stocklin, J., 1968, Structural history and tectonic of Iran, a review, AAPG Bull., 52, 1229-1258.
14. Van der Kooij, M.W.A., Mayer, D. The application