

## بررسی فرونشست دشت اسفراین به علت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی

محمد اکبری<sup>۱\*</sup>، زهرا آزر<sup>۲</sup>، مبین افتخاری<sup>۳</sup>، سید احمد اسلامی نژاد<sup>۴</sup>، سعید محمودی زاده<sup>۵</sup>

۱. دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی و عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۴. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه

تهران، تهران، ایران

۵. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سنجش از دور، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی فناوری پیشرفته کرمان، ایران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۲/۰۱/۰۱؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۲/۰۱/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۲/۰۳/۱۱)

### چکیده

فرونشست زمین یکی از مخاطرات طبیعی است که به صورت تدریجی در بسیاری از مناطق ایران اتفاق می‌افتد. برای جلوگیری از پیشروی فرونشست باید علل رخداد آن بررسی شود تا با توجه به ویژگی‌های هر منطقه تصمیم‌گیری‌ها مبتنی بر واقعیت باشد. افت سطح آب زیرزمینی یکی از عوامل مهم مؤثر بر فرونشست است، ولی به دلیل پیچیدگی ارتباط فرونشست با عوامل تأثیرگذار دیگر، نمی‌توان به صورت عام یک رابطه خطی مستقیم بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست در نظر گرفت. این تحقیق با هدف بررسی رابطه بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی به بررسی همبستگی بین دو پارامتر یادشده در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ در منطقه اسفراین پرداخته است. در این راستا، سری زمانی تداخل‌سنجی راداری و سری زمانی سطح آب زیرزمینی چاه‌های پیزومتری در منطقه اسفراین مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. به منظور بررسی جابه‌جایی‌های زمین در دشت اسفراین، نقشه جابه‌جایی با ۲۴ تصویر Sentinel-A از روش PSInSAR تهیه شد. مقادیر نرخ جابه‌جایی سالانه در منطقه مورد مطالعه، بین ۰/۰۷ تا ۶۷ میلی‌متر برآورد شد. همچنین، حداکثر مقدار جابه‌جایی جمعی دشت اسفراین در بازه زمانی در نظر گرفته شده در این پژوهش، به حدود ۳۹ سانتی‌متر رسید. همچنین، نتایج نشان داد با کاهش سطح آب زیرزمینی، مقدار فرونشست در منطقه مورد مطالعه افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: فرونشست، تداخل‌سنجی راداری، تحلیل سری زمانی، سطح آب زیرزمینی، چاه‌های پیزومتری.

## ۱. مقدمه

افت تدریجی ارتفاع سطح زمین که با جابه‌جایی‌های ناچیز افقی همراه است را فرونشست گویند. به دلیل تدریجی بودن آن و ایجاد خسارت‌های جبران‌ناپذیر، این پدیده را زلزله خاموش می‌نامند. آب حاصل از بارندگی یا ذوب برف‌ها، در عمق خاک حرکت می‌کند تا به لایه‌های نفوذناپذیر می‌رسد، سپس تمام منافذ را پر می‌کند و منطقه اشباعی را به وجود می‌آورد که به آن آبخوان (لایه‌های آبدار یا آبخوانه) گفته می‌شود [۱]. برداشت آب زیرزمینی به علت افت سطح ایستابی و کاهش فشار سیال و افزایش فشار بین ذرات خاک، منجر به ایجاد تراکم و پدیده فرونشست می‌شود [۲].

مشاهدات سیستم‌های تعیین موقعیت جهانی (GPS)<sup>۱</sup> و شبکه‌های ترازیبی دقیق دو روش ژئودتیکی برای پایش فرونشست است. هر دو این روش‌ها محدود به ایستگاه‌های اندازه‌گیری هستند و نیاز به حضور در منطقه، انجام مشاهدات میدانی، صرف وقت و هزینه زیاد دارند. از دیگر روش‌های ژئودتیکی پایش فرونشست، تکنیک تداخل‌سنجی راداری است. به دلیل تدریجی بودن پدیده فرونشست برای بررسی آن باید از روش‌های سری زمانی استفاده کرد. از جمله این روش‌ها، تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی (PSInSAR)<sup>۲</sup> و تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری بر مبنای طول خط مبنای کوتاه (SBAS)<sup>۳</sup> هستند. در این تحقیق برای محاسبه فرونشست از روش PSInSAR استفاده شده است، این روش به دلیل استفاده از نقاط پراکنش‌گر دائمی قادر است فاز ناشی از اتمسفر و عدم همبستگی زمانی و مکانی، خطاهای باقی‌مانده توپوگرافی و نویز را کاهش دهد. در تحقیقات Tamburini و همکاران (۲۰۱۰) و Rucci و همکاران (۲۰۱۲) نتایج این روش با مشاهدات GPS و ترازیبی دقیق مقایسه شده‌اند که نشان داده شده، دقت روش PSInSAR در حد میلی‌متر است [۳ و ۴]. همچنین، بر اساس تحقیقات Chang و همکاران (۲۰۱۰)، Biswas و همکاران (۲۰۱۸) و Khorrani و همکاران (۲۰۱۹) نتایج این روش همبستگی بالایی با مشاهدات GPS و ترازیبی دقیق دارد [۵-۷].

راداری در دهه اخیر به طور گسترده در زمینه مطالعات فرونشست زمین مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در تحقیق Xiong و همکاران (۲۰۲۱) جابه‌جایی‌های پل هنگ‌کنگ ژوهای ماکائو<sup>۴</sup> با استفاده از روش PSInSAR با ۸۶ تصویر سنتینل<sup>۵</sup> از ۶ ژانویه ۲۰۱۸ تا ۲۷ نوامبر با استفاده از ۲۰۲۰ محاسبه شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که حداکثر نرخ سالانه فرونشست در این منطقه ۱۷ میلی‌متر است [۸]. در مقاله Malik و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از روش PS-InSAR و داده‌های Cosmo-skymed در بازه زمانی ۸ ژوئن ۲۰۱۱ تا ۱۵ نوامبر ۲۰۱۷، تصاویر سنتینل در بازه زمانی ۱۸ دسامبر ۲۰۱۴ تا ۲۷ نوامبر ۲۰۱۸ و تصاویر PALSARALOS در بازه زمانی ۱۹ ژانویه ۲۰۰۷ تا ۲۰ ژانویه ۲۰۱۱ برای محاسبه فرونشست منطقه دهلی<sup>۶</sup> استفاده شده است. در این مقاله میانگین جابه‌جایی‌های این منطقه را با داده Cosmo-skymed، ۱۵ میلی‌متر در سال، حداکثر جابه‌جایی محاسبه شده از تصاویر ALOS، ۱۰ تا ۱۸ میلی‌متر در سال و جابه‌جایی‌های حاصل از تصاویر سنتینل، ۲ تا ۱۶ میلی‌متر در سال آورده شده است [۹]. فرونشست شهر چانگچون جین را با استفاده از روش PSInSAR با تصاویر سنتینل در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ محاسبه شده و نتایج مقاله Wang و همکاران (۲۰۲۱) نشان داده است که حداکثر نرخ سالانه فرونشست این منطقه، ۲۰/۴۵ میلی‌متر و میانگین نرخ سالانه فرونشست ۲/۹۸ میلی‌متر است. همچنین، در این تحقیق همبستگی بین نتایج PSInSAR و داده‌های ترازیبی درجه ۲، ۰/۶۷ به دست آمده که این مقدار همبستگی به قابل اطمینان بودن نتایج PSInSAR اشاره دارد [۱۰]. در تحقیق Liu و همکاران (۲۰۱۰) نقشه فرونشست در جینگهای<sup>۷</sup> چین با استفاده از روش PSInSAR با تصاویر تراسار<sup>۸</sup> تهیه شده، ۲۸ میلی‌متر مقدار فرونشست در سال ۲۰۰۹ در قسمت شرق منطقه مطالعاتی اتفاق افتاده که این مقدار بین ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر، در بخش شمالی حدود ۲۲ تا ۳۲ میلی‌متر و در مناطق مسکونی وسیع مقدار فرونشست بین ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر گزارش شده است [۱۱]. Jo و همکاران (۲۰۱۱) فرونشست منطقه اولسان<sup>۹</sup> با روش PSInSAR

4. Hong Kong-Zhuhai-Macao

5. Sentinel-1A

6. Dehli NCR

7. Jinghai

8. TerraSAR-X

9. Ulsan

1. Global Positioning System

2. Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar

3. small baseline subset

که روی بخش شرق این منطقه انجام داده‌اند نشان داده است که بین قدمت ساختمان‌ها و نرخ فرونشست همبستگی وجود دارد و به این صورت که در ساختمان‌های با قدمت کمتر نرخ فرونشست کمتری تخمین زده شده است [۱۶]. در پژوهش Chen و همکاران (۲۰۲۰) فرونشست در دشت بیجینگ<sup>۹</sup> چین در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۸ با استفاده از روش PSInSAR به دست آورده شده و سپس ارتباط بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را در سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۸ در چهار آبخوان بررسی شده است. حداکثر مقادیر همبستگی ارائه شده در این مقاله برای این چهار آبخوان، ۰/۳۵، ۰/۷۳، ۰/۸ و ۰/۵ بوده است [۱۷]. در مقاله Chen و همکاران (۲۰۱۰) فرونشست تایوان با سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) محاسبه و سپس، رابطه خطی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۶ را به دست آورده‌اند. در این مقاله بر اساس نتایج، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی را تأثیرگذارترین عامل در رخداد فرونشست این منطقه دانسته‌اند [۱۸]. Firdaus و همکاران (۲۰۱۸) فرونشست سمرنگ<sup>۱۰</sup> را در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ و با استفاده از روش PSInSAR و تصاویر سنتینل محاسبه کردند که حداکثر فرونشست در منطقه ۴/۵- سانتی‌متر بود. سپس همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی را ۴۷/۵۸ درصد به دست آمد [۱۹]. در پژوهش زارعی و همکاران (۲۰۲۰) رابطه بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی بررسی شده است. در این تحقیق ابتدا فرونشست را با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری محاسبه و سپس همبستگی بین نرخ فرونشست و نرخ افت سطح آب زیرزمینی را در سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱ را محاسبه کرده‌اند [۱]. روش به‌کاربرده شده در این تحقیق برای اولین بار در منطقه مورد مطالعه پیاده‌سازی شده است و از این لحاظ دارای نوآوری است. در واقع، می‌توان گفت که نوآوری این تحقیق منطقه‌محور است. نکته مهم این تحقیق در این است که نتایج نشان داد با برداشت بی‌رویه از منابع زیرزمینی و کاهش ارتفاع آب در این منطقه فرونشست افزایش می‌یابد و این دو پارامتر در منطقه مورد مطالعه همبستگی بالایی با یکدیگر دارند. بنابراین، در این تحقیق تنها رابطه بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی بررسی شد.

SBAS در بازه ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱ بررسی کردند. نتایج این مقاله نشان داده است که حداکثر نرخ فرونشست به‌دست‌آمده از روش SBAS، ۴/۴ سانتی‌متر در سال و از روش PSInSAR، ۴ سانتی‌متر است [۱۲].

بر اساس تحقیق Békési و همکاران (۲۰۱۹) نرخ فرونشست در مکزیک در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ با داده‌های ماهواره انویست<sup>۱</sup> و با استفاده از روش PSInSAR، ۸ میلی‌متر در سال محاسبه شده است. همچنین، نتایج این تحقیق نشان داد حداکثر فرونشست در اطراف چاه‌ها است [۱۳]. تحقیقات متفاوتی جهت بررسی روابط بین فرونشست و عوامل تأثیرگذار بر آن انجام شده است، در بعضی از این تحقیقات تنها تأثیر عامل تغییرات سطح آب زیرزمینی بر پدیده فرونشست بررسی و بدون توجه به تأثیرات سایر عوامل، بین مقادیر فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی رابطه خطی ارائه شده است. در تحقیق Kim و همکاران (۲۰۰۷) نرخ فرونشست در بندر اینچئون<sup>۲</sup> واقع در بوسان<sup>۳</sup> کره جنوبی را با JERS-1<sup>۴</sup> و با استفاده از روش PSInSAR، ۳۰ میلی‌متر در سال و در منطقه ایستگاه راه آهن ژوان<sup>۵</sup>، ۱۵ میلی‌متر در سال تخمین زده‌اند. در نهایت در این مقاله دلیل اصلی فرونشست در این منطقه ساحلی را افزایش سطح آب دریا دانسته‌اند [۱۴]. در پژوهش Sun و همکاران (۲۰۱۷) نقشه فرونشست دشت لیائوها<sup>۶</sup> در چین با تصاویر ALOS/PALSAR و با استفاده از روش PSInSAR در بازه ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ تهیه شد. طبق نقشه ارائه شده در این مقاله حداکثر نرخ فرونشست در این منطقه ۲۳۶ میلی‌متر در سال و کل مقدار فرونشست در ۴ سال، ۷۹۹ میلی‌متر است. همچنین، در این تحقیق نتیجه‌گیری شده است که بین فرونشست و مناطق استخراج نفت همبستگی وجود دارد و کشف شده که مقادیر زیاد فرونشست بیشتر در مناطقی است که چاه‌های نفت وجود دارند [۱۵]. همچنین در تحقیق Solari و همکاران (۲۰۱۶) که حداکثر نرخ فرونشست در شهر پیزا<sup>۷</sup> ایتالیا را با دو مجموعه داده ERS 1/2<sup>۸</sup> و انویست و با استفاده از روش PSInSAR در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۰، ۲۰ میلی‌متر در سال برای هر دو داده به دست آورده‌اند، مطالعاتی

1. Envisat SAR
2. Incheon
3. Busan
4. Japanese Earth Resource Satellite-1
5. Juan
6. Liaohe
7. Pisa
8. European Remote-Sensing Satellite

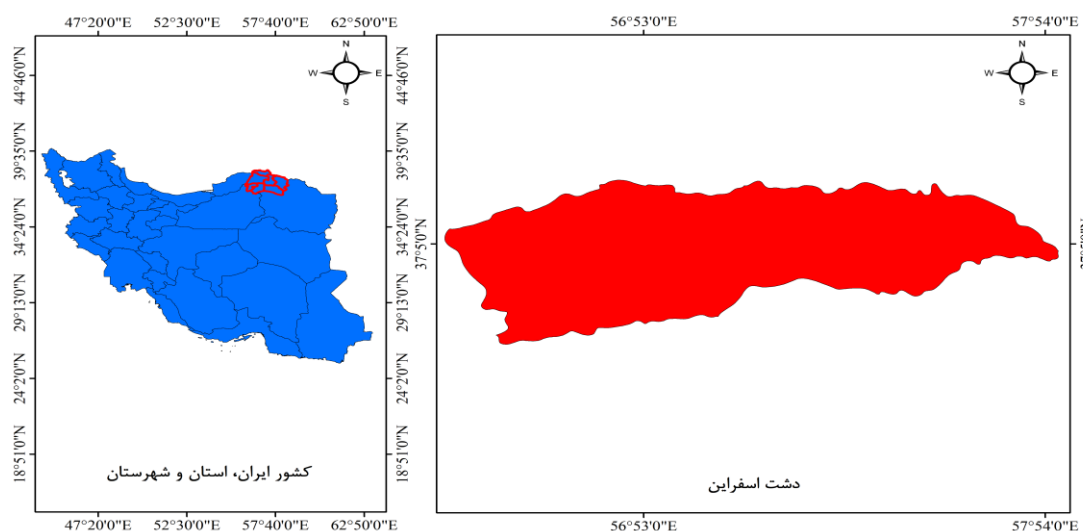
9. Beijing

10. Semarang City, Indonesia

## ۲. منطقه مورد مطالعه

اسفراین در شمال غربی استان خراسان شمالی بین ۵۶ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۷ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. حوضه آبریز اسفراین یکی از زیرحوضه‌های کویر مرکزی است. این حوضه آبریز بر اساس تقسیمات سیاسی جدید در استان خراسان شمالی واقع شده است. طبق جدول ۱ بر اساس آخرین گزارش بارگذاری شده روی سایت شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان خراسانی شمالی<sup>۱</sup> (سیمای آب استان)، حوضه آبریز اسفراین دارای مساحتی معادل ۴۵۷۹ کیلومترمربع است و در فاصله تقریبی ۶۰ کیلومتری جنوب بجنورد واقع شده است (شکل ۱). بر اساس آخرین آمار و اطلاعات به روز سایت شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان

خراسان شمالی (سیمای آب استان)، محدوده دشت اسفراین در بازه زمانی مهر ۱۴۰۰ تا شهریور ۱۴۰۱ دارای متوسط بارندگی ۲۵۵ میلی‌متر است. همچنین بر اساس این آمار متوسط بارندگی استان در بازه زمانی ۳۰ سال اخیر ۲۷۲/۷ میلی‌متر بوده است که می‌توان پی برد میانگین بارندگی در محدوده دشت اسفراین از میانگین ۳۰ سال اخیر استان پایین تر بوده است. همچنین، بر اساس آخرین آمار شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان خراسانی شمالی، تعداد ۵۱۱ دهانه چشمه در حوضه آبریز دشت اسفراین وجود دارد که این در حدود ۱۶ درصد کل چشمه‌های حوضه آبریز استان را در بر می‌گیرد. علاوه بر این، در حوضه آبریز اسفراین، تعداد ۲۹۳ رشته قنات موجود است که این در حدود ۴۴ درصد کل قنات‌های حوضه آبریز استان را در بر می‌گیرد.



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه پژوهش

تصاویر در باند C معادل طول موج ۵/۵۴ سانتی‌متر و فرکانس ۵/۴۰۵ گیگاهرتز، با زاویه فرود  $39/2768^\circ$  با دو پلاریزاسیون VH, VV درمد IW<sup>۴</sup> و عرض تصویربرداری ۲۵۰ کیلومتر با قدرت تفکیک مکانی  $13/94 * 3/67$  متر اخذ شده‌اند (جدول ۱). محدوده مورد مطالعه در این تحقیق در دو Subswath (IW2, IW3) تصاویر Sentinel-1A قرار می‌گیرند.

## ۳. داده‌های مورد استفاده

حداقل حجم داده برای کار آماری ۱۵ نمونه است. بنابراین، روش PSInSAR برای انتخاب نقاط پراکنش‌گر از شاخص پراکنندگی دامنه (یک روش آماری) استفاده می‌کند نیز باید حداقل ۱۵ تصویر برای پردازش استفاده شود. بنابراین، در این تحقیق ۲۴ تصویر راداری Sentinel-1A با فرمت SLC در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ در عبور بالاگذر<sup>۲</sup> در مسیر<sup>۳</sup> شماره ۲۸ ماهواره استفاده شد. این

3. Track  
4. Interferometric Wide

۱. لینک فایل گزارش  
2. Ascending

جدول ۱. مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده در پژوهش

داده	تعداد تصاویر	بازه زمانی تصاویر	فرمت داده	مد تصویربرداری	شماره مسیر	جهت مدار	قدرت تفکیک در جهت آزیموت (متر)	قدرت تفکیک در جهت رنج (متر)
سنتینل ۱	۲۴	۱۳۹۵-۱۴۰۰	SLC	IW	۲۸	بالا گذر	۱۳/۹۵	۳/۶۷

است که این محدودیت‌ها سبب توسعه روش PSInSAR شده است. روش PSInSAR استاندارد را اولین بار فرتی و همکاران (۲۰۰۱) [۲۰] مطرح کردند، این روش با هدف غلبه بر محدودیت‌های تکنیک تداخل‌سنجی معمول (عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی و اثر اتمسفر) با استفاده از نقاط همدوس در بازه زمانی آنالیز به دقت پایش میلی‌متری فرونشست می‌رسد، در صورتی که تراکم نقاط پراکنش گر کم باشد، تخمین فاز اتمسفر و حذف آن امکان‌پذیر نیست [۲۰]. روش PSInSAR به عنوان یک ابزار قوی برای تخمین جابه‌جایی‌های کوچک در مناطق شهری بزرگ مقیاس در طول بازه زمانی‌های بلندمدت یا کوتاه‌مدت شناخته شده است. پراکنش‌گرهای دائمی نقاطی است که طی زمان فاز آن‌ها ثابت می‌ماند، با استفاده از این پراکنش‌گرهای دائمی فاز ناشی از اتمسفر و عدم همبستگی زمانی و مکانی، خطاهای باقی‌مانده توپوگرافی و نویز حذف می‌شود. اشکال این روش فقدان پیوستگی بین داده‌هاست، داده‌ها مجموعه‌ای از نقاط است که پراکنندگی آن‌ها به شکل و کاربری منطقه بستگی دارد، این نقاط در مناطق شهری و مناطق با جنس سنگ فراوان ولی در مناطق با پوشش گیاهی اندک است، در نتیجه روش PSInSAR بهترین عملکرد را در مناطق شهری و مناطق با جنس سنگ دارد [۲۱]. داده‌های مورد نیاز،  $n+1$  تصویر راداری منطقه با فاصله زمانی‌های مناسب است که یک تصویر به عنوان تصویر پایه (master) و  $n$  تصویر به عنوان تصاویر پیرو (slave) در نظر گرفته می‌شوند. تصویر پایه بر این اساس انتخاب می‌شود که عدم همبستگی مکانی و زمانی تصاویر مینیمم شود. به بیان دیگر، به ازای تداخل‌نماهای تشکیل‌شده بر مبنای آن، مقدار همدوسی تجمعی آن بیشینه شود. بعد از انتخاب نقاط پراکنش گر دائمی در مجموعه تداخل‌نماها با یکی از سه روش پراکنندگی دامنه بر مبنای شاخص پراکنندگی دامنه، روش مبتنی بر پایداری فاز و روش مبتنی بر همبستگی، بین این نقاط شبکه‌ای با استفاده از روش مثلث‌بندی دلونی<sup>۶</sup> تشکیل می‌شود. این شبکه اساس

#### ۴. تداخل‌سنجی راداری

تداخل‌سنجی راداری تکنیکی است که از تداخل امواج الکترومغناطیس جهت رسیدن به اطلاعات مفید مانند تهیه مدل رقومی ارتفاعی، میزان جابه‌جایی زمین و... استفاده می‌کند [۵ و ۶]. این تکنیک از اختلاف فاز زوج تصویر راداری استفاده می‌کند، بنابراین پارامتر فاز امواج نقش اساسی را در این تکنیک دارند [۷]. روش تداخل‌سنجی تفاضلی مرسوم<sup>۱</sup> و روش‌های تحلیل سری زمانی مانند طول خط مبنای کوتاه<sup>۲</sup> و تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی از روش‌های تداخل‌سنجی تفاضلی است [۵]. با وجود اینکه روش تداخل‌سنجی تفاضلی مرسوم<sup>۳</sup> جابه‌جایی‌های زمین را با دقت خوبی اندازه‌گیری می‌کند، نمی‌تواند نقاطی که بازپراکنش آن‌ها با زمان تغییر می‌کند را به دلیل عدم همبستگی‌های زمانی مورد بررسی قرار دهد [۱۰]. مناطق پوشیده از برف، زمین‌های با پوشش گیاهی و جنگل‌ها از جمله مناطق با مشکل عدم همبستگی هستند. با توجه به اینکه در روش‌های تحلیل سری زمانی از مجموعه‌ای از تداخل‌نماها در یک بازه زمانی استفاده می‌شود، عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی و اثرات اتمسفر کاهش می‌یابد [۹]. بنابراین این دسته از روش‌ها از روش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی مرسوم دقیق‌تر هستند.

#### ۴.۱. تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر

##### پراکنشگرهای دائم (PSInSAR)

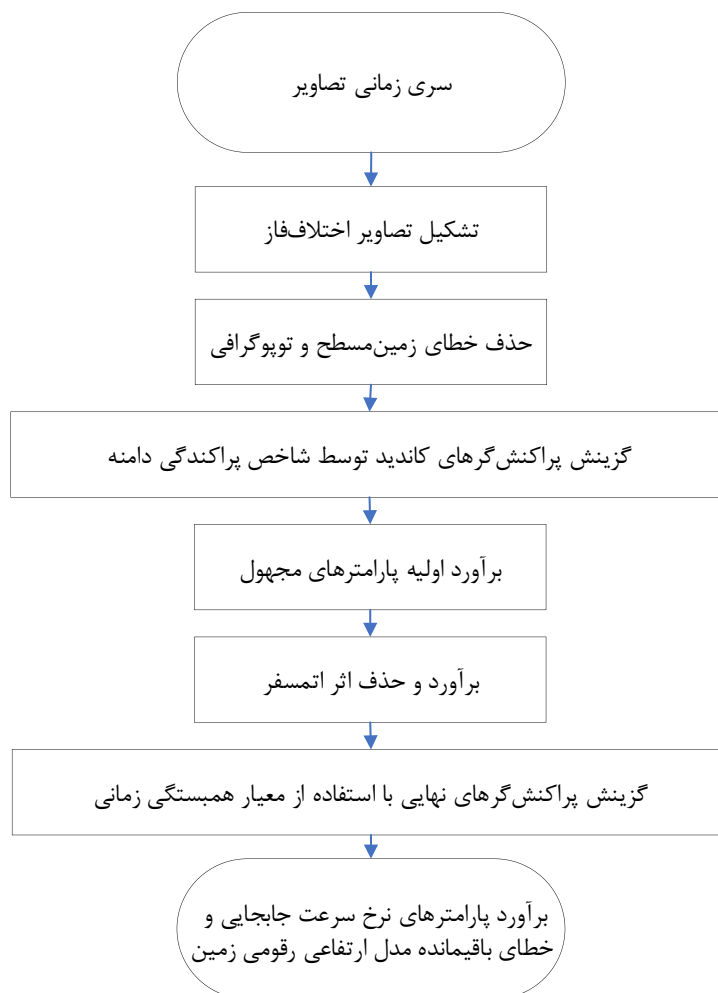
از جمله محدودیت‌های روش تداخل‌سنجی راداری مرسوم، عدم همدوسی<sup>۴</sup> تصاویر مانع از تولید تداخل‌نماهای تفاضلی می‌شود، خطای توپوگرافی باقی‌مانده در تداخل‌نما (بزرگی این خطا به کیفیت DEM<sup>۵</sup> و خط مبنای قائم وابسته است)

1. Differential Interferometric Synthetic Aperture radar (D-InSAR)
2. Small Baseline Subset (SBAS)
3. Differential Interferometric Synthetic Aperture radar (D-InSAR)
4. Coherence
5. Digital Elevation Model

6. Delaunay triangulation

همبستگی اتمسفر بیشتر باشد آن اتصال حذف می‌شود تا افزونگی اتصالات کاهش یابد و دقت تخمین جابه‌جایی زمین افزایش یابد. مراحل اجرای روش PSInSAR به شرح شکل ۲ است [۱۳ و ۱۵]:

تخمین فاز ناشی از اتمسفر و افزایش نقاط PS است، به علت مجاور بودن نقاط در شبکه و همبسته بودن اتمسفر در مکان، اختلاف فاز بین دو پیکسل همسایه فاز اتمسفر حذف خواهد شد [۲۲]. در مثلث‌بندی بین نقاط اگر طول اتصالی از



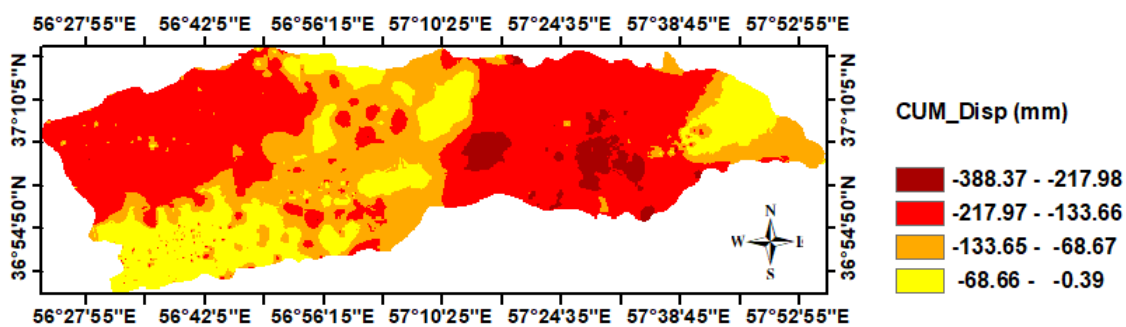
شکل ۲. نمودار گردش مراحل روش PSInSAR

است. بنابراین در این تحقیق برای رسیدن به نقشه پیوسته فرونشست در کل منطقه مورد مطالعه درون‌یابی کریجینگ بین نقاط پراکنش‌گر انجام و دو نقشه فرونشست تجمعی و نقشه میانگین نرخ سالانه فرونشست تهیه شد. مقادیر نرخ فرونشست سالانه در منطقه مطالعه شده، بین ۶۷ تا ۰/۰۷ میلی‌متر برآورد شد (شکل ۳). حداکثر مقدار فرونشست تجمعی دشت اسفراین در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ در این پژوهش، به حدود ۳۹ سانتی‌متر رسید (شکل ۴).

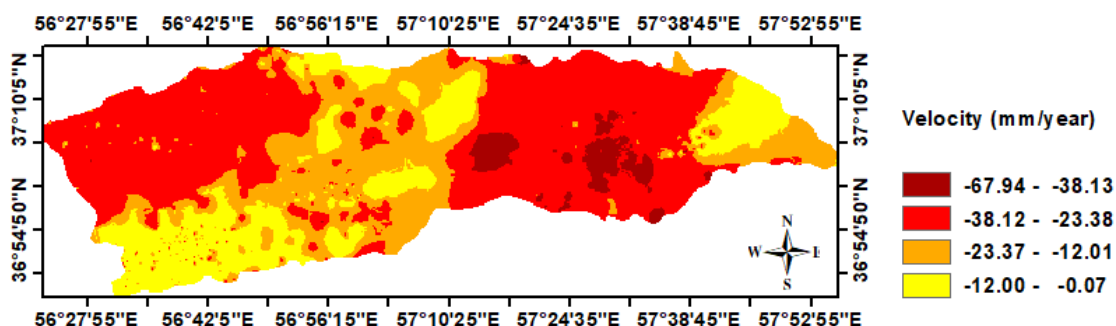
## ۵. نتایج تحقیق

به منظور بررسی جابه‌جایی‌های زمین در اسفراین، جابه‌جایی با ۲۴ تصویر Sentinel-A از روش PSInSAR تهیه شد. با در نظر گرفتن مقدار شاخص پراکندگی دامنه، ۰/۲ و مقدار همبستگی زمانی ۰/۸، پراکنش‌گرهای دائمی انتخاب و حداکثر مقادیر نرخ جابه‌جایی سالانه<sup>۱</sup> و مقادیر تجمعی فرونشست<sup>۲</sup> این نقاط در منطقه مورد مطالعه با نرم‌افزار Sarproz محاسبه شد. نتایج این روش گسسته

1. Velocity  
2. Cumulative Displacement



شکل ۳. مقادیر تجمعی فرونشست منطقه مطالعه‌شده در بازه ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰



شکل ۴. میانگین نرخ سالانه فرونشست در اسفراین

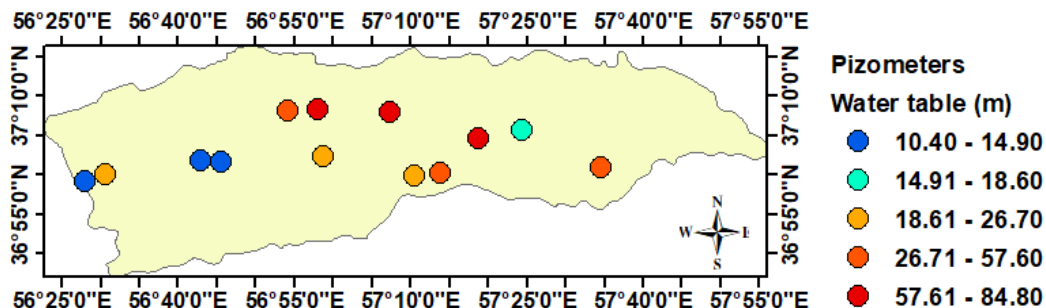
زمانی باید بیشتر از یک سال برای بررسی رابطه فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته شود. برای بررسی رابطه تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست، در این پژوهش تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ و مقدار فرونشست در چند نمونه از چاه‌های پیژومتری منطقه اسفراین بررسی شد. همان‌طور که در نمودارها مشخص است با افزایش فاصله سطح آب زیرزمینی تا سطح زمین (کاهش آب زیرزمینی)، مقدار فرونشست در منطقه مورد مطالعه افزایش یافته است. موقعیت این پیژومترها به همراه کلاس‌بندی مقدار ارتفاع سطح آب تا سطح زمین<sup>۱</sup> و نقشه فرونشست تجمعی در منطقه مورد مطالعه در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است چاه‌ها با ارتفاع سطح آب تا سطح زمین در مناطق با فرونشست بیشتر واقع شده‌اند. در چاه پیژومتری منطقه اسماعیل‌آباد به ازای ۱ متر کاهش سطح آب زیرزمینی ۶۲ میلی‌متر فرونشست در حوزه این چاه رخ داده است. ضریب همبستگی بین روند

در سال‌های گذشته بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و افت سطح پیژومتری، سبب تغییر ماهیت آبخوان از حالت تحت فشار به حالت آزاد شده است. هر آبخوانی به سهولت قابل احیا نیست، آبخوان‌ها دو دوره زندگی دارند، دوره اول الاستیک که در طی آن اگر آبی برداشت شود زمین نشست می‌کند و اگر آب تزریق شود، از فرونشست جلوگیری می‌شود و اما اگر استخراج آب زیرزمینی از حدی بیشتر شود، آبخوان قابلیت ذخیره و احیا را از دست می‌دهد. که طی مطالعات فرونشست در دو دهه گذشته نشان داده است که بیشتر آبخوان‌ها دچار رژیم برگشت‌ناپذیر شده‌اند. بنابراین تنها راه برای جلوگیری از فرونشست، جلوگیری از برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و بستن چاه‌های غیر مجاز است. به ازای افت سطح آب زیرزمینی در یک چاه، ممکن است فرونشست با تأخیر زمانی اتفاق بیفتد و دقیقاً هم‌زمان با افت آب، فرونشست مشاهده نشود که البته در این مسئله جنس خاک منطقه در رخداد فرونشست تأثیرگذار است. نوسانات سطح آب در ماه‌های مختلف به دلیل برداشت‌ها و بارندگی نیز در این همبستگی تأثیرگذار است، بنابراین بازه

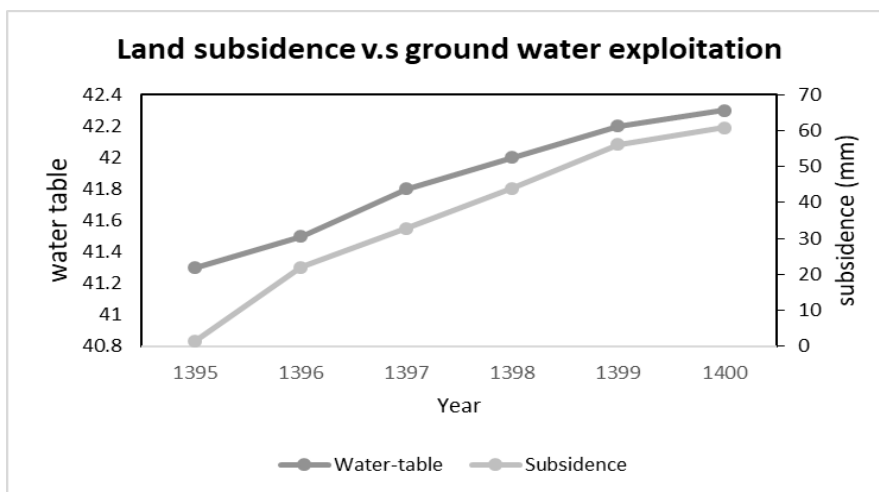
1. Water table

تغییرات فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی ۰/۹۹ محاسبه شد (شکل ۶). همچنین، در چاه پیزومتری منطقه قاسم‌آباد به ازای ۲ متر کاهش سطح آب زیرزمینی ۲۳۵ میلی‌متر فرونشست در حوزه این چاه رخ داده است. ضریب همبستگی پیرسون بین روند تغییرات فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی ۰/۹۹ محاسبه شد (شکل ۷).

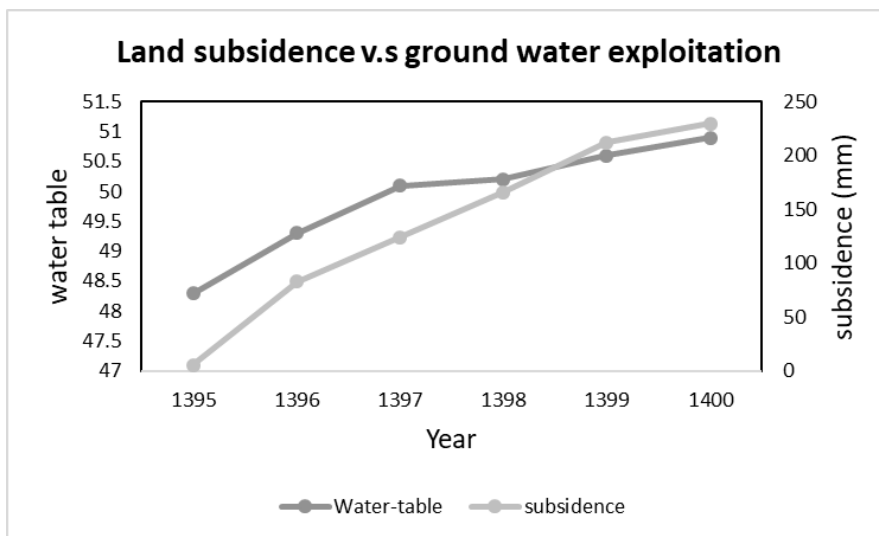
تغییرات فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی ۰/۹۹ محاسبه شد (شکل ۶). همچنین، در چاه پیزومتری منطقه قاسم‌آباد به ازای ۲ متر کاهش سطح آب زیرزمینی ۲۳۵ میلی‌متر فرونشست در حوزه این چاه رخ داده است. ضریب همبستگی پیرسون بین روند تغییرات فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی ۰/۹۹ محاسبه شد (شکل ۷).



شکل ۵. موقعیت پیزومترها در منطقه مورد مطالعه



شکل ۶. فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در چاه پیزومتری منطقه اسماعیل‌آباد

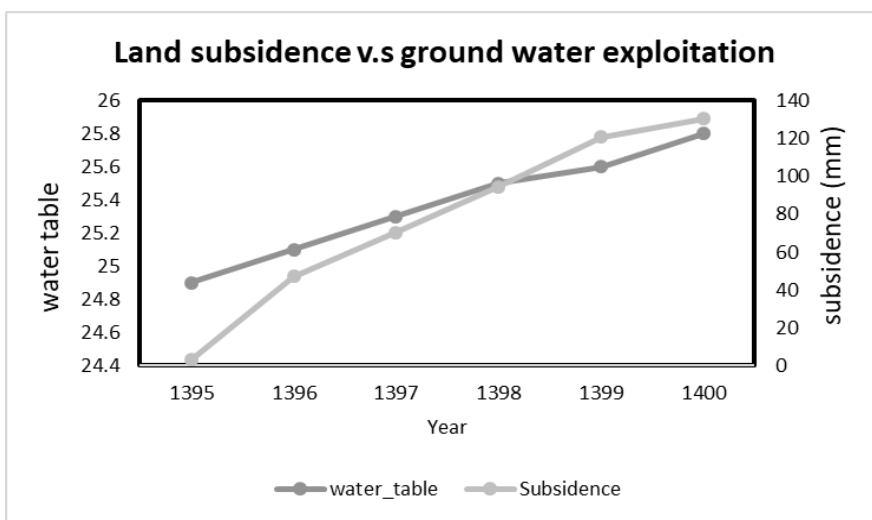


شکل ۷. فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در چاه پیزومتری منطقه قاسم‌آباد

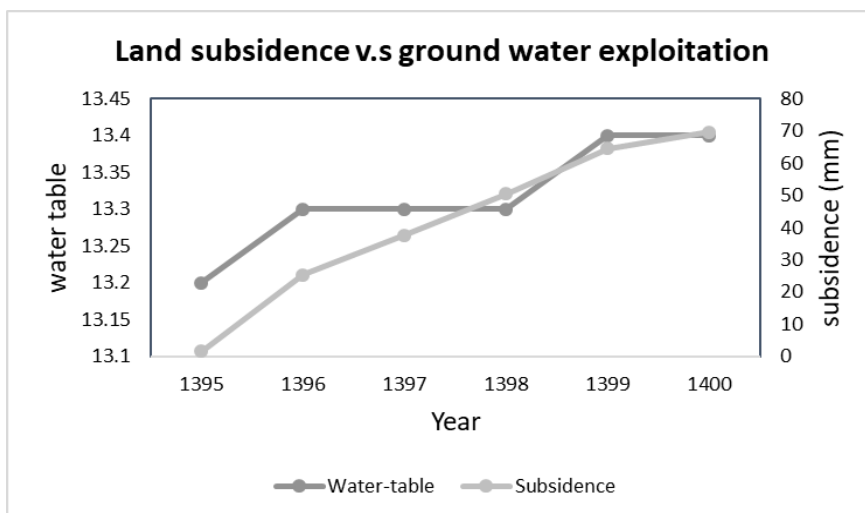


در چاه پیژومتری منطقه بین ایزی و فرتان به ازای ۴ متر کاهش سطح آب زیرزمینی ۱۷۰ میلی‌متر فرونشست در حوضه این چاه رخ داده است. ضریب همبستگی پیرسون بین روند تغییرات فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی ۰/۹۸ محاسبه شد (شکل ۱۰). همچنین، در چاه پیژومتری منطقه شمال عباس‌آباد به ازای ۲ متر کاهش سطح آب زیرزمینی ۱۸۳ میلی‌متر فرونشست در حوضه این چاه رخ داده است. ضریب همبستگی پیرسون بین روند تغییرات فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی ۰/۹۷ محاسبه شد (شکل ۱۱).

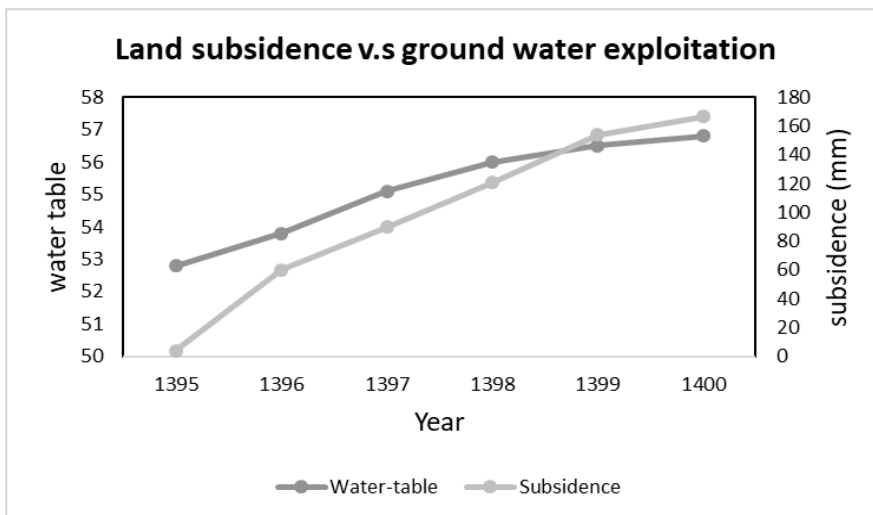
در چاه پیژومتری منطقه امامزاده عبدالله به ازای ۰/۹ متر کاهش سطح آب زیرزمینی ۱۳۳ میلی‌متر فرونشست در حوضه این چاه رخ داده است. ضریب همبستگی پیرسون بین روند تغییرات فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی ۰/۹۸ محاسبه شد (شکل ۸). همچنین، در چاه پیژومتری منطقه امامزاده کوران به ازای ۰/۱ متر کاهش سطح آب زیرزمینی ۷۱ میلی‌متر فرونشست در حوضه این چاه رخ داده است. ضریب همبستگی پیرسون بین روند تغییرات فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی ۰/۹۴ محاسبه شد (شکل ۹).



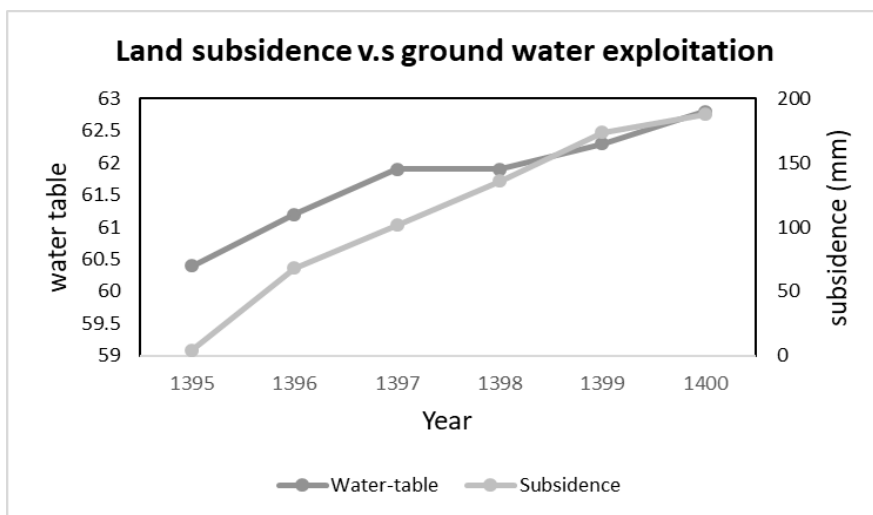
شکل ۸. فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در چاه پیژومتری منطقه امامزاده عبدالله



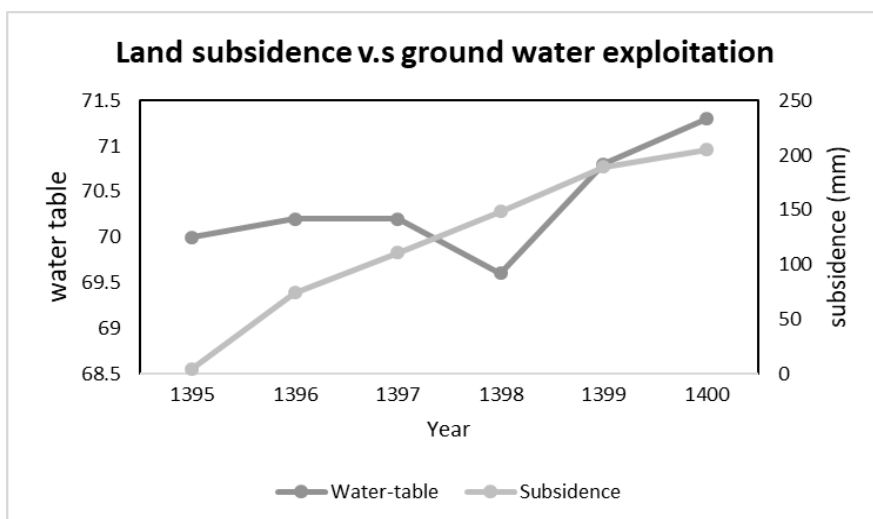
شکل ۹. فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در چاه پیژومتری منطقه امامزاده کوران



شکل ۱۰. فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در چاه پیژومتری منطقه ایزی و فرتان



شکل ۱۱. فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در چاه پیژومتری منطقه شمال عباس آباد



شکل ۱۲. فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی در چاه پیژومتری منطقه شمال اجغان

یکدیگر دارند. به طور کلی، نشست‌های موجود در دشت اسفراین، ناشی از برداشت بی‌رویه منابع زیرزمینی و کاهش سطح ایستابی است. برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی را نیز می‌توان نتیجه نبود مدیریت صحیح منابع آب در بخش برداشت و از سوی دیگر، به هدر رفتن حجم عظیمی از آب در نتیجه نادرست بودن شیوه‌های کشاورزی و مصارف صنعتی یا به طور خلاصه مصرف نامتناسب دانست. به عنوان راهکار درازمدت بر مبنای تجربه سایر کشورها، چاره‌ای جز اصلاح روش‌های مدیریت منابع آب وجود ندارد. پیشنهاد می‌شود برای پی بردن به دلایل رخداد فرونشست از نقشه زمین‌شناسی با مقیاس بالاتر و اطلاعات مربوط به کانی‌شناسی و دانه‌بندی خاک منطقه استفاده و همچنین، تأثیر عوامل دیگر مثل گسل و شیب، ارتفاع منطقه و... هم‌زمان بررسی شوند.

#### تقدیر و تشکر

تحقیق «بررسی پدیده فرونشست در سطح آبخوان‌های استان و پیش‌بینی امکان فرونشست قبل از وقوع با توجه به برداشت منابع آب و ضرورت ارائه راهکارهای پیشگیرانه» با حمایت مادی و معنوی شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان شمالی تحت طرح پژوهشی به شماره قرارداد ۱۵۱۷۶/۱۵۲۲/۴۴ مورخ ۱۴۰۰/۱۲/۲۵ و دانشگاه بیرجند به عنوان سازمان مجری انجام گرفته است و به این وسیله از حمایت و همکاری این مجموعه تشکر و قدردانی می‌شود.

#### منابع

- [1]. Zarei K, Rasoulzadeh A, Seddighi M, Ahmadzadeh G, Ramezani J. Determination of the relationship between land subsidence and ground water level loss with radar interferometry and GPS station methods (Case study: Salmas Plain). *Irrigation and Water Engineering*, 2020;11(1):168-82. [Persian].
- [2]. Rahmani G, Chitsazan M, Ghafouri H. Predicting water level drawdown and assessment of land subsidence in Damaneh-Daran Aquifer by combining numerical and analytical models. *Advanced Applied Geology*, 2022; 12(2): 259-275. [Persian].
- [3]. Tamburini A, Bianchi M, Giannico C, Novali F. Retrieving surface deformation by PSInSAR™ technology: A powerful tool in reservoir monitoring. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2010;4(6):928-37.

در چاه پیژومتری منطقه شمال اجقان به ازای ۱ متر کاهش سطح آب زیرزمینی ۲۰۰ میلی‌متر فرونشست در حوضه این چاه رخ داده است. ضریب همبستگی پیرسون بین روند تغییرات فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی ۰/۶۱ محاسبه شد (شکل ۱۲).

همان‌طور که در نمودارها مشخص است، در سال ۱۳۹۸ سطح آب زیرزمینی افزایش یافته اما همچنان در این منطقه فرونشست در حال افزایش است که این می‌تواند نشان‌دهنده برگشت‌پذیر نبودن منطقه نسبت به فرونشست باشد. به بیان دیگر، حتی با احیای مجدد منابع آب زیرزمینی در این مناطق نمی‌توان شاهد بهبود وضعیت فرونشست بود. در این موارد باید دانه‌شناسی خاک و کانی‌شناسی انجام شود. به طور مثال، در صورتی که خاک منطقه از نظر کانی‌شناسی، رس باشد، این رس فعال است. بنابراین در صورت برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی خاک متراکم شده و قابلیت جذب آب را نخواهد داشت و فرونشست رخ می‌دهد. در صورتی که از نظر دانه‌بندی، منطقه از رس باشد، این رس غیرفعال است و نسبت به خاک رس فعال، قابلیت جذب آب بیشتری دارد.

#### ۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق وضعیت تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست در منطقه اسفراین با روش تداخل‌سنجی راداری PSInSAR مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از روش تداخل‌سنجی راداری در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ نشان داد مقادیر فرونشست زمین در سرتاسر دشت اسفراین در محدوده ۰/۰۷ تا ۶۷ میلی‌متر متغیر است. همچنین بررسی همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی نشان داد در چاه‌های پیژومتری منطقه مورد مطالعه به ازای ۱ تا ۴ متر کاهش سطح آب زیرزمینی، فرونشست در حوضه چاه‌های این منطقه در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر رخ داده است. در این تحقیق جهت بررسی رابطه تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست، تغییرات سطح آب زیرزمینی و مقدار تجمعی فرونشست در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ در چند نمونه از چاه‌های پیژومتری منطقه اسفراین بررسی شد. نتایج نشان داد با برداشت بی‌رویه از منابع زیرزمینی و کاهش ارتفاع آب در این منطقه فرونشست افزایش می‌یابد و این دو پارامتر در منطقه مورد مطالعه همبستگی بالایی با

- [4].Rucci A, Ferretti A, Guarnieri AM, Rocca F. Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements. *Remote Sensing of Environment*. 2012;120:156-63.
- [5].Khorrami M, Alizadeh B, Ghasemi Tousi E, Shakerian M, Maghsoudi Y, Rahgozar P. How groundwater level fluctuations and geotechnical properties lead to asymmetric subsidence: A PSInSAR analysis of land deformation over a transit corridor in the Los Angeles metropolitan area. *Remote Sensing*. 2019;11(4):377.
- [6].Biswas K, Chakravarty D, Mitra P, Misra A. Spatial Correlation Based Psinsar Technique to Estimate Ground Deformation in las Vegas Region, Us. In: *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2018* (pp. 2251-2254). IEEE.
- [7].Chang CP, Yen JY, Hooper A, Chou FM, Chen YA, Hou CS, Hung WC, Lin MS. Monitoring of Surface Deformation in Northern Taiwan Using DInSAR and PSInSAR Techniques. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*. 2010;21(3).
- [8].Xiong S, Wang C, Qin X, Zhang B, Li Q. Time-series analysis on persistent scatter-interferometric synthetic aperture radar (PS-InSAR) derived displacements of the Hong Kong–Zhuhai–Macao bridge (HZMB) from Sentinel-1A observations. *Remote Sensing*. 2021;13(4):546
- [9].Malik K, Kumar D, Perissin D, Pradhan B. Estimation of ground subsidence of New Delhi, India using PS-InSAR technique and Multi-sensor Radar data. *Advances in Space Research*. 2022;69(4):1863-82.
- [10].Wang H, Mao J, Zhao S, Ning X, Wu Q. PS-InSAR based surface subsidence analysis in Changchun metropolitan area. In: *E3S Web of Conferences 2021* (Vol. 290, p. 02006). EDP Sciences.
- [11].Liu G, Jia H, Zhang R, Cen M, Zhang T. Subsidence detection by PSInSAR based on high resolution TerraSAR-X images. *Progress In Electromagnetics Research*. 2010;11.
- [12].Jo MJ, Won JS, Kim SW. A time-series observation of ground subsidence at Ulsan area using SAR interferometry. In: *2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR) 2011 Sep 26* (pp. 1-3). IEEE.
- [13].Békési E, Fokker PA, Martins JE, Limberger J, Bonté D, Van Wees JD. Production-induced subsidence at the Los Humeros geothermal field inferred from PS-InSAR. *geofluids*. 2019;2019.
- [14].Kim JS, Kim DJ, Kim SW, Won JS, Moon WM. Monitoring of urban land surface subsidence using PSInSAR. *Geosciences Journal*. 2007;11(1):59.
- [15].Sun H, Zhang Q, Zhao C, Yang C, Sun Q, Chen W. Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohu plain, China with a multi-track PS-InSAR technique. *Remote sensing of environment*. 2017;188:73-84.
- [16].Solari L, Ciampalini A, Raspini F, Bianchini S, Moretti S. PSInSAR analysis in the Pisa urban area (Italy): A case study of subsidence related to stratigraphical factors and urbanization. *Remote Sensing*. 2016;8(2):120.
- [17].Chen B, Gong H, Chen Y, Li X, Zhou C, Lei K, Zhu L, Duan L, Zhao X. Land subsidence and its relation with groundwater aquifers in Beijing Plain of China. *Science of the Total Environment*. 2020;735:139111.
- [18].Chen CH, Wang CH, Hsu YJ, Yu SB, Kuo LC. Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan, Taiwan. *Engineering Geology*. 2010;115(1-2):122-31.
- [19].Firdaus HS, Prasetyo Y, Diyanah D. Spatial Correlation Analysis of Land Subsidence and The Water Table Changes in Unconfined Aquifers Using Sentinel 1-SAR Image and Geographic Information Systems (Case Study: Semarang City–Indonesia). In: *E3S Web of Conferences 2018* (Vol. 73, p. 03022). EDP Sciences.
- [20].Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2001;39(1):8-20.
- [21].Oštir K, Komac M. PSInSAR and DInSAR methodology comparison and their applicability in the field of surface deformations-A case of NW Slovenia. *Geologija*. 2007;50(1):77-96.
- [22].Hanssen RF. *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*. Springer Science & Business Media; 2001.