



## تعیین فرونشست شهر مشهد به روش تداخل سنجی راداری پراکنشگر دائمی

محمد خرمی<sup>۱</sup>، سعید ابریشمی<sup>۱\*</sup>، یاسر مقصودی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
<sup>۲</sup> گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

**تاریخچه داوری:**  
دریافت: ۱۳۹۷-۰۱-۲۰  
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۲-۱۹  
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۵-۱۵  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۵-۲۳

**کلمات کلیدی:**  
فرونشست  
تداخل سنجی راداری  
پراکنشگرهای دائمی  
برداشت آب زیرزمینی  
داده‌های پیژومتری

**خلاصه:** یکی از پدیده‌های مخرب زمین‌شناختی، فرونشست زمین است که می‌تواند خسارت‌های مالی جبران‌ناپذیری به دنبال داشته باشد. برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی یکی از عوامل اصلی ایجاد این پدیده است که در حال حاضر در بسیاری از نقاط ایران از جمله مناطق شرق کشور که از خشک‌سالی رنج می‌برند، در حال وقوع است. دشت مشهد نیز از جمله مناطقی است که بر اساس پژوهش‌های گذشته، نرخ فرونشست بسیار بالایی دارد که در سال‌های اخیر، گستره‌ی آن، بخش‌هایی از شهر را نیز متأثر ساخته ولی تاکنون به علت پیچیدگی فرآیند تعیین فرونشست در شهر، به‌صورت دقیق اندازه‌گیری و مطالعه نشده است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری نرخ فرونشست وجود دارد و در این مقاله، نرخ فرونشست در شهر مشهد با روش تداخل سنجی راداری پراکنشگر دائمی، در فاصله زمانی سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ میلادی با استفاده از ترکیب ۶۹ تصویر راداری مدارهای بالاگذر و پایین‌گذر ماهواره‌ی Sentinel-1A، مطالعه و تعیین شده است. نتایج تحلیل صورت گرفته در این پژوهش، نرخ فرونشست بسیار بالا در نواحی شمال غرب و شمال شهر مشهد با بیشینه‌ای در حدود ۱۴ سانتی‌متر در سال را نشان می‌دهد. همچنین به‌منظور تفسیر نتایج فرونشست از داده‌های پیژومتری و اطلاعات ژئوتکنیکی استفاده شده است.

### ۱- مقدمه

آب منفذی و افزایش تنش مؤثر خاک در لایه‌های زیرین می‌گردد. این افزایش تنش مؤثر در نهایت منجر به تراکم لایه‌های تراکم‌پذیر واقع در سفره‌ی آب زیرزمینی، می‌شود. تراکم‌پذیری متناسب با میزان ریزدانه توده خاک است و بیشترین تراکم‌پذیری مربوط به لایه‌های از جنس رسوبات ریزدانه‌ی رس و سیلت است. وجود حجم بالائی از این رسوبات منجر به پدیده‌ی فرونشست در سطح زمین خواهد شد [۳ و ۴]. پدیده‌ی فرونشست در اثر برداشت آب زیرزمینی با توجه به وضعیت زمین‌شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی منطقه می‌تواند شدت و اثرات تخریبی متفاوتی داشته باشد.

در حوضه‌های رسوبی مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله دشت مشهد، مهم‌ترین علت فرونشست سطح زمین، تراکم سفره‌های آب زیرزمینی در اثر برداشت بی‌رویه آب است [۵]. این وضعیت

پدیده‌ی فرونشست زمین می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیر مالی و جانی به دنبال داشته باشد [۱] و به بسیاری از سازه‌های سطحی و زیرسطحی در مناطق شهری و حومه‌ی آن آسیب برساند. بر اساس تعریف سازمان یونسکو [۲]، فرونشست<sup>۱</sup> یا نشست سطح زمین<sup>۲</sup> به‌عنوان یکی از پدیده‌های مخرب زمین‌شناختی، عبارت است از نشستی که در مقیاس بزرگ رخ می‌دهد. معمولاً فرونشست در نتیجه‌ی تحکیم لایه‌های خاکی (رسوبات) زمین به وقوع می‌پیوندد. به این صورت که برداشت آب‌های زیرزمینی و عدم جایگزینی آن موجب کاهش فشار

- 1 Subsidence
- 2 Ground Subsidence

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: s.abrishi@um.ac.ir



می‌دهد. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که فرونشست در راستای شمال غربی- جنوب شرقی به صورت یک کاسه‌ی بیضی‌شکل در سطح زمین با نرخ بیشینه‌ی ۲۸ سانتی‌متر در سال در حال روی دادن است. در گزارش سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در سال ۱۳۸۷ [۹]، محدوده‌ی طرح بررسی مخاطرات ناشی از فرونشست در برنامه چهارم توسعه مشخص شده است که در این محدوده، بیشینه‌ی نشست دشت مشهد بنا بر تحقیقات پیشین در حدود ۲۵ سانتی‌متر در سال تخمین زده شده است و بنا بر آن، دشت مشهد از جمله دشت‌های فوق بحرانی از نظر فرونشست زمین در کشور است. دهقانی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۹ مطالعه سری زمانی با الگوریتم SBAS<sup>3</sup> در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ و با ۱۲ تصویر راداری در مدار پایین‌گذر ماهواره‌ی Envisat بر روی دشت مشهد انجام دادند و نرخ متوسط جابجایی قائم سطح زمین را ۲۴ سانتی‌متر در سال به دست آوردند.

بهنیافر و همکاران [۱۱] در سال ۱۳۸۹، عوامل مؤثر بر فرونشست‌های دشت مشهد و پیامدهای ژئومورفیک آن را بررسی کردند. بر اساس نتایج این تحقیق، اگرچه گروهی از عوامل در ایجاد این پدیده مؤثر بوده‌اند ولی مهم‌ترین آن‌ها به‌خصوص در دشت مشهد، برداشت‌های بی‌رویه از سفره‌ی آب زیرزمینی و عدم نفوذ آب برگشتی شرب، صنعت و کشاورزی به این دشت بوده است. اکبری و معتق [۱۲] در سال ۲۰۱۲ فرونشست دشت مشهد را به روش تداخل سنجی راداری با ۱۷ تصویر ماهواره‌ی Envisat بین سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷ تعیین کردند. بر اساس این تحقیق، فرونشست با نرخ بیشینه‌ی حدود ۲۴ سانتی‌متر در سال رخ داده و مقایسه‌ی نتایج با داده‌های GPS خطای حداکثری یک سانتی‌متر را نشان داده است. لشکری‌پور و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۴ مکانیسم فرونشست شمال غرب دشت مشهد را بررسی کردند و علت اصلی این فرونشست را افت شدید سطح آب زیرزمینی در این ناحیه در طول ۴۰ سال گذشته بیان کردند. مقدار پایین آمدن سطح آب با توجه به جنس لایه خاک و اندازه‌ی دانه‌ها متفاوت است و نتایج حاکی از اثر نرخ بیشتر کاهش تراز آب بر فرونشست در مناطق با خاک ریزدانه است که به خاطر پدیده‌ی تحکیم می‌باشد. دولتی و همکاران [۱۴] در سال ۱۳۹۵، به مطالعه‌ی روند توسعه، اثرات و مکانیسم فرونشست

به‌خصوص در منطقه‌ای که پمپاژ بی‌رویه از سفره‌های آبدار حاوی لایه‌های ماسه‌ای بین لایه‌های آبدار رسی نفوذناپذیر قرار دارد، بحرانی بوده و موجب فرونشست می‌گردد [۶]. این پدیده در ایران نیز در حال وقوع بوده و به‌خصوص در مناطق شرق و مرکز کشور که از خشک‌سالی رنج می‌برند و تأمین آب از طریق برداشت آب زیرزمینی به شدت افزایش یافته، به‌وضوح قابل مشاهده است. دشت‌های مشهد، تهران، نیشابور، رفسنجان و کرمان از جمله مناطق با نرخ فرونشست بسیار بالا هستند که با توجه به مخاطرات و خسارات جانی و مالی احتمالی ناشی از فرونشست، ضرورت دارد مورد توجه بیشتری قرار گیرند. در این تحقیق، مشهد به‌عنوان یک شهر پرجمعیت و دارای نرخ بالای فرونشست مورد بررسی دقیق‌تری قرار گرفته است.

بر اساس پژوهش انواری و نوراللهیان [۷]، در سال ۱۳۸۱ هم‌زمان با انجام عملیات زمینی ترازیابی مربوط به تهیه‌ی نقشه‌ی ۱:۲۰۰۰ دشت مشهد، مواردی از اختلاف (حدود ۲۰ سانتی‌متر) در بست لوپ‌های ترازیابی متکی به شبکه‌ی ترازیابی مشهد و شبکه‌ی ترازیابی درجه یک این سازمان مشاهده شده است. پس از بررسی‌ها و محاسبات شبکه‌های مختلف ترازیابی، تنها احتمال برای چنین اختلاف‌هایی وقوع پدیده‌ی فرونشست بوده، اما شواهد و دلایل قانع‌کننده و کافی به‌جز اطلاعات ترازیابی در دسترس نبوده است. از دی‌ماه سال ۱۳۸۳، ایستگاه GPS<sup>1</sup> با نام TOUS جهت پایش نشست در محل تأسیسات انتقال گاز در نیروگاه طوس مستقرشده و هم‌زمان، ایستگاه MSHN نیز در سال ۱۳۸۳ در محل اداره کل نقشه‌برداری شمال شرق در شهر مشهد راه‌اندازی شده است. نتایج ایستگاه TOUS، نرخ نشست بسیار زیاد حدود ۲۴ سانتی‌متر در سال را نشان داده است ولی ایستگاه MSHN، نشست نداشته است. همچنین، در بازرسی‌های محلی، پدیده‌هایی نظیر لوله‌زایی چاه‌ها که یکی از نشانه‌های بارز فرونشست می‌باشد، مشاهده شده است.

معتق و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۷ فرونشست دشت مشهد را به روش‌های ترازیابی، GPS و InSAR<sup>2</sup> بررسی کردند. بر اساس این تحقیق، ترازیابی دقیق در سال‌های ۱۹۹۵، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵، حاکی از وقوع ۹۰ سانتی‌متر نشست از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۵ می‌باشد. همچنین پایش دائمی GPS در هشت کیلومتری شهر مشهد (ایستگاه طوس)، نرخ نشست ۲۰ سانتی‌متر در سال را از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۶ نشان

1 Global Positioning System

2 Interferometric Synthetic Aperture Radar

3 Small Baseline Subset

بررسی اثر فرونشست دشت‌ها و زمین‌های کشاورزی حاشیه شهر بر فرونشست مناطق شهری مجاور آن بوده است که این مورد نیز در کارهای قبلی به چشم نمی‌خورد. همچنین، در غالب تحقیقات گذشته فقط از یک دسته تصویر پائین‌گذر (یا بالاگذر) استفاده شده که در نتیجه‌ی آن، جابجایی زمین در راستای مایل (راستای دید ماهواره) یا اصطلاحاً  $LOS^2$  تعیین شده است، درحالی‌که در تحقیق حاضر از هر دو دسته تصاویر بالاگذر و پائین‌گذر استفاده شده که به تعیین فرونشست یا جابجایی قائم زمین منجر شده است. در این تحقیق، فرونشست شهر مشهد و حاشیه‌ی آن در بازه‌ی زمانی اکتبر ۲۰۱۴ تا فوریه ۲۰۱۷ میلادی به کمک تصاویر ماهواره‌ی Sentinel-1A با تعداد ۶۹ تصویر راداری به روش تداخل‌سنجی راداری با تکنیک پراکنشگر دائمی<sup>۲</sup> که برای تحلیل مناطق شهری مناسب است، تعیین شده است. در نهایت، روند چند سال اخیر تغییر نرخ فرونشست در این منطقه جهت برنامه‌ریزی‌های آبی و جلوگیری از خسارت‌های جانی و مالی احتمالی به‌دست‌آمده است.

## ۲- منطقه مورد مطالعه

### ۲-۱- مشخصات اقلیمی و وضعیت آبی

شهر مشهد با وسعت ۲۸۰ کیلومترمربع و در منطقه‌ای با اقلیم نیمه‌خشک واقع شده [۱۵] و حدود ۱۰ درصد از مساحت کل آبخوان دشت مشهد را فراگرفته است که در این تحقیق، منطقه‌ی شهری مشهد که بین طول‌های جغرافیایی ۵۹ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی قرار دارد، مورد مطالعه قرار گرفته است. مطابق طرح جامع تأمین آب کلان‌شهر مشهد و گزارش شرکت آب و فاضلاب مشهد [۱۶]، نیاز آبی سالانه‌ی شهر در سال ۱۳۹۰ در حدود ۲۲۳ میلیون مترمکعب بوده که بنا بر پیش‌بینی انجام شده، در سال ۱۴۰۰ به رقمی حدود ۲۸۷ و در سال ۱۴۲۰ به حدود ۳۹۶ میلیون مترمکعب خواهد رسید. رشد جمعیت شهر مشهد با نرخ‌ی فراتر از میانگین کشور که ناشی از جاذبه‌های مهاجرت‌پذیری شهر مشهد است، عامل افزایش روزافزون تقاضای آب شهری است. بر اساس این گزارش در سال ۱۳۹۴، حدود ۳۶ درصد نیاز آبی شهر توسط چاه‌های بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی که در درون و بیرون محدوده

زمین در دشت مشهد پرداختند و نشست سطح زمین را به‌عنوان یکی از پیامدهای منفی افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان مشهد معرفی کردند که آثار آن به‌صورت ایجاد ترک‌های بزرگ در زمین‌های کشاورزی و ساختمان‌ها و بیرون‌زدگی لوله جدار چاه‌ها در منطقه‌ی طوس، قابل‌مشاهده است. بر اساس این پژوهش، بررسی نتایج مطالعات مختلف صورت گرفته در زمینه‌ی فرونشست آبخوان مشهد در دوره زمانی ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۵ نشان می‌دهد در بخش‌های شمال غربی (محدوده بین چناران و قوچان)، مرکزی (مشهد چناران) و شرقی - جنوب شرقی آبخوان فرونشست رخ داده است. بررسی شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان مشهد نشان می‌دهد [۱۴] که افت سطح آب زیرزمینی و انیزوتروپی رسوبات تشکیل‌دهنده آبخوان در محل بستر فعلی و قدیمی رودخانه کشف رود، مهم‌ترین عوامل فرونشست در دشت مشهد محسوب می‌شوند.

هدف از انجام این تحقیق، بررسی وضعیت فرونشست شهر مشهد و حاشیه‌ی آن در سالیان اخیر به ویژه در بازه زمانی ۲۰۱۴ به بعد بوده که در کارهای قبلی به آن پرداخته نشده است. به‌خصوص که به دلیل افزایش جمعیت و توسعه شهر مشهد، تغییر شرایط استفاده از شبکه جمع‌آوری فاضلاب و گسترش این شبکه، تغییر شرایط اقلیمی و تغییر وضعیت برداشت آب‌های زیرزمینی، نیاز به پایش دائمی وضعیت سطح آب زیرزمینی و فرونشست در این منطقه وجود دارد. لذا در این پژوهش، میزان نرخ فرونشست شهر مشهد با توجه به آخرین اطلاعات به روز شده است. بدین منظور، در تحقیق حاضر از تصاویر ماهواره Sentinel که از سال ۲۰۱۴ شروع به تصویربرداری کرده، استفاده شده است ولی در تحقیقات پیشین غالباً از تصاویر ماهواره Envisat استفاده شده است. دقت مکانی بسیار بیشتر تصاویر، بازه زمانی کوتاه‌تر أخذ تصاویر راداری و به‌خصوص خط مبنای مکانی<sup>۱</sup> بسیار کوتاه‌تر داده‌های ماهواره Sentinel باعث می‌شود دقت کلی نتایج حاصل از تحلیل‌های صورت گرفته با تصاویر ماهواره Sentinel بسیار بیشتر از دقت نتایج تحلیل‌های صورت گرفته با تصاویر ماهواره Envisat باشد. همچنین، تمرکز اکثر کارها و پژوهش‌های گذشته بر روی مناطق دشت بوده زیرا چاه‌های برداشت آب زیرزمینی عموماً در دشت‌ها و زمین‌های کشاورزی قرار گرفته‌اند و نرخ بیشینه فرونشست معمولاً در این مناطق قرار دارد. بنابراین دومین هدف مقاله حاضر،

2 Line of Sight

3 Permanent Scatterer Interferometry SAR (PSInSAR)

1 Spatial Baseline

### ۳- مواد و روش‌ها

هدف اصلی در این تحقیق، پایش و اندازه‌گیری فرونشست شهر مشهد می‌باشد. برای رسیدن به پاسخی مطمئن و تا حد امکان دقیق، روش تداخل‌سنجی راداری پراکنشگر دائمی انتخاب شده و در ادامه، صحت‌سنجی و تفسیر نتایج صورت گرفته است.

#### ۳-۱- روش تداخل‌سنجی راداری پراکنشگر دائمی

در اواخر دهه‌ی ۱۹۹۰ مشخص شد که برخی از عوارض سطح زمین دارای ویژگی‌های بازپراکنشی نسبتاً پایدار در طول چندین ماه و حتی چندین سال هستند [۲۲]. ابعاد این عوارض اغلب از یک پیکسل کوچک‌تر بوده و از عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی تصاویر SAR کمتر تأثیر می‌پذیرند. این عوارض که حتی در حدود بحرانی خطوط مبنای زمانی و مکانی نیز دارای همدوسی بالایی هستند، پراکنشگرهای دائم<sup>۱</sup> نامیده شدند. رفتار فاز در پیکسل‌های دارای پراکنشگرهای دائم در مقایسه با پیکسل‌های حاوی اهداف توزیع‌یافته در طول زمان در شکل ۱ نمایش داده شده است. آن‌چنان‌که در این شکل روشن است، پیکسل‌های حاوی پراکنشگر دائم دارای رفتار فازی یکنواخت و پایدار در طول زمان هستند؛ به عبارت دیگر، رفتار فازی در این پیکسل‌ها منطبق بر یک مدل فرضی از جابجایی در زمان است. بر مبنای این مفهوم، الگوریتم شناسایی پیکسل‌های حاوی پراکنشگر دائمی برای اولین بار توسط فرتی و همکاران [۲۴] در سال ۱۹۹۹ معرفی شد و این تکنیک بر پایه‌ی این ایده است که با استفاده از تعداد زیادی از تصاویر SAR، نقاطی<sup>۲</sup> در میان سری زمانی تصاویر راداری که انرژی مغناطیسی<sup>۳</sup> آن‌ها بدون تغییر باشد را شناسایی کند. بعضی از نقاط تحت تأثیر ناهمبستگی زمانی و هندسی قرار نمی‌گیرند و در نتیجه فاز تداخل‌سنجی آن‌ها می‌تواند به‌عنوان تابعی از پارامترهای أخذ شده (خط مبنای مکانی و زمانی) مطالعه شود. پس از آن مشاهده و تشخیص ارتفاع، جابجایی زمین و تأخیر اتمسفری با ویژگی‌های طیفی مختلف امکان‌پذیر خواهد شد. در نهایت، جدایی توپوگرافی از تغییر شکل غیرقابل تخمین است [۲۵].

در روش تداخل‌سنجی راداری پراکنشگر دائمی یا PSInSAR، در میان سری زمانی تصاویر راداری، پیکسل‌هایی با معیار دامنه‌ی

شهری واقع‌اند، تأمین می‌شود.

مقدار عمده‌ی بارش در دشت مشهد در فصل‌های بهار و زمستان اتفاق می‌افتد ولی سفره‌ی آب زیرزمینی در فصول بارندگی به‌قدر کافی تغذیه نمی‌شود که این امر با توجه به برداشت صورت گرفته، منجر به کاهش سطح آب زیرزمینی می‌گردد و این افت باعث فرونشست می‌گردد [۱۷] و در اثر بهره‌برداری‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی دشت مشهد، سطح آب زیرزمینی به‌تدریج پایین رفته است. در حال حاضر از مهم‌ترین پیامدهای مخاطره‌آور فرونشست زمین در دشت مشهد، احتمال آسیب‌دیدگی خطوط لوله آب و گاز است. هم‌چنین فرو چاله‌ها و ترک‌های ایجاد شده در اثر فرونشست، به محدوده شهری نیز نزدیک شده است.

#### ۲-۲- مشخصات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی

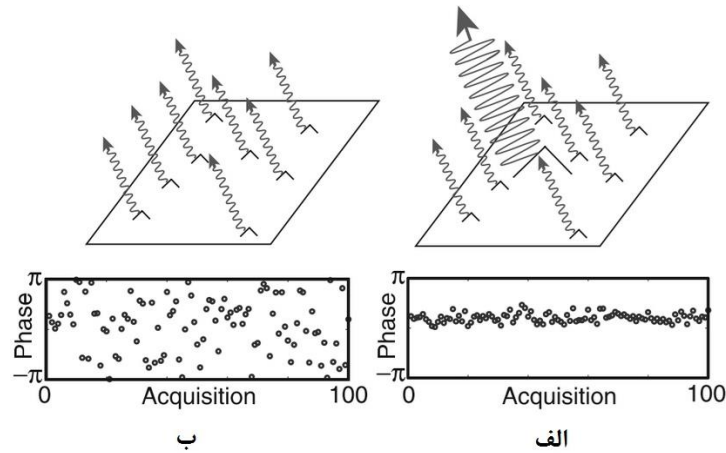
شهر مشهد بر روی رسوبات و مخروط افکنه حاصل از کشف رود و چند رودخانه فصلی و دائمی مانند وکیل‌آباد، طرقله و طوق قرار دارد [۱۱]. ضخامت آبرفت در میانه‌ی دشت نسبت به سایر نقاط بیشتر است ولی در حاشیه‌ی ارتفاعات جنوبی و شمالی ضخامت آبرفت کمتر و سنگ کف بالاتر است. آبرفت دشت مشهد با شیب ملایمی از ارتفاعات اطراف به‌طرف مرکز و خط القعر دشت کشیده می‌شود و دارای ضخامتی متفاوتی در نقاط مختلف است و از حداقل چند متر در کناره‌ها تا بیش از ۲۵۰ متر در مرکز دشت گزارش شده است [۱۸ و ۱۹].

بر اساس پژوهش موسوی مداح [۲۰] محدوده شهر مشهد را می‌توان به دو قسمت غربی و شرقی تقسیم نمود که عمده‌ی قسمت شرقی را خاک‌های ریزدانه تشکیل داده و با حرکت از شمال غرب به سمت جنوب شرق، دانه‌بندی خاک ریزدانه‌تر می‌گردد. در مجموع با افزایش عمق به زیر سطح آب زیرزمینی، دانه‌بندی خاک در اغلب قسمت‌های محدوده شهر ریزدانه‌تر می‌شود. محدوده مرکزی شهر، خاک غالب در سطح، سیلت رس و ماسه‌دار می‌باشد که با رفتن به عمق درصد ماسه افزایش می‌یابد، اما تغییرات خاک هم در توالی قائم و هم به‌صورت جانبی زیاد است [۲۱]. هم‌چنین، محدوده‌ی شرقی و شمال شرقی شهر مشهد در سطح پوشیده از خاک ریزدانه است که به‌طرف عمق درصد سیلت آن افزایش یافته است. باید توجه نمود که عمق آب زیرزمینی در برخی نقاط بسیار پایین‌تر از ۴۰ متر است و بنابراین نیاز به داده‌های لوگ‌های عمیق ژئوتکنیکی وجود دارد.

1 Persistent (Permanent) Scatterers

2 Target

3 Electromagnetic Signature



شکل ۱. رفتار فاز در پیکسل‌های تصویر راداری؛ الف) پیکسل پراکنشگر دائم و ب) پیکسل حاوی پراکنشگر توزیع یافته [۲۳]  
 Fig. 1. Phase simulations for radar pixels (a) a persistent scatterer pixel, and (b) a distributed scatterer pixel.

می‌گیرد. در مرحله‌ی نخست، نقاط پراکنشگر دائم اولیه (کاندید) بر مبنای دامنه‌ی بازپراکنش و در مرحله‌ی بعد نقاط پراکنشگر دائم اصلی (نهایی) بر مبنای فاز تصحیح‌شده‌ی آن‌ها انتخاب می‌گردند. برای انتخاب نقاط کاندیدای پراکنشگر دائم، رفتار زمانی فاز در این نقاط باید دارای استحکام و پایداری باشد. آنچه در ابتدا به ذهن می‌رسد آن است که از اطلاعات همدوسی برای انتخاب این نقاط استفاده شود. اما مشکل این شیوه‌ی انتخاب آن است که فاز تداخل‌سنجی تصحیح‌نشده شامل اثراتی نظیر اتمسفر، خطای توپوگرافی، خطاهای مداری و تغییر شکل زمین است. بنابراین از روش‌هایی که مبتنی بر دامنه‌ی بازپراکنش هستند برای انتخاب نقاط اولیه بهره گرفته می‌شود. هر پیکسل بر اساس نسبت بین انحراف معیار و میانگین در طول زمان ارزیابی می‌شود. شاخص پراکنندگی دامنه بر اساس رابطه‌ی ۱ بیان شده است که در آن،  $\sigma_a$  و  $\mu_a$  به ترتیب مقدار انحراف معیار و مقدار میانگین دامنه‌ی بازپراکنش هستند [۲۷].

$$D_a = \frac{\sigma_a}{\mu_a} \quad (1)$$

پس از شناسایی نقاط پراکنشگر دائم، فاز تداخل‌سنجی تمام نقاط با استفاده از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌گردد. در این رابطه، دو نقطه‌ی  $p$  و  $q$  و دو تصویر  $i$  و  $j$  در نظر است که  $i$  تصویر مرجع و  $j$  یکی از تصاویر است [۲۶].

$$\Delta\varphi_{pq}^{ij} = \Delta\varphi_{Flat(terrain)} + \Delta\varphi_{Height} + \Delta\varphi_{Displacement} + \Delta\varphi_{Atmosphere} + \Delta\varphi_{Noise} \quad (2)$$

پایداری<sup>۱</sup> جداسازی می‌گردند که کاندیدهای  $PS^2$  یا نقاط کاندید پراکنشگر دائم نامیده می‌شوند. سپس برای هر نقطه‌ی پراکنشگر دائم، اختلاف فاز به دلیل حرکت، نویز اتمسفری و تغییر ارتفاع، با تعیین اختلاف مکانی و زمانی مشخص می‌شود. سپس، فاز اتمسفری به دست آمده، برای هر تصویر با درونیابی تعیین می‌گردد. نقاط یا پیکسل‌های نهایی بر اساس پراکنندگی اختلاف فازها که با سازگاری زمانی مشخص می‌شود، شناخته خواهند شد. دقت اندازه‌گیری به مقدار سازگاری<sup>۲</sup> و مقدار انحراف از خط مکان و خط زمان<sup>۳</sup> بستگی دارد. در تحلیل  $PS$ ، فاز تداخل‌سنجی<sup>۴</sup> برای تمام تصاویر نسبت به یک تصویر مرجع تعیین می‌شود [۲۶]. از دیگر مزیت‌های این روش می‌توان به محاسبه‌ی هم‌زمان اثر تأخیر انتشار موج و خطای ناشی از تغییر اتمسفر و خطای توپوگرافی اشاره کرد. بنابراین این خطاها از مقادیر نهایی حذف خواهد شد. مراحل اصلی این روش جهت برآورد نرخ فرونشست زمین عبارت‌اند از: انتخاب تصویر پایه، شناسایی و انتخاب نقاط کاندیدا با بازپراکنش دائمی، ایجاد تداخل نماهای تفاضلی، تقریب اولیه نرخ فرونشست و خطای توپوگرافی، حذف فاز اتمسفر و برآورد نهایی نرخ فرونشست و خطای توپوگرافی.

انتخاب مجموعه نقاط پراکنشگر دائمی در دو مرحله‌ی کلی صورت

- 1 Amplitude Stability
- 2 Permanent Scatterer Candidates (PSCs)
- 3 Coherence
- 4 Deviation of Normal Baseline and Temporal Baseline
- 5 Interferometric Phase

جدول ۱. مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده

Table 1. Specifications of the radar images used in this research.

سنجنده	مسیر	حالت تصویربرداری	تعداد تصاویر	تاریخ أخذ تصویر پایه
Sentinal-1A	۸۶	بالا گذر	۳۵	03-02-2016
Sentinal-1A	۹۳	پایین گذر	۳۴	15-06-2016

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نرخ فرونشست شهر مشهد

در پژوهش حاضر روش تداخل سنجی راداری با تکنیک پراکنشگر دائمی به منظور پایش و اندازه‌گیری نرخ فرونشست در شهر مشهد انتخاب شد و تصاویر راداری مورد نیاز این پژوهش، توسط آژانس فضایی اروپا در اختیار محقق قرار گرفت. جدول ۱، مشخصات کلی تصاویر مورد استفاده در این تحقیق را نشان داده است.

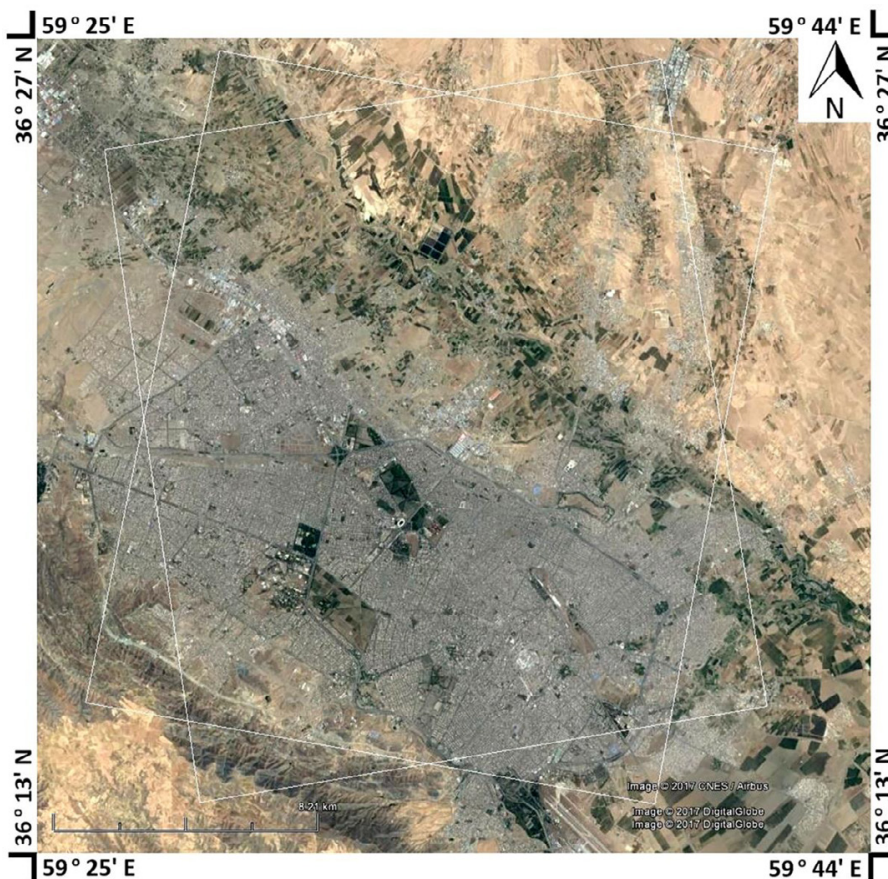
ابتدا ۳۵ تصویر از مدار بالاگذر این ماهواره در محیط نرم‌افزار سارپروز به روش تداخل‌سنجی راداری با تکنیک پراکنشگر دائمی پردازش شد و پس از آن به پردازش ۳۴ تصویر از مدار پایین گذر پرداخته شد تا علاوه بر صحت‌سنجی پردازش اول (بالاگذر)، نتایج این دو پردازش با هم ترکیب شود و مقدار نرخ نشست قائم در هر نقطه حاصل گردد. به منظور دریافت اطلاعات اولیه‌ی راداری هر تصویر (نظیر فاز و دامنه برای تمام پیکسل‌های آن) بایستی مختصات یک نقطه به عنوان مرکز پردازش توسط محقق وارد شود و سپس شعاع پردازش انتخاب گردد. به این منظور، بزرگ‌ترین محدوده‌ی موجود در تصاویر راداری أخذ شده با جابجا کردن نقطه‌ی مرکزی و تغییر شعاع پردازش به گونه‌ای انتخاب شد که تا حد امکان بیشتر سطح شهر مشهد فرا گرفته شود و بخشی از مناطق حاشیه‌ی شهر در شمال و شمال غرب شهر نیز وارد تحلیل گردد. هدف پژوهشگر از این عمل، بررسی اثر فرونشست ناشی از افت سطح آب زیرزمینی دشت مشهد بر حاشیه‌ی شهر مشهد و سایر نواحی شهری بوده است. ضمن این‌که محقق با آگاه بودن از این نکته که روش پراکنشگر دائمی برای منطقه‌ی شهری جواب بهتری می‌دهد، سعی کرده بخش‌هایی که از نوع پوشش گیاهی و کشاورزی هستند در حاشیه‌ی محدوده‌ی پردازش باشند تا ضمن بررسی نتایج آن‌ها، کم‌ترین اثر را بر سایر نقاط پردازش داشته باشند. این نکته از آن رو است که اگر پوشش گیاهی در مرکز پردازش قرار گیرد، به شدت نتایج را تحت اثر خواهد

این رابطه، فاز ناشی از پنج عامل مختلف را شامل شده است که به ترتیب به انحنا‌ی زمین، ارتفاع، جابجایی، تأخیر اتمسفری و نویز مربوط هستند. البته جهت یک تحلیل دقیق و کامل بایستی پارامترهای بیشتری [۲۸ و ۲۹] را وارد محاسبه کرد ولی موجب پیچیده شدن حل مسئله خواهد شد.

۳-۲- تصاویر راداری مورد استفاده

برای انجام فرآیند تداخل‌سنجی نیاز به تصاویر راداری می‌باشد که بایستی در انتخاب آن‌ها به نکات مختلفی از جمله نوع روش پردازش، نرم‌افزار یا ابزار مورد نیاز پردازش، موجود بودن تصاویر در منطقه‌ی مورد مطالعه به لحاظ مکانی و زمانی، چگونگی دسترسی و دریافت تصاویر، تعداد تصاویر موجود در بازه‌ی زمانی مورد نظر، دقت مکانی و زمانی تصاویر و حجم داده‌ها توجه نمود. در این تحقیق ۶۹ تصویر راداری جمع‌آوری شد که عبارتند از دو دسته تصاویر مدار بالاگذر و مدار پایین‌گذر که در بازه‌ی ... توسط ماهواره راداری Sentinel-1A اخذ شده است. عامل مؤثر در انتخاب تصاویر این ماهواره، جدید بودن زمان أخذ آن‌ها نسبت به سایر ماهواره‌ها بوده است. تصاویر راداری این ماهواره، توسط آژانس فضایی اروپا فراهم شده است و جهت انجام این پژوهش تهیه گردیده است. همچنین، به منظور پردازش به روش تداخل‌سنجی راداری، انتخاب نرم‌افزار مناسب که قادر به انجام این تکنیک باشد و با داده‌های انتخاب شده سازگاری داشته باشد، ضروری است. بنابراین پس از گردآوری داده‌های راداری و بررسی نرم‌افزارهای موجود، نرم‌افزار تحت متلب سارپروز<sup>۱</sup> که در سال ۲۰۰۹ توسط دنیل پریسین<sup>۲</sup> [۲۵] ایجاد شده است، انتخاب گردید تا نتایج نهایی نرخ نشست بر اساس اختلاف فاز بین تصاویر أخذ شده در تاریخ‌های متفاوت به دست آید.

1 SARPROZ  
2 Daniele Perissin



شکل ۲. محدوده‌ی مورد مطالعه به منظور انجام پردازش و پایش فرونشست

Fig. 2. The area of interest for the subsidence monitoring.

در جدول ۲ مشخصات اولیه‌ی ورودی نرم‌افزار جهت انجام پردازش تصاویر مدار بالاگذر آمده است.

بر اساس آنچه در توضیح روش پراکنشگر دائمی آمد، نوزدهمین تصویر مدار بالاگذر به لحاظ ترتیب زمانی که در تاریخ سوم فوریه ۲۰۱۶ میلادی (۱۴ بهمن ۱۳۹۴ شمسی) توسط حس‌گر راداری اخذ شده، به‌عنوان تصویر پایه انتخاب گردید. همچنین در تصاویر پایین

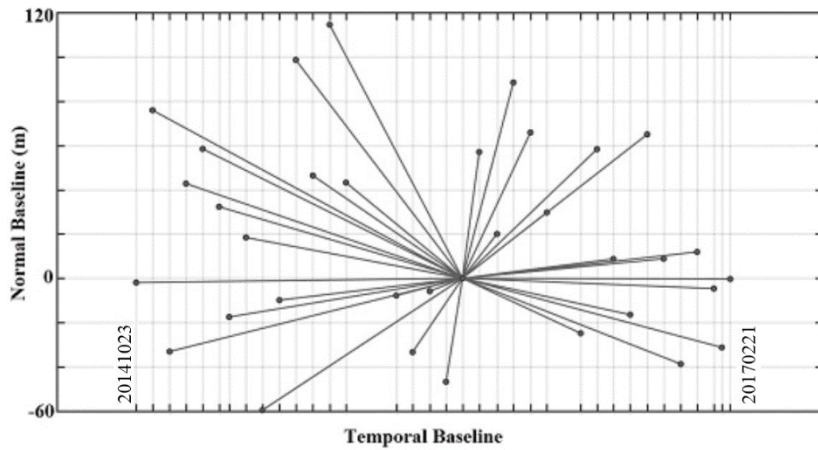
جدول ۲. مشخصات اولیه‌ی ورودی جهت انجام پردازش تصاویر

Table 2. Initial considerations for the images.

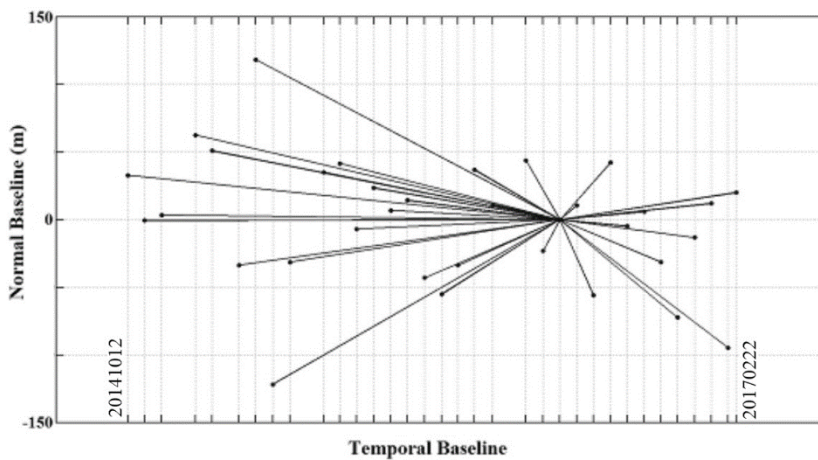
مشخصه	توضیح
منطقه مورد مطالعه	شهر مشهد و پیرامون شمال و شمال غرب آن
تاریخ اخذ اولین تصویر	۲۳ اکتبر ۲۰۱۴ (یکم آبان ۱۳۹۳)
تاریخ اخذ آخرین تصویر	تا ۲۱ فوریه ۲۰۱۷ (سوم اسفند ۱۳۹۵)

گذاشت و محقق نیز این موارد را پیش از انجام پردازش نهایی بررسی و پیش‌بینی نموده است.

علاوه بر تمام موارد ذکر شده پیرامون تعیین محدوده و شعاع پردازش، نکته‌ای بسیار مهم و اساسی وجود دارد که باید به آن توجه نمود و آن این است که با بزرگ‌تر شدن محدوده‌ی پردازش، بر تعداد نقاط کاندیدای پراکنشگر دائم افزوده خواهد شد و در نتیجه نقاط بیشتری در تحلیل وارد خواهد شد که در نتیجه دقت نتایج پردازش را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، با افزایش تعداد نقاط، احتمال وجود نقطه‌ای با شرایط همدوسی مناسب‌تر و پایداری بیشتر نیز افزایش خواهد یافت و این از آن روی مهم است که تکنیک مورد استفاده، فرونشست را به‌طور نسبی محاسبه می‌کند و انتخاب نقطه‌ی پایه در نتایج تأثیر مستقیم دارد. با توجه به آنچه بیان شد، شعاع پردازش برابر با ۹/۳ کیلومتر انتخاب گردید که این محدوده در شکل ۲ با خطوط سفید رنگ (مستطیل) نشان داده شده است.



الف



ب

شکل ۳. طول خط مبنای زمانی و خط مبنای مکانی؛ الف) تصاویر بالاگذر و ب) تصاویر پایین گذر

Fig. 3. Temporal baseline and spatial baseline for (a) Ascending images, and (b) Descending images.

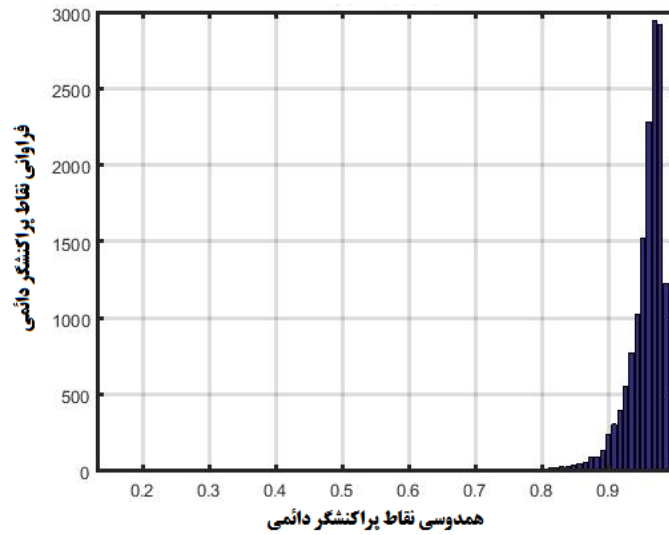
آستانه‌ی همدوسی پایداری  $0.8/30$  نیز برای جداسازی نقاط مورد نظر اعمال شده است. پس از انتخاب این نقاط بایستی میان آن‌ها اتصالاتی برقرار شود تا معادلات مربوطه برقرار و حل گردد. شکل ۴، مقدار فراوانی نقاط پراکنشگر دائم و مقدار همدوسی آن‌ها را پس از حذف اثر اتمسفری نشان می‌دهد. این مقدار بالای همدوسی (با توجه به این که پیک نقاط در شکل ۴، نزدیک عدد یک است) می‌تواند دقت بالای نتایج نهایی که همان نرخ فرونشست در این منطقه است را در پی داشته باشد.

پس از بررسی همدوسی مکانی که به منظور اطمینان از نتایج خروجی صورت گرفت، پردازش نهایی تعیین نرخ فرونشست انجام گرفت که نتیجه‌ی آن در شکل ۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر

گذر، تصویر پایه مربوط به تاریخ پانزدهم ژوئن ۲۰۱۶ (۲۶ خرداد ۱۳۹۵) است. شکل ۳، زمان اخذ تصاویر راداری و طول خط مبنای مکانی و زمانی را برای هر تصویر نمایش می‌دهد. نقطه‌ی مرکزی، بیانگر تصویر پایه است.

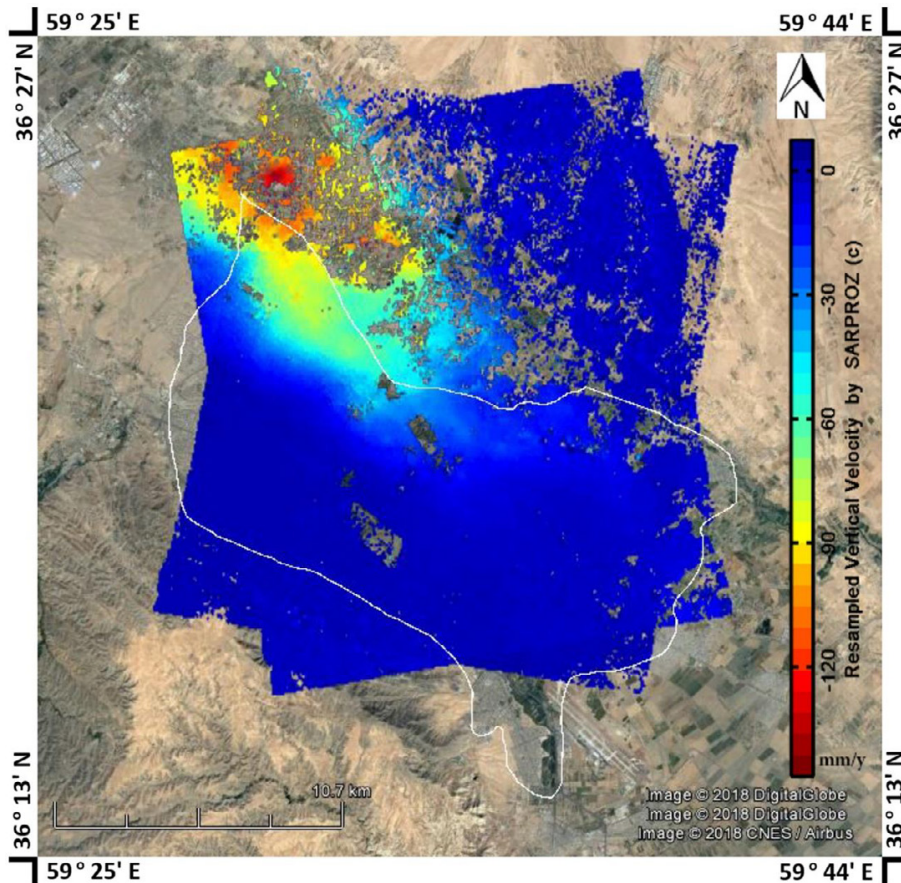
در ادامه‌ی پردازش تداخل‌سنجی راداری، مدل ارتفاعی یا توپوگرافی منطقه بر اساس تصاویر راداری خوانده شده، تولید شده است. بیشتر منطقه‌ی مورد مطالعه را سطحی هموار با تغییر ارتفاعی کم فرا گرفته است. برای تعیین نهایی فرونشست، نیاز است تا فاز مدل ارتفاعی حذف شود. برای انجام فرآیند تداخل‌سنجی راداری با تکنیک پراکنشگر دائمی، نیاز به انتخاب نقاط پراکنشگر است که در این تحقیق علاوه بر معیار بازتابش نقاط، جهت بهبود دقت نتایج نهایی،





شکل ۴. مقدار همدوسی نقاط پراکنشگر دائم پس از حذف اثر اتمسفری

Fig. 4. The coherence of permanent dispersing points after removing the atmospheric effect.

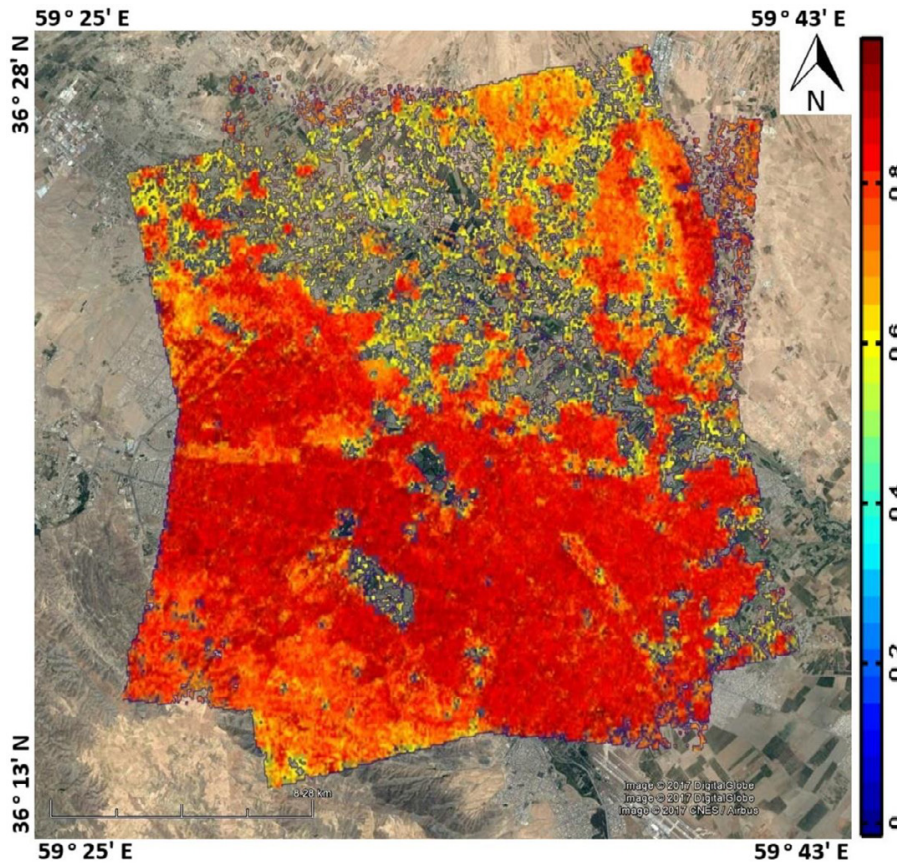


شکل ۵. نقشه‌ی نرخ فرونشست شهر مشهد مربوط به پردازش ترکیب بالاگذر و پایین گذر

Fig. 5. The subsidence rate of Mashhad in ascending and descending images.

بوده است. بیشینه‌ی نرخ فرونشست در شمال غرب حاشیه‌ی خارجی شهر مشهد و با نرخ حدود ۱۴ سانتی‌متر در سال به دست آمده است.

است که در این تحقیق، تعداد نقاط پردازش شده نهایی برای پردازش بالاگذر و پایین‌گذر، برای هر تحلیل در حدود چهارصد هزار نقطه



شکل ۶. هم‌دوسی نقاط پراکنشگر مورد استفاده جهت تخمین فرونشست نهایی

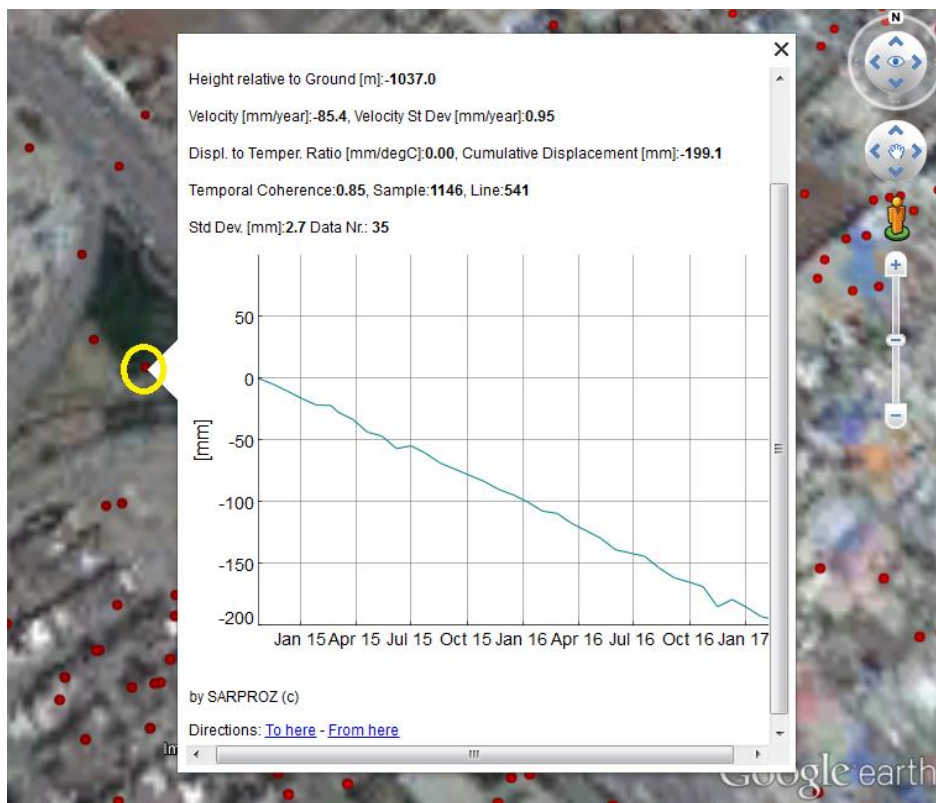
Fig. 6. The coherence of the distribution points used in estimation of the final subsidence.

شهری مشهد در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه، نشان داده شده است و بنا بر آنچه مشاهده می‌شود، روند فرونشست در طول بازه‌ی زمانی مورد بررسی در این تحقیق، افزایشی و خطی است. این نقطه با نرخ فرونشست ۸/۶ سانتی‌متر در سال در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه، در مجموع دچار نشست بسیار زیاد و مخاطره‌آمیز ۲۰ سانتی‌متر شده که نیاز به علاج بخشی و ارائه‌ی راهکارهای مناسب کاهش نرخ فرونشست را تأکید می‌کند. قابل ذکر است که نقطه‌ای که در این شکل، مقدار تغییر نشست زمین برای آن رسم شده دارای هم‌دوسی زمانی بسیار مناسب ۰/۸۵ و انحراف معیار ۰/۹۷ میلی‌متر در سال است و بنابراین نتیجه‌ی آن کاملاً قابل اطمینان خواهد بود. یادآوری می‌گردد که با توجه به روش مورد استفاده در این پژوهش که نرخ فرونشست را به صورت نسبی محاسبه می‌کند، مقدار فرونشست در شروع بازه‌ی زمانی این پردازش، برابر صفر در نظر گرفته شده است.

چند فضای بدون خروجی که در تصاویر دیده می‌شود، مربوط به مکان‌هایی است که بیشتر سطح آن‌ها را پوشش گیاهی فرا گرفته و بنابراین نقاط کمتری از آن‌ها در پردازش استفاده شده است. البته نشست این مکان‌ها نیز از روی میزان فرونشست نقاط پیرامونی به راحتی قابل تعیین است.

تحقیقات پیشین در محدوده‌ی شهری واقع نشده بودند و نتایج پژوهش حاضر حاکی از وقوع فرونشست در مناطق شمال و شمال غرب شهر مشهد است. این موضوع می‌تواند بسیار نگران‌کننده باشد چرا که مناطق مسکونی نیز در معرض نشست قرار گرفته‌اند. در ادامه و پس از تعیین نقشه‌ی فرونشست شهر مشهد، نقشه‌ی هم‌دوسی نقاط مورد استفاده در این پردازش در شکل ۶ آمده است که نشان از قابل اطمینان بودن نتایج دارد.

جهت بررسی دقیق‌تر نتایج به دست آمده در این تحقیق، به عنوان نمونه در شکل ۷ روند فرونشست نقطه‌ای در شمال غرب منطقه‌ی



شکل ۷. فرونشست نقطه‌ای در شمال غرب شهر مشهد

Fig. 7. The subsidence in a point at the north-west of Mashhad.

که میانگین این مقادیر تقریباً صفر است. به عبارتی نرخ فرونشست حاصل از روش تداخل‌سنجی، همانند آنچه ایستگاه GPS در نشان داده، ناچیز است.

به این منظور با توجه به اینکه در شهر مشهد تنها یک ایستگاه GPS موجود است، نتیجه‌ی این دستگاه در بازه‌ی زمانی مشابه با بازه‌ی پردازش‌شده در این تحقیق، مقایسه شده است و در شکل ۱۰ آمده است.

علت نوسان در این نمودار ایستگاه GPS را می‌توان به اثر تغییرات دمای فصلی نسبت داد. همچنین هر ابزاری دارای یک دقت اندازه‌گیری است، بنابراین قرائت‌های غیرعادی و پراکنده‌ی GPS در برخی زمان‌ها را می‌توان مربوط به خطای دستگاه نیز دانست که از معایب GPS محسوب می‌شود.

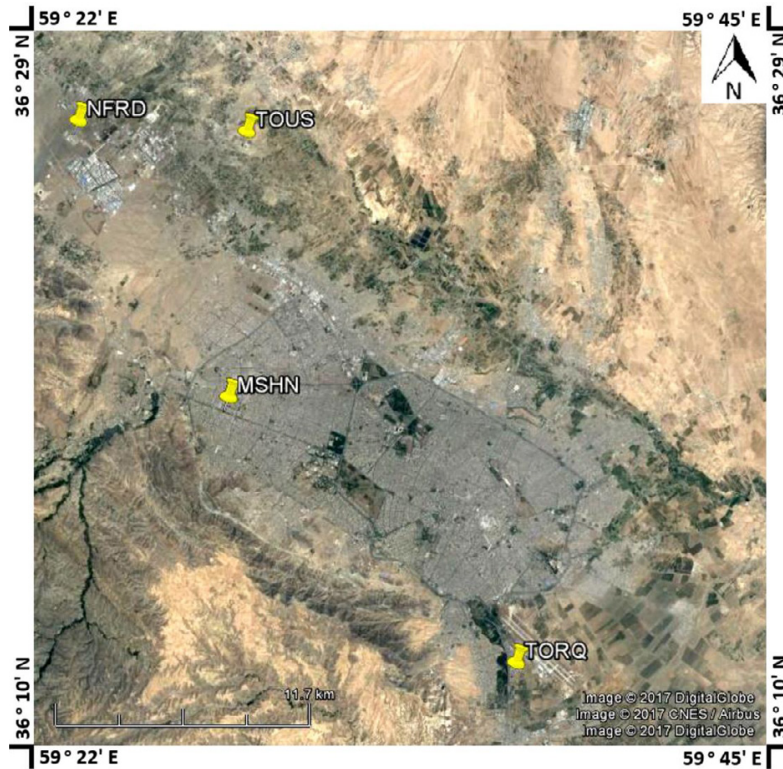
#### ۳-۴ تغییرات سطح آب زیرزمینی

به‌منظور بررسی علت فرونشست در منطقه‌ی مورد مطالعه، با توجه به پیشینه‌ی پژوهش که افت سطح آب زیرزمینی به‌عنوان عامل اصلی

#### ۲-۴ نتایج GPS

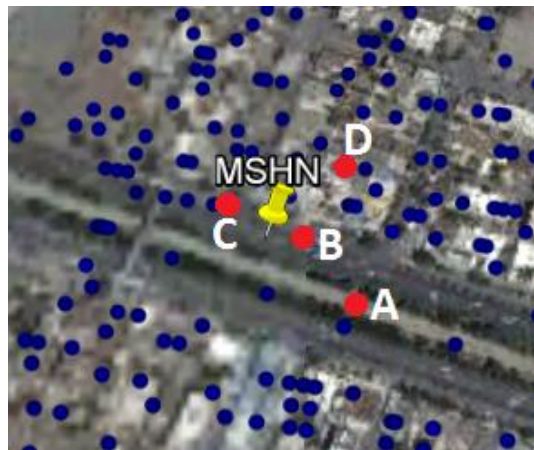
به‌منظور صحت‌سنجی نتایج، در این پژوهش از دو روش استفاده شده است. روش اول، استفاده از دو دسته تصاویر در یک منطقه یکسان بوده است که در بخش پیشین به آن اشاره شد. به عبارتی، با دسته تصاویر، دو پردازش جداگانه روی منطقه انجام شد و از ترکیب این دو دسته تصویر، تغییر شکل زمین در راستای قائم تعیین شد. روش دوم، استفاده از نقاط اندازه‌گیری زمینی مانند ایستگاه‌های GPS است. شکل ۸، محل ایستگاه‌های GPS را در محیط گوگل ارث نشان می‌دهد که فقط ایستگاه MSHN داخل شهر مشهد واقع شده و بقیه‌ی ایستگاه‌ها در حاشیه‌ی شهر قرار گرفته‌اند.

جهت بررسی صحت تحلیل‌های صورت گرفته و مقایسه‌ی نتایج تداخل‌سنجی راداری با نتایج GPS، چهار نقطه‌ی A، B، C و D در نزدیکی ایستگاه MSHN در نظر گرفته شده است که موقعیت این نقاط نسبت به ایستگاه مورد نظر در شکل ۹ نشان داده شده است. نرخ فرونشست این نقاط بر اساس نتایج تکنیک تداخل‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۳، ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۲ میلی‌متر در سال به‌دست‌آمده است



شکل ۸. محل ایستگاه‌های GPS

Fig. 8. The location of GPS stations in Mashhad area.

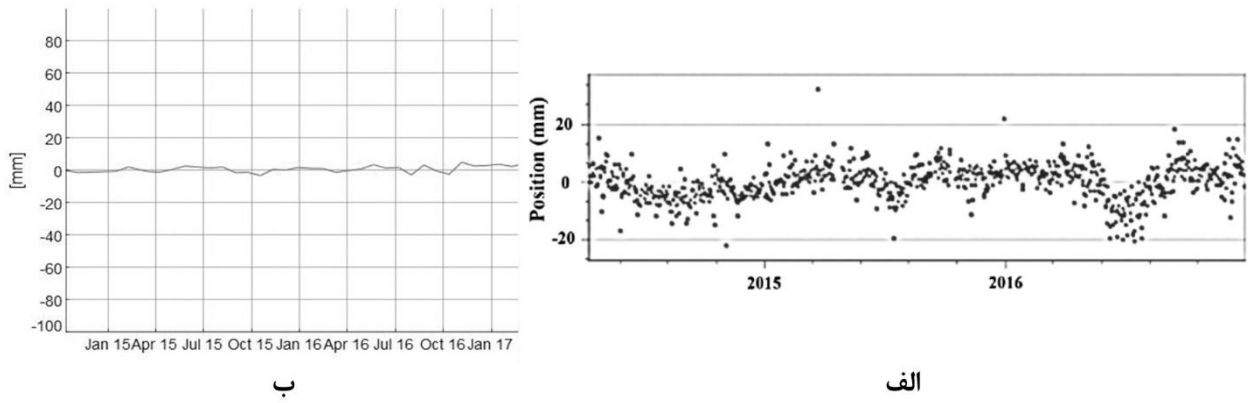


شکل ۹. موقعیت چهار نقطه‌ی A, B, C و D در محدوده‌ی ایستگاه MSHN

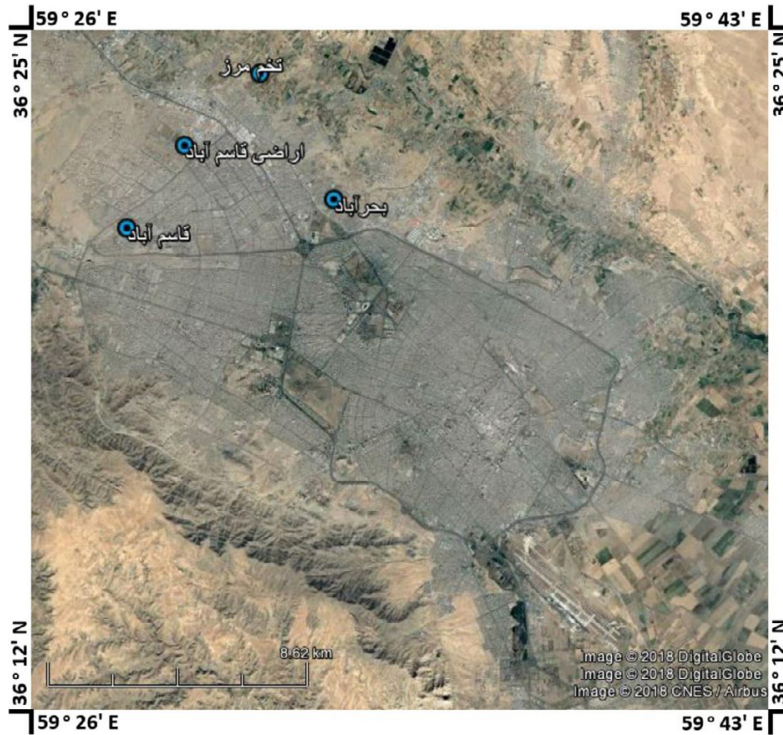
Fig. 9. The position of four points A, B, C and D near the MSHN GPS station.

در شکل ۱۲، تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست به‌دست‌آمده به روش تداخل‌سنجی راداری پراکنشگر دائمی در محل چاه‌های پیژومتری تخم مرز، اراضی قاسم‌آباد، قاسم‌آباد و بحرآباد آمده است. در میان این چاه‌ها، اراضی قاسم‌آباد با نرخ افت آب ۱/۵۱ متر

فرونشست دشت مشهد بیان شده بود، داده‌های تعدادی از چاه‌های پیژومتری که در منطقه‌ی دارای فرونشست واقع شده‌اند، مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۱۱، موقعیت پیژومترهای مورد مطالعه در این تحقیق را که در غرب و شمال غرب شهر مشهد واقع شده‌اند، نشان داده است.



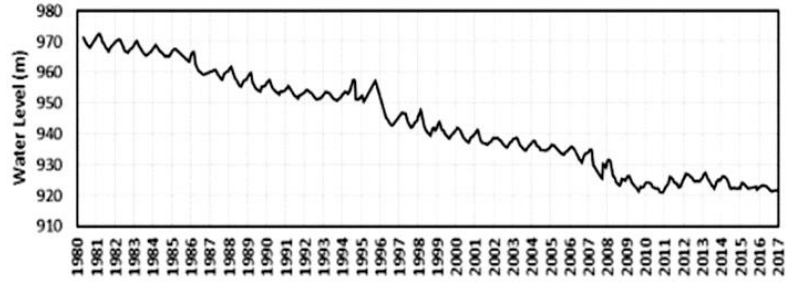
شکل ۱۰. مقایسه نتایج فرونشست زمین در محل ایستگاه MSHN، (الف) مشاهده GPS و (ب) نتیجه تداخل‌سنجی راداری  
 Fig. 10. The comparison for subsidence results at the location of MSHN station; (a) GPS observations, and (b) InSAR.



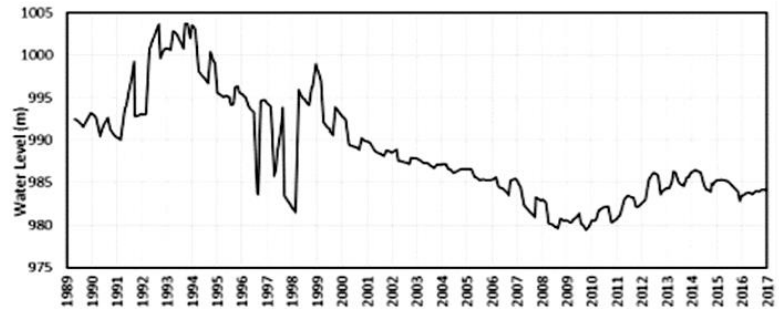
شکل ۱۱. موقعیت پیزومترهای مورد مطالعه  
 Fig. 11. The location of piezometers in the study area.

همچنین مشاهده می‌شود که در محل چاه قاسم‌آباد که در غرب شهر مشهد واقع است، با وجود نرخ افت آب حدود ۰/۵ متر در سال، نشست بسیار ناچیز است که باید عمق کم سنگ‌بستر و مشخصات ژئوتکنیکی خاک این منطقه (درشت‌دانه) را مؤثر دانست. با بررسی رابطه‌ی افت سالانه‌ی آب و فرونشست رخ داده در هر

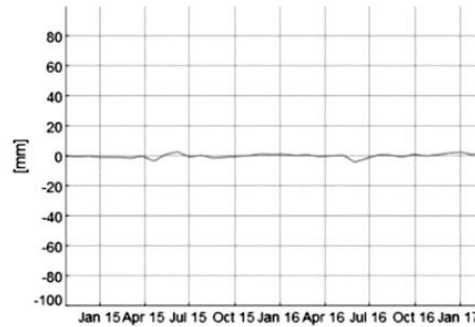
در سال، بیشترین افت را دارد ولی فرونشست متناظر آن بیشینه نیست که دلیل آن، مشخصات ژئوتکنیکی زمین یعنی درشت‌دانه بودن خاک در سطوح بالایی و وجود لایه‌های ریزدانه‌ی متراکم در عمق زیاد است. البته بیشترین افت کلی هد آب مربوط به تخم مرز بوده که بیش‌ترین نشست را نیز همین منطقه تجربه کرده است.



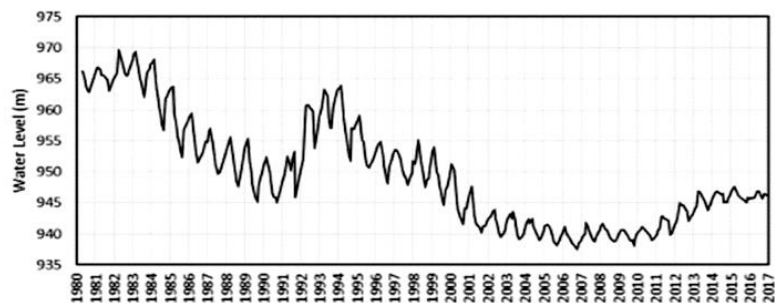
الف



ب



ج



د

شکل ۱۲. تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست؛ الف) تخم مرز، ب) اراضی قاسم‌آباد، پ) قاسم‌آباد و ت) بحرآباد

Fig. 12. The groundwater level changes and subsidence at the location of four piezometers: (a) Tokhm-Marz, (b) Arazi-Ghasem-Abad, (c) Ghasem-Abad, and (d) Bahr-Abad.

در سایر تحقیقاتی که فقط یک دسته تصویر (پایین‌گذر یا بالاگذر) مورد استفاده قرار گرفته، جابجایی زمین صرفاً در راستای مایل (راستای دید ماهواره) تعیین گردیده که با فرونشست اختلاف دارد. همچنین، به دلیل استفاده از دو دسته تصویر بالاگذر و پایین‌گذر و به دلیل انجام دو پردازش مختلف و مقایسه نتایج این دو پردازش قبل از ترکیب نتایج، صحت‌سنجی Cross Validation صورت گرفته که تأیید کننده صحت و دقت تحلیل‌های انجام‌شده بوده است.

- بررسی داده‌های پیرومتری چاه‌های آب زیرزمینی در سطح شهر مشهد نشان داد که مناطق با نرخ فرونشست بالا، دارای افت شدید تراز آبخوان بوده‌اند که این موضوع تأییدی است بر علت فرونشست این منطقه است. از طرفی باید به این نکته اشاره نمود که اهمیت تغییر سطح آب و میزان اثر آن بر نرخ فرونشست در مناطق مختلف شهر بسیار متفاوت است که علت آن تفاوت لایه‌بندی و جنس خاک است. به‌عنوان نمونه، مناطقی که از لایه‌های خاک تحکیم‌پذیر تشکیل شده است، از نرخ فرونشست بیشتری رنج می‌برند. همچنین، افت سطح آب زیرزمینی در منطقه‌ی مورد مطالعه، باعث نشست رسوبات و کاهش تخلخل آن‌ها شده است و بنابراین حتی اگر سطح آب زیرزمینی مجدد بالا آید، جبران این خسارات را نخواهد کرد.

- بررسی داده‌های GPS حاکی از آن است که در شمال غرب مشهد نشست بالایی در حال رخ دادن است. اما مشکل اساسی این داده‌ها تعداد بسیار محدود ایستگاه‌هایی است که فقط یک مورد از آن‌ها در غرب مشهد واقع است و آن نیز در جایی است که نشست ناچیزی دارد. همچنین نتایج نشان داد که مقادیر جابجایی زمین حاصل از GPS دارای نوسان و پراکندگی نیز بوده که ممکن است به دلیل خطای دستگاه و یا نوسانات حرارتی فصلی باشد. بنابراین ضروری است روش‌هایی نظیر تداخل‌سنجی راداری که نقاط زیادی را پردازش می‌کنند، به‌منظور پایش دائم منطقه مورد استفاده قرار گیرد.
- روش تداخل‌سنجی راداری می‌تواند در کنار تعداد مناسب ایستگاه GPS، به‌عنوان ابزاری برای پایش دائمی تغییر شکل سطح زمین به کار رود. این روش علاوه بر اقتصادی بودن و افزایش سرعت عمل، از دقت بسیار مناسبی نیز برخوردار است.

- با بررسی رابطه‌ی افت سالانه‌ی آب و فرونشست رخ داده در هر سال، مشخص می‌شود که به ازای هر یک متر افت سطح آب، حدود صفر تا ۱۰ سانتی‌متر نشست در شهر مشهد رخ داده است. این مورد،

سال در منطقه‌ی مورد مطالعه، مشخص می‌شود که به ازای هر یک متر افت سطح آب، با توجه به تغییر جنس لایه‌ی خاک در نقاط مختلف شهر مشهد، بین صفر تا ۱۰ سانتی‌متر نشست رخ داده است که این مورد، نتایج محققان پیشین [۸] در مورد رابطه‌ی مقدار فرونشست زمین به ازای هر یک متر افت سطح آب زیرزمینی را تأیید می‌کند. دامنه‌ی این تغییرات به ضخامت و تراکم‌پذیری لایه‌ها و زمان افت بستگی دارد و باید توجه نمود که نشست زمین به‌طور معمول بلافاصله با خروج سیال رخ نمی‌دهد بلکه در زمانی طولانی‌تر از برداشت اتفاق می‌افتد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فرونشست زمین به‌عنوان یکی از پدیده‌های مخرب زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مورد ارزیابی و اندازه‌گیری قرار گرفت و نرخ فرونشست شهر مشهد تعیین گردید. در این تحقیق، فرونشست منطقه‌ی شهر مشهد در بازه‌ی زمانی سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ میلادی با ترکیب ۶۹ تصویر راداری پایین‌گذر و بالاگذر ماهواره‌ی Sentinel-1A تعیین شد. در نهایت، داده‌های ایستگاه‌های GPS، اطلاعات چاه‌های پیرومتری و مشخصات ژئوتکنیکی منطقه به‌منظور صحت‌سنجی و تفسیر نتایج استفاده گردید. نتایج حاصل از این تحقیق در ادامه آمده است.

- نتایج پردازش و تحلیل فرونشست به روش تداخل‌سنجی راداری پراکنشگر دائمی منجر به تهیه‌ی نقشه‌ی نرخ فرونشست زمین در محدوده‌ی شهر مشهد در بازه‌ی زمانی سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ میلادی شد. بر این اساس، بیشینه‌ی نرخ فرونشست برابر ۱۴ سانتی‌متر در سال در شمال غرب شهر مشهد به دست آمد.

- نتایج تحقیق حاضر نشان داد که اگر چه طبق تحقیقات گذشته نرخ بیشینه فرونشست به دلیل قرار گرفتن چاه‌های برداشت آب زیرزمینی و شرایط ژئوتکنیکی در دشت مشهد قرار دارد، ولی ناحیه فرونشست در حال پیشروی به سمت مرکز شهر از سمت شمال غرب می‌باشد که می‌تواند در آینده نزدیک تبعات جبران‌ناپذیری به دنبال داشته باشد.

- در تحقیق حاضر برای اولین بار از هر دو دسته تصاویر بالاگذر و پایین‌گذر استفاده شده و با ترکیب نتایج حاصل از آن‌ها، جابجایی در راستای قائم، یعنی فرونشست مشهد برآورد گردیده است، در حالی که

and consolidation of clay, Engineering News-Record, 95(3) (1925) 874-878.

- [4] M. Bagheri, Spatial modeling of landslide phenomena due to groundwater extraction in spatial information systems (case study: Rafsanjan plain), Kerman Graduate University of Advanced Technology, 2012.
- [5] J. Pacheco, J. Arzate, E. Rojas, M. Arroyo, V. Yutsis, G. Ochoa, Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro valley, México, Engineering Geology, 84(3) (2006) 143-160.
- [6] C.-W. Liu, W.-S. Lin, L.-H. Cheng, Estimation of land subsidence caused by loss of smectite-interlayer water in shallow aquifer systems, Hydrogeology journal, 14(4) (2006) 508-525.
- [7] M. Anwari, and H. Noorollahian, A new approach to subsidence of Mashhad plain, Geomatics Conference, Tehran Surveying Organization, 2007.
- [8] M. Motagh, Y. Djamour, T.R. Walter, H.-U. Wetzel, J. Zschau, S. Arabi, Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS, Geophysical Journal International, 168(2) (2007) 518-526.
- [9] M. Bolourchi, and J. Roshanarvan, Geological hazards of land subsidence in Khorasan Razavi province, 2008.
- [10] M. Dehghani, M.J.V. Zoj, S. Saatchi, J. Biggs, B. Parsons, T. Wright, RADAR interferometry time series analysis of Mashhad subsidence, Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 37(1) (2009) 147-156.
- [11] A. Behniafar, H. Ghanbarzadeh, A. Eshraghi, Investigation of effective factors in subsidence of Mashhad plain and its geomorphic consequences, 2010.
- [12] V. Akbari, M. Motagh, Improved ground subsidence monitoring using small baseline SAR interferograms and a weighted least squares inversion algorithm, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 9(3) (2012) 437-441.

نتایج محققان پیشین را تأیید می‌کند که مقدار فرونشست زمین برای هر یک متر افت سطح آب زیرزمینی، بین یک تا ده سانتی متر متغیر است. دامنه‌ی این تغییرات به ضخامت و تراکم‌پذیری لایه‌ها و زمان افت بستگی دارد. البته باید توجه نمود که نشست زمین به‌طور معمول بلافاصله با خروج سیال رخ نمی‌دهد بلکه در زمانی طولانی‌تر از برداشت اتفاق می‌افتد.

• پدیده‌ی فرونشست باعث بروز مشکلاتی مانند تخریب ابنیه، لوله‌زایی (بالا آمدن ظاهری لوله‌های آب از سطح زمین)، ریزش جداره‌ی چاه‌ها، ایجاد درز و شکاف در زمین، تغییر شیب زمین، افزایش سیل‌خیزی، فرو رفتن تدریجی دکل‌ها و سازه‌ها، تغییر شیب رودخانه‌ها و جاده‌های منطقه می‌گردد. فرونشست زمین یکی از پدیده‌های مخرب زمین‌شناختی است که می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیر مالی و جانی به دنبال داشته باشد و به بسیاری از سازه‌های عمرانی و حتی زمین‌های کشاورزی آسیب برساند.

• با توجه به افزایش جمعیت و توسعه شهر مشهد، تغییر شرایط استفاده از شبکه جمع‌آوری فاضلاب و گسترش این شبکه، تغییر شرایط اقلیمی و تغییر وضعیت برداشت آب‌های زیرزمینی، نیاز به پایش دائمی وضعیت سطح آب زیرزمینی و فرونشست در این منطقه وجود دارد تا از خسارات احتمالی آن جلوگیری شده و راهکارهایی به منظور مدیریت و علاج بخشی ارائه گردد.

## ۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از آژانس فضایی اروپا، سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی و اداره کل نقشه‌برداری شمال شرق کشور به خاطر همکاری در جمع‌آوری داده‌ها و نیز از دنیل پریسین به خاطر نظرات تخصصی ایشان و در اختیار گذاشتن نرم‌افزار مورد نیاز تشکر نمایند.

## مراجع

- [1] M. Dehghani, Determining the rate and modeling of land subsidence under the influence of groundwater extraction using radar interferometry technique, KNTU, 2009.
- [2] J.F. Poland, Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal, 1984.
- [3] K. Terzaghi, Principles of soil mechanics, IV, Settlement



- Survey of Iran Northeast Territory, 2011.
- [22] S. Usai, R. Hanssen, Long time scale InSAR by means of high coherence features, European Space Agency-Publications-Esa Sp, 414 (1997) 225-228.
- [23] A.J. Hooper, Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation, 2006.
- [24] A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca, Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 38(5) (2000) 2202-2212.
- [25] D. Perissin, Interferometric SAR Multitemporal Processing: Techniques and Applications, in: Multitemporal Remote Sensing, Springer, 2016, pp. 145-176.
- [26] A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca, Permanent scatterers in SAR interferometry, IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 39(1) (2001) 8-20.
- [27] Y. Maghsoudi, and S. Mahdavi, The principles of radar remote sensing, 2015.
- [28] D. Perissin, F. Rocca, High-accuracy urban DEM using permanent scatterers, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(11) (2006) 3338-3347.
- [29] D. Perissin, C. Prati, M.E. Engdahl, Y.-L. Desnos, Validating the SAR wavenumber shift principle with the ERS-Envisat PS coherent combination, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(9) (2006) 2343-2351.
- [30] Y. Maghsoudi, F. van der Meer, C. Hecker, D. Perissin, A. Saepuloh, Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, (2017).
- [13] G.R. Lashkaripour, M. Ghafoori, S.M. Moussavi Maddah, An investigation on the mechanism of land subsidence in the northwest of mashhad city, NE Iran, Journal of Biodiversity and Environmental Sciences, 5 (2014).
- [14] J. Dolati, Gh. Lashkaripur, N. Hafezi-Moghadas, M. Salehi-Motamed, Investigation of development process, effects and mechanism of land subsidence in Mashhad plain, Specialized conference on land subsidence in Iran, 2016.
- [15] F. Torabi-Hikmabad, Evaluation of rising water level and its problems in the center of Mashhad, Ferdowsi University of Mashhad, 2014.
- [16] Mashhad Water and Waste Water Company, Investigation of drinking water supply in Mashhad, 2015.
- [17] M. Dehghani, Presenting a new algorithm based on radar interferometry technique to monitor ground subsidence due to groundwater extraction, Engineering Journal of Geospatial Information Technology, 2 (2), 2014, 61-73.
- [18] Gh. Lashkaripour, M. Ghafouri, Z. Sevizi, Z. Peyvandi, Groundwater drop and land subsidence in Mashhad plain, 9th Conference of Iranian Geological Society, 2005.
- [19] Z. Sevizi, Determination of soil properties using inverse conversion function (case study: Mashhad plain), Ferdowsi University of Mashhad, 2007.
- [20] S.M. Mousavi-Madah, Investigation of the causes of rupture of wall pipes of water wells in Mashhad, Ferdowsi University of Mashhad, 2010.
- [21] N. Hafezi-Moghadas, J. Taheri, and J. Roshanarvan, Microzonation of the city of Mashhad, Geological

**HOW TO CITE THIS ARTICLE**

*M. Khorrami, S. Abrishami, Y. Maghsoudi, Mashhad Subsidence Monitoring by Interferometric Synthetic Aperture Radar Technique, Amirkabir J. Civil Eng., 51(6) (2020) 1187-1204.*

DOI: [10.22060/ceej.2018.14300.5617](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14300.5617)



