

## مطالعه فرونشست در غرب استان گلستان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری

مرجان تورانی<sup>۱</sup>، مریم آق‌آتابای<sup>۲\*</sup>، مه‌آسا روستایی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> فارغ‌التحصیل دوره کارشناسی‌ارشد تکتونیک، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده علوم دانشگاه گلستان

<sup>۳</sup> سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران

تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۳۱

### چکیده

در سال‌های اخیر، فرونشست زمین باعث بروز مخاطره جدی محیطی در دشت‌های مختلف ایران شده است. در کنار بسیاری از دشتهای ایران، مطالعات انجام شده با استفاده از اطلاعات GPS ایستگاه گرگان و شواهدی از قبیل لوله‌زایی چاهها در دشت گرگان نیز نشان‌دهنده فرونشست زمین می‌باشد. روش‌های متنوعی برای اندازه‌گیری فرونشست زمین وجود دارد که شامل استفاده از جی‌پی‌اس، ترازبایی ابزار دقیق و روش‌های دورسنجی بخصوص روش تداخل‌سنجی راداری می‌باشد. از بین این روش‌ها، روش تداخل‌سنجی راداری روشی مؤثر برای اندازه‌گیری دگرشکلی‌های سطح زمین است. این تکنیک، فاز گرفته شده از دو مجموعه داده رادار از یک منطقه در دو زمان مختلف را مقایسه و با ایجاد اینترفروگرام، قادر به اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین در این دوره زمانی است. در این تحقیق، پدیده فرونشست زمین در غرب استان گلستان با بکارگیری روش تداخل‌سنجی راداری و استفاده از تصاویر راداری انویست بررسی شد. برای دو مجموعه تصاویر راداری (۱۳۸۸/۹/۲۰ - ۱۳۸۵/۱۱/۶ و ۱۳۸۹/۱۰/۲۵ - ۱۳۸۸/۹/۲۰) تداخل‌نگاشت ایجاد شد. در تداخل‌نگاشت مجموعه اول، تغییرات خاصی مشاهده نشد که احتمالاً به دلیل کوتاه بودن فاصله زمانی دو تصویر می‌باشد. برای مجموعه دوم که فاصله زمانی دو تصویر ۳۴ ماه و ۱۵ روز است، یک منطقه فرونشست در محدوده شمال شهرگرگان مشاهده شد. محدوده فرونشست تقریباً روند شرقی- غربی دارد که با روند ساختارهایی نظیر گسل خزر همخوانی دارد و میزان فرونشست در آن چیزی حدود ۴/۸ سانتی‌متر محاسبه شد. نمودارهای تراز سطح آب و میزان بارندگی این محدوده در سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ علیرغم نوسانات فصلی روند نزولی نشان می‌دهند. پیامد این افت سطح آب‌زیرزمینی می‌تواند منجر به فرونشست زمین در منطقه شده باشد.

**واژه‌های کلیدی:** فرونشست، آب‌های زیرزمینی، شهر گرگان، گلستان، تداخل‌سنجی راداری

### مقدمه

افت سطح آب زیرزمینی می‌باشد. در این حوضه دگرریختی و فشردگی در سیستم آبخوانی که آب زیرزمینی را نگه می‌دارد مشاهده شده است (اوستون و همکاران، ۲۰۱۵، ۲۰۱۰). در ایران نیز اولین بار فرونشست زمین در دشت رفسنجان در سال ۱۳۴۶ همراه با پدیده لوله‌زایی در چاههای کشاورزی گزارش شده است (حسینی میلانی، ۱۳۷۳ ص ۹۳). بسیاری از دشت‌های ایران از جمله زرنند و کرمان (رحمانیان، ۱۳۶۵)، دشت سیرجان (عباس‌نژاد، ۱۳۷۷)، اردکان یزد (عالمی، ۱۳۸۱)، فامنین-کبودآهنگ همدان (امیری و همکاران، ۱۳۸۳)، معین‌آباد ورامین (شمشکی و انتظام سلطانی، ۱۳۸۴)، تهران-شهریار

یکی از مشکلات اساسی و روزافزون به وجود آمده در بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران، پدیده فرونشست می‌باشد. در سال‌های اخیر، مناطق مختلفی از دنیا به خصوص نقاط خشک و کم‌باران با این پدیده روبرو شده‌اند (پاچکو<sup>۲</sup>، ۲۰۰۶، ص ۱۵۱؛ لارسون و همکاران، ۲۰۰۱؛ ترن و فردلان، ۲۰۰۰). به عنوان مثال می‌توان به فرونشست زمین در حوضه کنیا که قسمت بزرگی از آناتولی - ترکیه می‌باشد اشاره کرد که از اواسط دهه ۱۹۷۰ میلادی شروع شده و وابسته به

\*نویسنده مسئول: maryamatabby@yahoo.com

گسل‌های کواترنری است که پهنه دشت را قطع کرده‌اند. دهقانی و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و تجزیه و تحلیل سری زمانی، نرخ سالانه فرونشست را در دشت نیشابور، چیزی بیش از ۱۹ میلی‌متر بر سال تعیین کردند. صالحی و همکارانش (۲۰۱۲) با این تکنیک، میزان فرونشست دشت مهبیار جنوبی واقع در استان اصفهان را در دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت و طول مدت محاسبه کردند. جنت و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از همین روش فرونشست دشت گلیپگان در استان اصفهان را مورد پایش قرار داده و برای بازه زمانی کمتر از یک سال فرونشستی به میزان حداکثر ۱۹ سانتی‌متر بدست آوردند. این محققین، میزان جابجایی قائم بدست آمده از این روش را با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های شکاف‌سنج مقایسه کردند. شمشکی و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از همین روش میزان فرونشست را در دشت هشتگرد را بدست آوردند. شریفی‌کیا (۱۳۹۱) میزان فرونشست بدست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری در دشت نومق-بهرمان واقع در استان کرمان را با تغییرات تراز آبی مستخرج از چاههای پیژومتری مقایسه نموده و پی به ارتباط عددی بین آنها برده است. نتایج پژوهش صالحی و همکاران (۱۳۹۲) در دشت مهبیار جنوبی نشان می‌داد که در نتیجه افت سطح ایستابی، سطح زمین با سرعت ثابتی در حال افت در محدوده خطر می‌باشد. افضل‌ی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از تداخل‌سنجی تفاضلی راداری، آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها از پدیده فرونشست زمین در دشت دامغان را ارزیابی نمودند.

در این تحقیق پدیده فرونشست در غرب استان گلستان، دشت گرگان، با استفاده از تداخل‌سنجی راداری ارزیابی می‌شود. در سال‌های اخیر در دشت گرگان نیز همانند سایر نقاط ایران، کاهش نوسانات آسمانی باعث برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی شده است. شواهد مختلف در دشت گرگان حاکی از بروز پدیده فرونشست در آن است؛ در برخی نقاط در دشت پدیده لوله‌زایی مشاهده شده که خود شاهدی بر وجود فرونشست در این دشت می‌باشد (شکل ۱).

(بلورچی، ۱۳۸۴)، گلیپگان (جنت و همکاران، ۱۳۸۸)، هشتگرد (شمشکی و همکاران، ۱۳۹۰) دشت تهران (میر شاهی و همکاران، ۱۳۹۲)، مشهد (مداح و همکاران، ۱۳۹۲)، دامغان (افضلی و همکاران، ۱۳۹۲)، و ... نیز متحمل فرونشست هستند و این مشکل به‌طور روز افزون در مناطق بیشتری خودنمایی می‌کند.

برای اندازه‌گیری فرونشست زمین از روش‌های مختلفی از جمله استفاده از جی‌پی‌اس<sup>۱</sup>، تراز یابی دقیق و تکنیک‌های سنجش از دور به خصوص تداخل‌سنجی راداری<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. تداخل‌سنجی راداری با دریچه مصنوعی<sup>۳</sup> یکی از روش‌هایی است که در دو دهه اخیر انقلاب بزرگی در زمینه مطالعات تغییر شکل پوسته زمین ایجاد کرده است (گابریل<sup>۴</sup>، ۱۹۸۹). در نقاط مختلف دنیا از روش تداخل‌سنجی راداری برای شناسایی و اندازه‌گیری فرونشست زمین استفاده کرده‌اند (کروستو و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۰۲؛ چنگ و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۰۴؛ کاربوغنین و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۰۴؛ مینگشنگ لیاو<sup>۸</sup>، ۲۰۰۸؛ داگینگ جی و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۱۰؛ کاگوا و فرونو<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۰؛ اوبپیت و همکاران<sup>۱۱</sup>، ۲۰۱۳). در چند سال اخیر، در ایران نیز از این روش در پایش تغییر شکل‌های سطح به‌ویژه فرونشست استفاده شده است. از آن جمله می‌توان به پژوهش متق و همکاران (۲۰۰۶) که در آن میزان فرونشست دشت مشهد را با استفاده از داده‌های جی‌پی‌اس، تراز یابی و تداخل‌سنجی راداری ارزیابی کرده‌اند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ بیشترین فرونشست به میزان حدود ۲۸ تا ۳۰ سانتی‌متر بر سال در این دشت روی داده است؛ همچنین به این نتیجه رسیدند که منطقه در حال فرونشست تحت کنترل ساختارهای منطقه بخصوص

1. GPS (Global Positioning System)

2. Radar Interferometry

3. SAR Interferometry

4. Gabriel

5. Crosetto et al.

6. Chang et al.

7. Carbognin et al.

8. Mingsheng Liao.

9. Daging Ge et al.

10. Kagawa and Furuno

11. Aobpaet et al.

مقاله، هدف شناسایی مناطق محتمل فرونشست در غرب استان گلستان و بخصوص محدوده شهر گرگان، دلایل احتمالی فرونشست و تعیین مناطقی است که بیشترین میزان جابجایی قائم را متحمل می‌شوند.

فروودی و محبی (۱۳۸۹) با بررسی داده‌های جی‌پی‌اس در ایستگاه گرگان طی سال‌های ۲۰۰۶ تا اوایل نیمه دوم ۲۰۰۸ میلادی، به این نتیجه رسیدند که در این دوره‌ی زمانی ۱۳۵ میلی‌متر فرونشست به صورت نامنظم در شهر گرگان رخ داده است. در این



شکل ۱: لوله‌زایی در دشت گرگان (الف) در چاه پی‌زومتر عمیق (ب) در چاه عمیق بهره‌برداری (برگرفته از آرشیو شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان)

۵۵°، در نیمه شمالی نقشه‌ی زمین‌شناسی گرگان واقع شده است و به‌عنوان مهم‌ترین گسل لرزه‌زای استان گلستان، از چندین پاره‌گسل تشکیل شده است. فرونشست گودال خزر در شمال و برپایی کوه‌های البرز و راندگی آن بر روی جنوب حوضه‌ی خزر جنوبی در راستای این گسل صورت می‌گیرد (آکسن و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۱؛ آلن و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۰۳). بیشترین جابجایی در روی این گسل در بخش میانی آن، در جنوب‌غرب گرگان دیده می‌شود. در محدوده‌ی گرگان سامانه گسلی خزر را می‌توان به‌عنوان راندگی‌هایی با شیب رو به جنوب در نظر گرفت که به‌طور محلی شیست‌های گرگان را در مقابل نهشته‌های کواترنری قرار می‌دهد (آلن و همکاران، ۲۰۰۳)، (شکل ۲، الف). گسل شمال البرز نیز گسلی معکوس است که با طولی حدود ۴۰۰ کیلومتر و راستای خم‌دار با انحنای کلی به سمت جنوب یک ساختار عمده در منطقه می‌باشد. شیب گسل البرز زیاد بوده و به سمت جنوب تا جنوب‌شرق است (شاه‌پسندزاده و زارع، ۱۳۷۴)، (شکل ۲، الف).

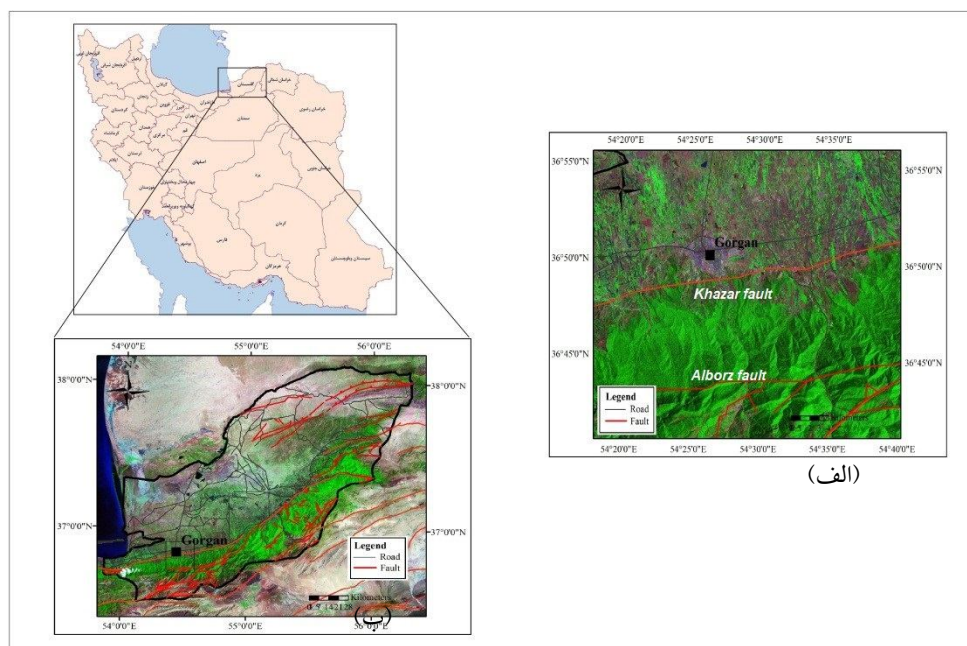
### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شرق حوضه‌ی خزر جنوبی قرار گرفته است و در شمال رشته کوه‌های البرز شرقی واقع شده است (شکل ۲). در غرب استان گلستان، گستره دشت گرگان به‌عنوان یک پهنه انتقالی بین پهنه در حال برپایی کپه داغ و پهنه در حال فرونشینی سریع خزر جنوبی معرفی شده است و از جنوب توسط گسل خزر از پهنه البرز جدا می‌شود و از شمال در راستای گسل کپه‌داغ با فرونشستگی قره‌بغاز و صحرای غرب ترکمنستان همسایه است (قاسمی و همکاران، ۱۳۸۶).

مهم‌ترین گسل‌های فعال استان که شامل گسل‌های خزر و شمال البرز می‌باشد، با روند شمال شرق- جنوب غرب تا شمال غرب- جنوب شرق و سازوکار عمقی راندگی با کمی سامانه راستالغز چپ‌بر در پهنه ساختاری البرز گزارش شده است (شاه‌پسندزاده، ۱۳۸۳؛ هالینگورث و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸، ۲۰۱۰؛ نعمتی و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۱). گسل خزر با راستای خم‌داری در حاشیه جنوبی دریای خزر قرار گرفته است. بخشی از گسل خزر، بین طول‌های جغرافیایی ۷۵° تا ۷۵°

3. Axen et al.  
4. Allen et al.

1. Hollingsworth, et al.  
2. Nemati, et al.



شکل ۲: الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه، ب) استان گلستان در شمال شرق ایران و گرگان در غرب استان گلستان بر روی مدل ارتفاعی رقومی به همراه گسل‌های اصلی (لایه رقومی گسل‌ها برگرفته از حسامی آذر و همکاران، ۱۳۹۰)

### مفاهیم، دیدگاه‌ها و مبانی نظری

فرونشست یا نشست تدریجی زمین پدیده‌ای ژئومورفیک است که تحت تاثیر عوامل طبیعی و گاهی نیز بواسطه دخالت انسان‌ها روی می‌دهد و به شکل شکاف‌هایی بر روی سطح زمین، فروچاله، نشست منطقه‌ای و سیلاب نمایان می‌شود (هافمن و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳). به‌طور کلی عوامل مختلفی باعث وقوع پدیده فرونشست می‌شود، ولی در بسیاری از مناطق برداشت بی‌رویه آب از سفره‌های زیرزمینی به ویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های تحکیم نیافته انباشته شده‌اند، موجبات فرونشست زمین را فراهم می‌آورد. با توسعه تکنیک‌های کاربری زمین و تراکم انسانی به دلیل فشار زیاد بر زمین، تعادل طبیعی آب و خاک و شرایط هیدروژئومورفولوژی مناطق دستخوش تغییر می‌شود. در این بین، مناطق شهری به دلیل تراکم بالای جمعیت، ساخت و سازها و خطوط ارتباطی مهم، در برابر فرونشست بسیار آسیب‌پذیرتر می‌باشند. گرچه در کوتاه مدت ممکن است در مناطق در حال فرونشست، خرابی به میزان

گسترده مشاهده نشود و حتی آثار سطحی حاصل از آن نیز به راحتی قابل تشخیص نباشد، اما با این وجود در دراز مدت، بطور معمول خسارت‌های ناشی از فرونشست‌ها و شکاف‌های زمین ترمیم‌ناپذیر، پرهزینه و مخرب می‌باشند. به عنوان مثال، یکی از اثرات متداول فرونشست در مناطق روستایی و شهری، آسیب به چاه‌ها می‌باشد که موجب خرابی چاه‌ها می‌شود. از این رو، برای تشخیص میزان فرونشست، اندازه‌گیری و پایش تغییر شکل سطح زمین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

یکی از ابزارهای توانمند جهت پایش فرونشست، روش تداخل‌سنجی راداری است. تداخل‌سنجی راداری اغلب به عنوان یک تکنولوژی جدید برای پایش دگرریختی‌های سطح زمین شناخته شده است و پتانسیل کامل کارایی‌های آن حتی به وسیلهٔ مجامع علمی دقیق مشخص نشده است و همچنین نتایج حاصل از این روش متعدد و پیچیده می‌باشد (فررتی، ۲۰۱۴). در حال حاضر این روش در میان سایر روش‌های زمینی و فضایی، به‌عنوان کارآمدترین روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت و قدرت

1. Hoffman et al.

مشخصات سه تصویر انتخابی از گذر پایین رونده ۵۶ در جدول ۱ ارائه شده است.

بعد از اخذ تصاویر، ابتدا فرمت داده‌های آژانس فضایی به فرمت SLC که قابل بازخوانی توسط نرم افزار است، تبدیل شدند. سپس تصاویر فرعی در تصویر مرجع ثبت هندسی گردیدند؛ زیرا این عمل باعث می‌شود تا موقعیت اهداف زمینی در راستای بُرد و آزیموت در تصاویر فرعی و مرجع دارای مختصات یکسانی گردند؛ بنابراین با استفاده نرم‌افزار، ابتدا دو تصویر با دقت زیر پیکسل نسبت به یکدیگر ثبت شدند. سپس با تفاضل فازهای نقاط متناظر، تداخل نگاشت تولید شد. برای تولید یک تداخل نگاشت از زوج‌های تصویری ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ و نگاشت دیگر از زوج ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ استفاده شد، اما از آنجایی که تداخل نگاشت‌های حاصل علاوه بر میزان تغییر شکل سطح زمین دارای اثر توپوگرافی، اتمسفر، کرویت‌زمین و خطای مداری ماهواره می‌باشد، بایستی این اثرات را از تداخل نگاشت‌ها حذف نمود تا بتوان به میزان جابجایی پی‌برد. حذف اثر توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی<sup>۶</sup>، ماهواره راداری ناسا<sup>۷</sup> با توان تفکیک مکانی ۹۰ متر منطقه صورت گرفت. پس از این مراحل، تداخل نگاشت در بازه زمانی مورد مطالعه تهیه گردید. از آنجایی که تداخل نگاشت حاصله ممکن است حاوی نویزهایی باشد که منجر به پایین آمدن کیفیت تداخل نگاشت شود، لازم است تا با اجرای فیلترهای تطبیقی اثر این نویزها از روی تداخل نگاشت حذف گردد.

نویز می‌تواند در نتیجه اختلاف زمانی دریافت زوج تصویری و یا در اثر تفاوت خط مبنای مکانی پدید آمده باشند.

تفکیک مکانی بسیار بالا به شمار می‌رود (پلتزر و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۹۹۸) که تا حد زیادی پی‌جویی فرونشست زمین در مناطق شهری را تسهیل کرده است (تسارو و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۰؛ فرونو و سارتی<sup>۳</sup>، ۲۰۰۰). از جمله مزایای دیگر این روش می‌توان به پوشش وسیع، نداشتن نیاز به کار میدانی، مقرون به صرفه بودن و امکان دستیابی به اطلاعات در هر شرایط آب و هوایی و دسترسی به آن با دقتی معادل با دقت اندازه‌گیری‌های سیستم مکان‌یابی جهانی و ترازبایی دقیق اشاره کرد.

### داده‌ها و روش تحقیق

روش تداخل سنجی راداری، با مقایسه سیگنال‌های فاز برگشتی دو دسته داده‌های رادار درجه مصنوعی که از یک منطقه در دو زمان مختلف اخذ شده‌اند، قادر به اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین در آن بازه زمانی می‌باشد (ماسونت و فیگل<sup>۴</sup>، ۱۹۹۸). در شیوه تداخل سنجی راداری با پردازش دو نگاره رادار در مقطع زمانی موردنظر تداخل نگاشت تولید می‌شود. در این نگاشت‌ها مناطقی که دچار جابجایی شده باشند با ایجاد باندهای طیف رنگی از آبی به قرمز نسبت به مناطق با ثبات تفکیک می‌گردند.

در این تحقیق، تصاویر ماهواره انویست<sup>۵</sup> که در محدوده باند C امواج مایکروویو (۵۶ سانتی‌متر) اخذ تصویر می‌کند از آژانس فضایی اروپا سفارش داده شد. اطلاعات به صورت خام از این آرشیو تهیه و سپس بعد از پردازش‌های کامپیوتری از طریق نرم‌افزار تخصصی SARSCAPE در پلات فرم ENVI4.8 مورد پردازش استاندارد قرار گرفتند. از میان تصاویر موجود برای کاهش نویز از زوج تصویر راداری با بازه زمانی نسبتاً کوتاه و دارای خط مبنای مکانی مناسب استفاده شد.

1. Peltzer et al.
2. Tesaruo et al.
3. Fruneau & Sarti
4. Massonnet & Fiegl,
5. Envisat

6. DEM  
7. SRTM

جدول ۱: مشخصات تصاویر اخذ شده

Mission	Sensor	Track	Pass	Swath	Date	Orbit
Envisat	ASAR/IM	56	Ascending	16	2007-01-26	25661
Envisat	ASAR/IM	56	Ascending	16	2009-12-11	40691
Envisat	ASAR/IM	56	Ascending	16	2010-01-15	41192

حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ به مدت ۳۴ ماه و ۱۵ روز، در بخش‌های شمالی شهر گرگان باندهای طیف رنگی (از آبی به قرمز) نسبت به مناطق اطراف تفکیک شده است که وقوع پدیده فرونشست را تایید می‌کند (شکل ۴). با ترسیم نقشه میزان جابجایی شهر گرگان (شکل ۵) میزان فرونشست در منطقه مورد مطالعه در این دوره‌ی زمانی حدوداً ۴/۸ سانتی‌متر به دست‌آمد. این مقدار کمتر از میزان فرونشست محاسبه شده با جی‌پی‌اس توسط فرهودی و محبی (۱۳۸۹) است که در آن برای بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ فرونشستی برابر با ۱۳۵ میلی‌متر محاسبه شده بود.

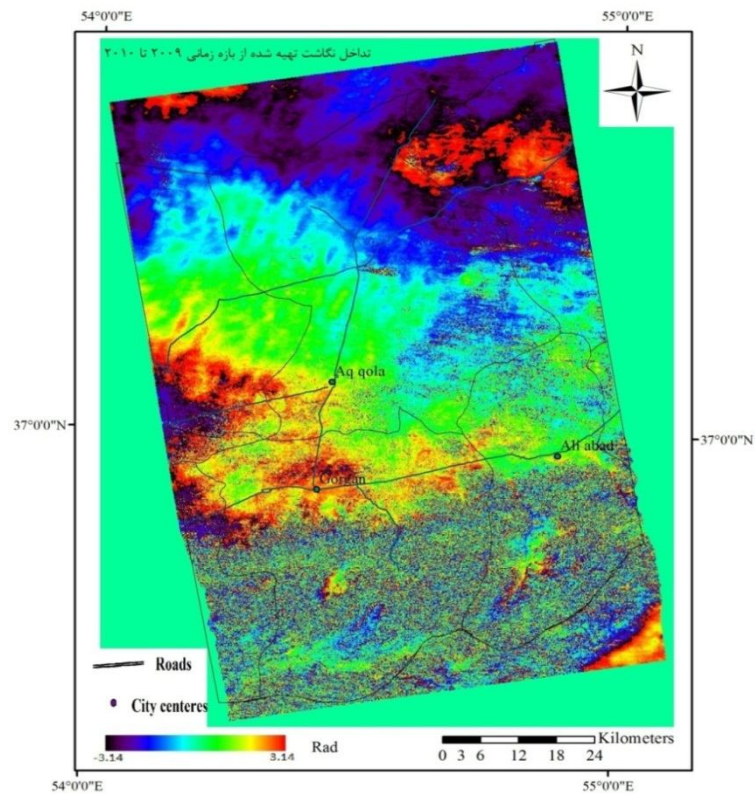
همانطور که قبلاً ذکر گردید، یکی از دلایل مهم فرونشست افت سطح ایستابی است. برای بررسی این موضوع نمودارهای میزان بارش سالیانه و تغییرات سطح آب زیرزمینی در شهر گرگان ترسیم شد (شکل ۶). نمودار بارش سالیانه شهر گرگان که برای بازه زمانی بین ۱۳۸۰ تا ۹۲ ترسیم شد، نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه کمترین بارش را در بازه زمانی مورد مطالعه (اواخر ۱۳۸۵ تا اواخر ۸۸) تجربه کرده است (شکل ۶-الف)؛ همچنین نمودارهای تغییر سطح آب زیرزمینی در دو ایستگاه واقع در محدوده شمال شهر گرگان که سیگنال فرونشست در آن مشاهده شد (ایستگاههای گرگان و انجیراب)، نشان می‌دهند که در بازه زمانی ۱۳۸۵ تا ۸۹ تراز سطح آب زیرزمینی گرگان علیرغم نوسانات فصلی دارای روند نزولی می‌باشد. در این نمودارها میزان بارش سالیانه بر حسب میلی‌متر و تراز سطح آب زیرزمینی بر حسب متر نسبت به سطح مبنا (سطح آب‌های آزاد) ارائه شده است. این نمودارها نشان می‌دهند که دلیل اصلی افت سطح زمین در شهر گرگان، کاهش نزولات جوی و برداشت بی‌رویه از ذخایر آب‌های زیرزمینی بوده است که منجر به افت سطح آب زیرزمینی و در نهایت فرونشست شده است.

نتیجه این فرایند ضمن حذف نویز از فاز مربوط به جابجایی و بهبود کیفیت بصری فرینچ‌های تداخل نگاشت، منجر به تولید نقشه همدوس نیز خواهد شد که این نقشه به نوبه خود شاخص مناسبی از کیفیت تداخل نگاشت و مناسبت آن جهت ادامه فرایند پردازش تداخل‌نگاری خواهد بود. در این پژوهش با استفاده از فیلتر تطبیقی گلداشتاین، نویزهای تداخل نگاشت کاهش یافت. بعد از اعمال فیلتر بر روی تداخل نگاشت بازیابی فاز نهان انجام گرفت که در حقیقت یکی از پیچیده‌ترین و مهم‌ترین مراحل در پردازش تداخل‌نگار مرحله بازیابی فاز می‌باشد. از آنجایی که فاز تداخل‌نگاری تنها می‌تواند به اندازه  $2\pi$  تغییر کند ولی در این مرحله ممکن است تغییرات آن بیشتر از مقدار یاد شده باشد. فرایند بازیابی فاز باعث خواهد شد تا مقادیر واقعی فاز تداخل‌نگار مجدداً محاسبه شده و بدینوسیله ابهام  $2\pi$  اصلاح گردد. در این راستا، الگوریتم زیادی ارائه شده است که در این پژوهش از روش MCF استفاده شد؛ زیرا منطقه مورد مطالعه شامل برخی مناطق با همدوسی پایین می‌باشد و این که نسبت به سایر الگوریتم‌های بازیابی فاز که باعث ایجاد جهش‌ها یا جزایرفازی در تصویر شدند، روش مذکور این تاثیرات یاد شده را به حداقل رساند. و در آخر برای تعیین جابجایی و تغییر شکل زمین، تداخل نگاشت‌های حاصله، زمین مرجع گردیدند و نقشه میزان جابجایی حاصل شد.

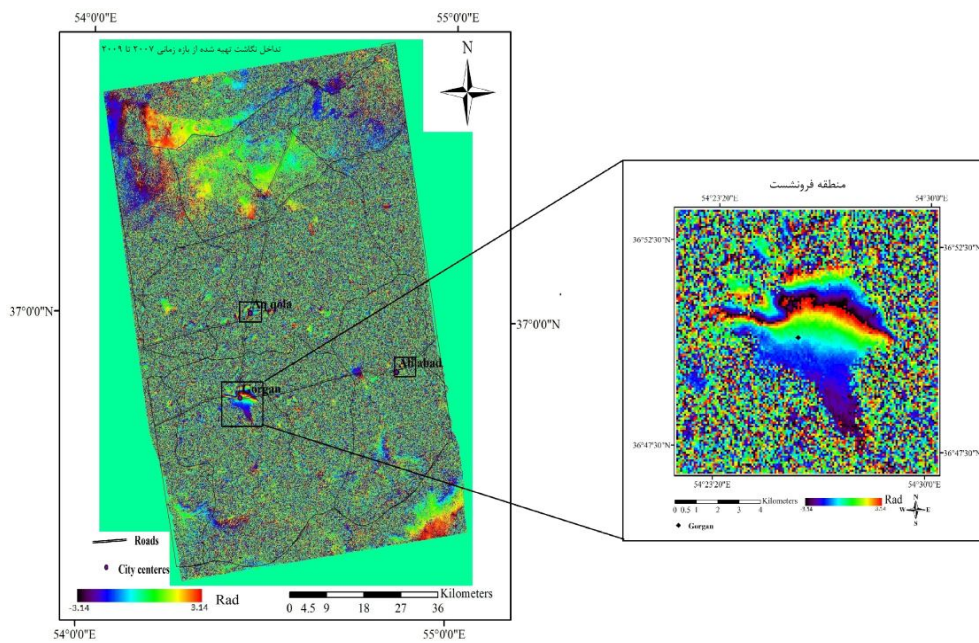
## نتایج و بحث

به منظور بررسی فرونشست منطقه مورد مطالعه از روش تداخل‌سنجی راداری استفاده شد و تداخل نگاشت‌های دو بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۱۰ (آبان ۸۸ تا دی ۸۸) و ۲۰۰۷-۲۰۰۹ (بهمن ۸۵ تا آذر ۸۸) تهیه گردید (شکل‌های ۳ و ۴). در تداخل نگاشت بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۱۰ جابجایی قابل محاسبه‌ای مشاهده نمی‌شود (شکل ۳). دلیل این امر نیز می‌تواند کوتاه بودن این دوره زمانی باشد. اما در تداخل نگاشت

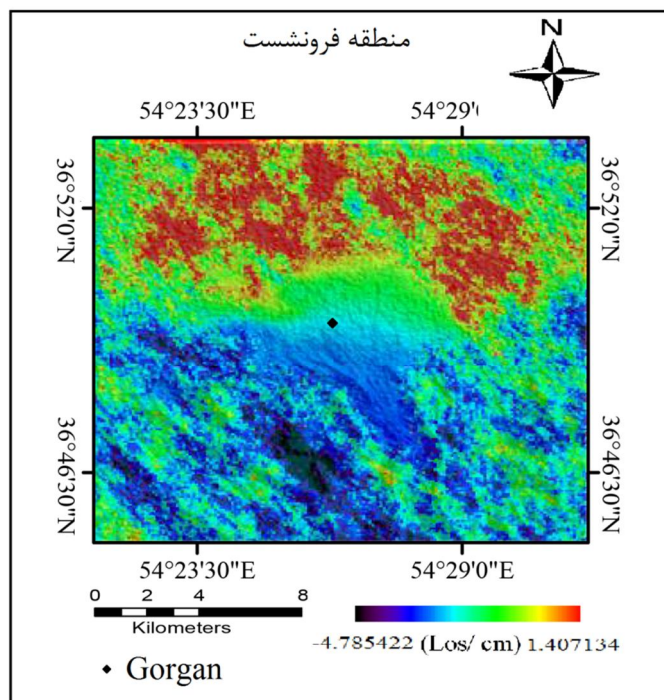




شکل ۳: تداخل نگاشت تهیه شده در بازه زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰، جابجایی در راستای دید ماهواره



شکل ۴: تداخل نگاشت تهیه شده در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹، جابجایی در راستای دید ماهواره



شکل ۵: نقشه میزان جابجایی بر روی مدل رقومی ارتفاعی منطقه در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹، جابجایی در راستای دید ماهواره



(الف)



(ب)

شکل ۶: الف) نمودار میزان بارش سالیانه شهر گرگان ب) نمودار پیژومترهای ایستگاه گرگان و انجیراب



### تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از معاونت مطالعات شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان برای در اختیار قرار دادن اطلاعات پیزومترهای دشت گرگان و عکس‌های بازدیدهای صحرائی از چاه‌ها و نیز آژانس فضایی اروپا بابت در اختیار قرار دادن تصاویر راداری کمال تشکر را دارند؛ همچنین از معاونت پژوهشی دانشگاه گلستان بابت حمایت از این پژوهش قدردانی می‌شود.

### منابع

۱. افضل‌ی، عباسعلی. محمد شریفی‌کیا و سیاوش شایان. ۱۳۹۲. ارزیابی آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها و سکونتگاه‌ها از پدیده فرونشست زمین در دشت دامغان، دو فصلنامه ژئومورفولوژی کاربردی ایران، سال اول، شماره اول.
۲. امیری، منوچهر. هادی نظری‌پویا و حبیب‌اله مظاهری. ۱۳۸۳. علل و مکانیسم وقوع فروچاله‌ها در دشت فامنین - کبودرآهنگ، فصلنامه تحقیقاتی - جغرافیایی، شماره ۷۳، صص ۱۸۷-۱۷۲.
۳. بلورچی، محمدجواد. ۱۳۸۴. احتمال فرونشست در اراضی وسیعی از تهران، پایگاه - خبری شریف نیوز.
۴. جنت، کبری. اکبر قاضی‌فرد و مه‌آسا روستایی. ۱۳۸۸. پایش فرونشست زمین در دشت گلپایگان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و شکاف‌سنجی، ششمین کنفرانس زمین‌شناسی و مهندسی و محیط زیست ایران، مهر ۸۸، دانشگاه تربیت مدرس.
۵. حسامی‌آذر، خالد. هادی طبسی و پریسا مبین. ۱۳۹۰. نقشه گسل‌های جنوب در ایران (سی‌دی)، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
۶. حسینی میلانی، میرداوود. ۱۳۷۳. اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی و اثرات آن، مجموعه مقالات کنفرانس ملی منابع آب زیرزمینی، صص ۹۱-۹۸، سیرجان.
۷. رحمانیان، داوود. ۱۳۶۵. نشست زمین و ایجاد شکاف بر اثر تخلیه آب‌های زیرزمینی در کرمان، مجله آب.
۸. زارع، مهدی. مجید شاه‌پسندزاده. ۱۳۷۴. بررسی مقدماتی لرزه‌خیزی، زمین‌ساخت و خطر زمین لرزه - گسلش در پهنه آذربایجان شرقی، موسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران.

نکته جالب درباره سیگنال فرونشست که در شمال شهر گرگان مشاهده شد، روند تقریباً شرقی- غربی آن است که با روند برخی از ساختارهای منطقه (بخصوص گسل خزر) و مرز پیشانی کوهستان هم‌خوانی دارد. این موضوع نشان می‌دهد که با وجود این که افت سطح ایستابی در نهایت منجر به فرونشست شده است ولی به نظر می‌رسد عوامل ساختاری روند محدوده فرونشست را کنترل نموده‌اند.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یکی از مخاطراتی که بخصوص در سال‌های اخیر در مناطق مختلف دنیا و ایران خودنمایی می‌کند، پدیده فرونشست است. در این مقاله پدیده فرونشست در غرب استان گلستان بویژه در محدوده شهر گرگان بررسی و محدوده فرونشست و میزان آن در بازه زمانی ۳۴ ماه با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری مشخص گردید. تداخل نگاشت بدست آمده از پردازش تصاویر راداری نشان دادند که محدوده در حال فرونشست با روند تقریبی شرقی- غربی در شمال گرگان قرار دارد. با توجه به وضعیت پیچیده زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه، به نظر می‌رسد که عوامل تکتونیکی در سازمان‌دهی این روند دخیل باشند. بررسی نمودارهای بارش سالیانه و سطح ایستابی در گرگان نشان دادند که در این بازه زمانی میزان بارش دارای کمترین مقدار بوده و سطح آب زیرزمینی نیز روند نزولی به خود گرفته است. در راستای ادامه تحقیق پیشنهاد می‌شود با استفاده از مدل‌سازی سری زمانی تصاویر راداری نرخ فرونشست در دوره زمانی طولانی‌تر رصد شود تا بتوان نقشه نرخ متوسط فرونشست در منطقه تهیه گردد. برای انجام مطالعات تکمیلی نیز از داده‌های ترازیبی و جی‌پی‌اس استفاده استفاده شود. همچنین برای اثبات ارتباط بین فرونشست و عوامل ساختاری، لازم است مطالعات ساختاری از جمله بررسی روند و نوع شکستگی‌ها و شکاف‌های ایجاد شده در زمین و سازه‌ها انجام گیرد.

- دانه‌بندی لایه‌های زمین، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال چهارم، شماره ۱۳، پاییز ۹۲.
۱۹. میرشاهی، فاطمه‌السادات. محمدجواد ولدان‌زوج و مریم دهقانی و سیدمحمد هاشمی امین‌آبادی. ۱۳۹۲. اندازه‌گیری فرونشست سطح زمین به کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری با استفاده از تصاویر TerraSAR-X، بیستمین همایش ملی ژئوماتیک، اردیبهشت ۹۲.
20. Allen, Mark B., Mohammad Reza Ghassemi, Mahmood Shahrabi and Manouchehr Qorashi. 2003. Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran, *J. Stuct. Geol.*, 25: 659-672.
21. Aobpaet, Anuphoa, Miguel Caro Cuenca and Andrew Hooper and Itthi Trisirisatayawong. 2013. I.: InSAR time-series analysis of land subsidence in Bangkok, Thailand, *Int. J. Remote Sens.*, 34, 2969-2982, doi: 10.1080/01431161.2012.756596.
22. Axen, Gary J., Patrick S. Lam, Marty Grove, Daniel F. Stockli and Jamshid Hassanzadeh. 2001. Exhumation of the west-central Alborz Mountains, Iran, Caspian subsidence, and collision-related tectonics, *Geology*, 29(6): 559-562.
23. Carbognin, Laura, Pietro Teatini and Luigi Tosi. 2004. Eustacy and land subsidence in the Venice Lagoon at the beginning of the new millennium, *J. Mar. Syst.*, 51: 345-353.
24. Chang, Chung-Pai, T.Y. Chang, Chih-Tien Wang, C.H. Kue and Kun-Shan Chen. 2004. Land surface deformation corresponding to seasonal ground-water fluctuation, determining by SAR interferometry in the SW Taiwan, *Math, Comput, Sim.*, 67: 351-359.
25. Crosetto, Michele, Carl Christian Tscherning, Bruno Crippa and Manuel Castillo. 2002. Subsidence monitoring using SAR interferometry: Reduction of the atmospheric effects using stochastic filtering, *Geophysical Research Letters*, 29(9): 26.1-26.4.
26. Dehghani, Maryam, Mohammad Javad Valadan Zoej, Iman Entezam and Ali Mansourian and Sassan Saatchi. 2009. InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran, *GJL*, 178, 47-56.
27. Ferretti, Alessandro. 2014. *Satellite InSAR Data: Reservoir Monitoring from Space*, EAGE Publication bv.
۹. شاه‌پسندزاده، مجید. ۱۳۸۳. زلزله‌خیزی و لرزه زمین‌ساخت گستره استان گلستان، شمال خاور ایران، کنفرانس بین‌المللی زلزله (یادآور فاجعه بم)، ۸ تا ۱۰ دی ۱۳۸۳، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۱۰. شریفی‌کیا، محمدرضا. ۱۳۹۱. تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق- بهرمان، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، دوره شانزدهم، پاییز ۹۱، مدرسه علوم انسانی.
۱۱. شمشکی، امیر. ایمان انتظام سلطانی. ۱۳۸۴. سازوکار علل تشکیل شکاف‌های زمین در منطقه معین‌آباد- ورامین، چهارمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران.
۱۲. شمشکی، امیر. یوسف محمدی و محمدجواد بلورچی. ۱۳۹۰. شناسایی پهنه آبخوان تحت فشار و نقش آن در شکل‌گیری فرونشست زمین در دشت هشتگرد، علوم زمین، سال بیستم، شماره ۷۹، بهار ۹۰.
۱۳. صالحی، رضا. محمد غفوری و غلامرضا لشکری‌پور و مریم دهقانی. ۱۳۹۲. بررسی فرونشست دشت مهیار جنوبی با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، شماره ۱۱.
۱۴. عالمی، افشین. ۱۳۸۱. بررسی علل فرونشست در دشت یزد- اردکان، مجموعه مقالات سومین همایش بین‌المللی ژئوتکنیک و مکانیکی خاک ایران، تهران.
۱۵. عباس‌نژاد، احمد. ۱۳۷۷. بررسی شرایط و مسائل زمین‌شناسی محیط زیست دشت رفسنجان، فشرده مقالات دومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، مشهد.
۱۶. فرهودی، قدرت‌اله. محمد محبی. ۱۳۸۹. بررسی برخی از وقایع تکنیکی حاکم بر جنوب شرقی دریای خزر و بلوک خزر جنوبی، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، سال ۶، شماره ۱، ۲۷-۴۱.
۱۷. قاسمی، محمدرضا. حسین محمدخانی و عطا‌اللهی. ۱۳۸۶. گذر از برپایی در کپه‌داغ به فرونشینی در کاسپین جنوبی، معرفی گسله‌های نوشناخته گنبدکاووس و یساقی، بیست و ششمین گردهمایی علوم زمین، ۸ ص.
۱۸. مداح، مرتضی. محمد غفوری و غلامرضا لشکری‌پور و سلمه افشار. ۱۳۹۲. بررسی پدیده نشست زمین و تاثیر آن بر روی گسیختگی لوله‌های جدار چاه‌های آب در محدوده شهر مشهد با استفاده از پهنه‌بندی تغییرات

36. Motagh, Mahdi, Yahya Djamour, Thomas R. Walter and Hans-Ulrich Wetzel and Jochen Zschau and Siavash Arabi. 2006. Land subsidence in Mashhad Vally, northeast Iran: results from InSAR, levelin and GPS, *Geophys. J. Int.*, 168, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03246.x.
37. Nemati, Majid, Dennis Hatzfeld and Mohammad Reza Gheitanchi and Ahmad Sadidkhouy and Nour Bakhsh Mirzaei. 2011. Microseismicity of the Astane-Firouzkuh faults, east Alborz, Iran, *Tectonophysics*, 506(1-4), 11-21.
38. Pacheco, Jesus, Jorge Arzate and Eduardo Rojas and Moises Arroyo and Vsevolod Yutsis and Gil Ochoa. 2006. Delimitation of ground failure zones due to land susidence usind gravity data and finite element modelling in the queretaro valley, Mexico. *Engineering Geology*, 84.
39. Peltzer, Gilles, Paul Rosen and Francois Rogez and Kenneth W. Hudnut. 1998. Poro-elastic rebounded along the landers 1992 earthquake surface rupture, *J. geophys. Res.*, 103: 30 131-30 145.
40. Tesauro, Magdala, Paolo Berardino, Riccardo Lanari, Eugenio Sansoti, Gianfranco fornaro and Giorgio Franceschetti. 2000. Urban subsidence inside the City of Napoli (Italy) obsarved with synthetic aperture radar interferometry at Campi Flegrei caldera, *J. Geophys. Res.*, 27, 1961- 1964.
41. Ustun, Aydin, Ekrem Tusat and Sefa Yalvac. 2010. Preliminary results of land subsidence monitoring project in Konya Closed Basin between 2006-2009 by means of GNSS observation. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(6):1151-1157.
42. Ustun, Aydin, Ekrem Tusat, Sefa Yalvac, Ihsan Ozkan, Yasar Eren, Adnan Ozdemir and Taner Ustuntas. 2015. Monitoring land subsidence in Konya Closed Basin by using geodetic techniques and investigation of its cause, Tubitak Project Grant Number: 110Y121.
28. Fruneau, Benedicte, Francesco Sarti. 2000. Detection of ground subsidence in the city of paris using radar interferometry: Isolation from atmospheric artefacts using correlation, *Geophysical Research Letters*, 27(24): 3981-3984.
29. Gabriel, Andrew K., Richard M. Goldstein and Howard A. Zebker. 1989. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry, *J. Geophys. Res.*, 94(B7), 9183-9191.
30. Ge, Daging, Yan Wang and Ling Zhang and Ye Xia and Yi Wang and Xiaofang Gue. 2010. Using permanent scatterer In SAR to monito land subsidence along high speed rall way-the first experiment in China, *ESA SP-677*, March 2010.
31. Hoffman, Jorn, Stanley A. Leake and Devin L. Galloway and Alica M. Wilson. 2003. MODFLOW-2000 ground- water model- user guide to the subsidence and aquifer-system compaction (SUB) package, U.S. Geological Survey Open- File Report 03-233.
32. Hollingsworth, James, James Jackson and Richard Walker and Hamid Nazari. 2008. Extrusion tectonics and subduction in the eastern South Caspian region since 10 Ma, *Geology* 36 (10): 763-766.
33. Kagawa, Atsushi, Kunio Furuno. 2010. Land subsidence monitoring system in the southeast part of Kanto groundwater basin, Japan, in: *Land Subsidence, Associated Hazard And the Role Of Natural Resources Development*, Proceedings of EISOLS 2010, Queretaro, Mexico, 17-22 October 2010, IAHS Publ. 339: 339-344.
34. Massonnet, Didier, Kurt L. Feigle. 1998. Radar interferometry and its application to changes in earth's surface, *Reviews of Geophysics*, 36(4): 441-500.
35. Mingsheng, Liao. 2008. Subsidence measurement with PS-InSAR techniques in Shanghai urban, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing 2008.

