

بیشترین نشست در زمین‌های کشاورزی رخ داده که علت اصلی آن برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی به دلیل توسعه سریع مزارع و شالیزارهاست. راهکارهای مدیریتی شامل کنترل برداشت آب، اصلاح الگوی کشت و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین آبیاری، مؤثرترین رویکرد برای کاهش این پدیده در منطقه مورد مطالعه محسوب می‌شود.

واژگان کلیدی: تداخل سنجی راداری، حوزه آبخیز برنجستانک، فرونشست، ستینیل یک.

## مقدمه

فرونشست زمین به‌عنوان یکی از مخاطرات مهم محیطی و زمین‌شناسی، بسیاری از کشورهای جهان [۱۸] از جمله ایران را تحت تأثیر قرار داده است. این پدیده در سال‌های اخیر به یکی از چالش‌های اصلی در حوضه مدیریت منابع طبیعی و توسعه پایدار تبدیل شده است [۳۴]. بر اساس مطالعات انجام‌شده، فرونشست زمین در مناطق مختلف کشور تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل متنوع از جمله شرایط زمین‌شناسی، برداشت بیش‌ازحد آب‌های زیرزمینی، تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی توسعه‌یافته است [۱]. این پدیده با ایجاد تغییرات تدریجی در ارتفاع سطح زمین، اثرات گسترده‌ای بر زیرساخت‌های شهری، زمین‌های کشاورزی، تأسیسات صنعتی و محیط‌زیست برجای می‌گذارد [۲۵]. این پدیده نشان‌دهنده فرورفتگی سطح زمین بر اثر فعالیت‌های انسانی نظیر برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و معدنکاری و عوامل گوناگون طبیعی مانند تکنیک، کاربری اراضی و فرآیند انحلال است. استفاده بی‌رویه از آب در مصارف کشاورزی و صنعتی در نتیجه رشد روزافزون جمعیت به ایجاد اثرات نامطلوب کمی و کیفی در منابع آب منجر شده است [۱۵]. هم‌چنین این پدیده می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیر مالی و جانی به دنبال داشته و به بسیاری از سازه‌های سطحی و زیرسطحی در مناطق مختلف شهری و روستایی و حومه، آسیب برساند [۶]. در ایران آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب در بسیاری از مناطق است، به‌علاوه روش‌های قدیمی و نادرست کشاورزی نیاز به منابع آب را بیش‌تر کرده که این موضوع منجر به بهره‌برداری بیش‌ازحد، از منابع آب زیرزمینی و در نتیجه نشست سطح آب می‌شود. افزایش تنش و فشار، منجر به فشردگی و در نتیجه فرونشست زمین می‌شود [۱۶]. شناخت گستره فضایی و اندازه‌گیری هر چه دقیق‌تر میزان

## ارزیابی میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری داده‌های ماهواره‌ای ستینیل یک مطالعه موردی: حوزه آبخیز برنجستانک استان مازندران

سید اسدالله حجازی<sup>۱</sup> سبیکه روحانی زاده<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۶/۰۸ تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۹/۱۹

DOI: / 10.22034/WMJ.2025.2069425.1126

## چکیده

فرونشست زمین یکی از مهم‌ترین مخاطرات زمین‌ریخت‌شناسی در حوزه‌های آبخیز است و ارتباط مستقیمی با بهره‌برداری ناپایدار از منابع آب زیرزمینی دارد. این پدیده در اثر کاهش حجم آبخوان‌ها و تراکم لایه‌های رسوبی موجب تغییر شکل و عملکرد طبیعی حوضه شده و پیامدهایی چون افت سطح زمین، تخریب زیرساخت‌های کشاورزی و عمرانی، کاهش نفوذپذیری خاک، افزایش رواناب سطحی و تشدید خطر سیلاب را به دنبال دارد. از این رو پیش‌نرخ فرونشست و بررسی عوامل مؤثر برای کنترل و مدیریت خطر ضروری است. این پژوهش به بررسی فرونشست در استان مازندران با تأکید بر حوزه آبخیز برنجستانک طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ با روش تداخل‌سنجی راداری پرداخته است. داده‌های ماهواره‌ای ستینیل یک در دو بازه زمانی مختلف با استفاده از نرم‌افزار SNAP پردازش و ایتروفرگرام‌ها برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین ایجاد شد. در کنار داده‌های راداری، نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، کاربری اراضی، داده‌های چشمه‌ها و مشاهدات میدانی جهت تبیین علل فرونشست به کار گرفته شد. نتایج نشان داد الگوی فرونشست حداکثر ۱۰ میلی‌متر در سال و روند آن شرقی-غربی و شمالی-جنوبی بوده و بیشینه آن در بخش‌های مرکزی، غربی و جنوبی مشاهده شد. وجود سازند شمشک و لایه‌های زغال‌دار در جنوب حوضه از عوامل مؤثر در افزایش نرخ فرونشست می‌باشد. هم‌چنین هم‌نهادسازی نقشه‌های فرونشست با کاربری اراضی نشان داد

۱ - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲ - دانشجوی دکتری رشته ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
Email: sabikeruhani@gmail.com

فرونشست، اولین گام در جهت مطالعه این پدیده دانسته می‌شود؛ بنابراین با شناخت مشخصات مکانی و رفتار زمانی این پدیده، مدل منطقه‌ای آن ارائه و توسعه داده و از این طریق راهکارهایی عملی و اساسی در راستای کاهش خسارات مرتبط با آن و جلوگیری از روند آتی اتخاذ می‌شود [۲۱].

از اوایل دهه ۱۹۹۰ با عملیاتی شدن ماهواره‌های راداری، تداخل‌سنجی راداری نیز به‌صورت گسترده مورد استفاده متخصصان علوم زمین قرار گرفت که با توجه به اهمیت موضوع فرونشست محققین زیادی در داخل و خارج از کشور در این مورد به تحقیق پرداختند. در طی مطالعات صورت گرفته روش‌های متفاوتی برای محاسبه میزان فرونشست زمین وجود دارد که در بین این روش‌های متنوع و گوناگون تداخل‌سنجی داده‌های راداری (Insar) به‌عنوان بهترین روش اندازه‌گیری پیوسته این تغییرات مطرح شده است [۱۰]. گاوا و همکاران [۱۲] با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به مطالعه دشت پکن اقدام کردند که به دنبال آن، علت اصلی فرونشست، استفاده از آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی بیان شد. ابراهیمی و همکاران [۷] به پایش میزان فرونشست محدوده شهری دشت پاکدشت با روش تداخل‌سنجی پرداختند که در نتیجه، مهم‌ترین و مؤثرترین عامل در فرونشست را افت سطح آب‌های زیرزمینی دانستند. آروین و همکاران [۳] فرونشست حوزه آبخیز میناب در جنوب کشور را با استفاده از داده‌های راداری سنتینل یک و روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری مورد بررسی قرار دادند که طی آن، برداشت بی‌رویه از چاه‌های عمیق باعث عدم تعادل آبخوان منطقه و پایین رفتن سطح آب زیرزمینی شده است. سیان<sup>۲</sup> و همکاران [۴] با استفاده از تداخل‌سنجی پراکندگی دائمی و تصاویر سنتینل یک، فرونشست زمین را در مناطق ساحلی آفریقا بررسی کردند. چین‌هو<sup>۳</sup> و همکاران به بررسی فرونشست زمین در پکن و ارتباط آن با گسل‌های زمین‌شناسی توسط تصاویر سنتینل یک پرداختند. بررسی‌ها نشان داد که به علت استخراج زیاد آب‌های زیرزمینی، حداکثر فرونشست زمین در شرق پکن رخ داده و بعد از دو سال به بیش از ۱۱ سانتی‌متر رسیده است. نشست زمین در پکن به‌طور عمده ناشی از استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی است و از بین رفتن سفره‌های آب زیرزمینی موجب تحریک گسل‌های فعال خواهد شد [۶]. جین<sup>۴</sup> و همکاران [۱۶] به بررسی نقش فعالیت‌های کشاورزی در فرونشست زمین در دره سان‌خوآکین در کالیفرنیا پرداخته‌اند که پس از بررسی‌های لازم خشک‌سالی‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۲ موجب افزایش شدید استفاده از آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه و در نتیجه باعث فرونشست گردیده است. این یافته‌ها نشان داد در مناطقی که تقاضای استفاده از آب زیرزمینی بیش‌تر باشد فرونشست زمین هم در منطقه زیاد می‌باشد. گورابی

1. Gao
2. Cian
3. Heyinhu
4. Jeanne

و همکاران [۱۴] در بررسی فرونشست زمین در اصفهان با تصاویر سنتینل یک میزان فرونشست زمین را پنج تا ۱۰۰ میلی‌متر در سال برآورد کردند که حداکثر فرونشست مربوط به بخش‌های شمالی و شمال شرقی و شرقی اصفهان بوده، در حالی که بخش‌های جنوبی شهر تقریباً پایدار هستند. روحی و همکاران [۳۰] میزان فرونشست زمین و تغییرات رطوبت و شوری خاک را با استفاده از تصاویر سنتینل یک و نرم‌افزار SNAP ارزیابی کردند که نتیجه نشان داد افزایش فرونشست زمین باعث افزایش سطح شوری خاک و شدت آن شده است که در نتیجه کاهش رطوبت در اعماق مختلف در سال‌های اخیر مشاهده شد. ال‌کمالی و همکاران [۹]، تحلیل مکانی فرونشست زمین را در منطقه ریماه، امارات متحده عربی بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده آن است که سرعت فرونشست در این محدوده ۴۰ میلی‌متر در سال است که به علت افت ۱۲ متری سطح آب‌های زیرزمینی رخ داده است. صدری کیا و همکاران [۳۲] در پژوهشی با عنوان ارزیابی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تداخل‌سنجی راداری و تحلیل‌های مکانی در دشت شبستر با روش تحلیل سلسله مراتبی وزن‌دهی معیارهای مؤثر بر فرونشست انجام شده و حساسیت به فرونشست، با استفاده از تحلیل‌های مکانی مدل‌سازی شده است. بر این اساس دشت شبستر به پنج منطقه با احتمال وقوع فرونشست «خیلی زیاد» ۳ درصد، «زیاد» ۲۰ درصد، «متوسط» ۲۵ درصد، «کم» ۳۳ درصد و «خیلی کم» ۱۹ درصد مساحت کل دشت، طبقه‌بندی شد. برای صحت‌سنجی مدل پیش‌بینی فرونشست، از نقشه جابه‌جایی به‌دست‌آمده از تداخل‌سنجی راداری استفاده شد. با توجه به سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد ۸۶ درصد، صحت خوب پیش‌بینی مدل تأیید شد. هم‌چنین مدل پیشنهادی، با انجام تحلیل حساسیت نسبت به معیارهای با بیش‌ترین اهمیت، مورد ارزیابی قرار گرفته و اهمیت بالای آن‌ها در ایجاد فرونشست در منطقه، مورد تأیید قرار گرفت [۳۲].

پژوهش‌های فوق‌الغلب مسئله فرونشست را بیش‌تر با یک دیدگاه و آن‌هم برداشت بی‌رویه منابع آبی بررسی کرده‌اند در حالی که پژوهش حاضر درصدد است تا عوامل مختلف و متفاوت مؤثر دیگر را در امر فرونشست تحلیل و ارتباط احتمالی این عوامل را بررسی کند. ضرورت انجام این پژوهش از آنجا ناشی می‌شود که در سال‌های اخیر پدیده فرونشست زمین در استان مازندران، هم‌راستا با روند فزاینده آن در سایر استان‌های کشور، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نمودهای بحران بهره‌برداری ناپایدار از منابع آب زیرزمینی شناخته شده و هشدار جدی برای سامانه‌های محیط‌زیستی، زیرساخت‌های عمرانی و پایداری اکولوژیکی محسوب می‌شود [۱۱]. تداوم این روند می‌تواند موجب تغییرات برگشت‌ناپذیر در ساختار ژئومورفولوژیکی حوزه‌های آبخیز، افت کیفیت اراضی کشاورزی و کاهش امنیت زیست‌محیطی گردد؛ از این‌رو بررسی الگوی مکانی، نرخ و عوامل مؤثر بر فرونشست به‌منظور ارائه راهکارهای مدیریتی مبتنی بر داده‌های سنجش‌ازدور و تحلیل‌های زمین‌شناختی از اهمیت ویژه برخوردار است [۱۳].

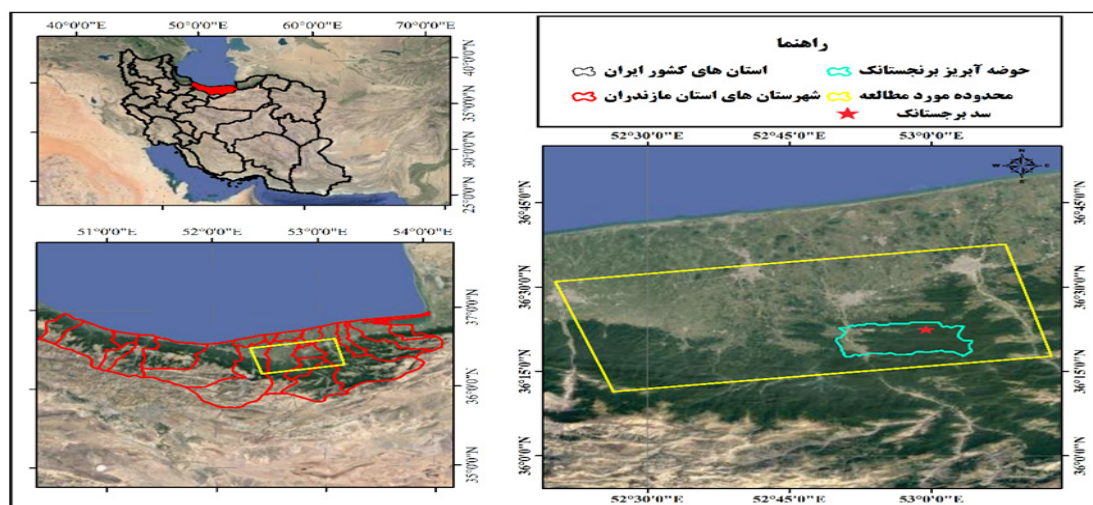
## مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز سد برنجستانک با مساحت تقریبی ۴۰ کیلومترمربع و اختلاف ارتفاع بین پایین‌ترین نقطه (۱۷۰ متر) و بالاترین (۷۵۰ متر) حدود ۵۸۰ متر می‌باشد. آبراهه اصلی حوضه مورد مطالعه رودخانه تجون یا آبتیجون بوده که در فاصله ۱۰ کیلومتری جنوب قائم‌شهر و شرق جاده قائم‌شهر شیرگاه فیروزکوه به رودخانه تالار ملحق می‌شود [۲۸]. جهت کشیدگی حوضه شرقی غربی بوده و طول حوزه آبخیز از محل سد تا منتهی‌الیه خط‌الرأس حدود ۱۲/۳ کیلومتر و عرض آن حداکثر دو کیلومتر هست. پوشش نباتی حوضه شامل جنگل انبوه و نیمه انبوه و اراضی کشاورزی و زراعی پراکنده است. متوسط دمای سالانه حوضه ۱۷ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالیانه حوضه ۹۰۵ میلی‌متر بوده و شیب حوضه شامل حداقل پنج درصد و حداکثر ۷۰ درصد می‌باشد. بررسی‌های زمین‌شناسی حاکی از آن است که حوضه مورد مطالعه، از نظر لیتولوژی در ردیف سنگ‌های رسی و مارنی هستند که از نظر تاب مقاومت فشاری و تک‌محوری در ردیف سنگ‌های ضعیف تا متوسط بوده و اثر آب‌های نافذ در آن‌ها در برخورد با این لایه‌های نفوذناپذیر به صورت زمین لغزی و به مرور زمان، فرونشست متظاهر می‌گردد [۲۲]. با توجه به نقشه زمین‌شناسی حوضه و طبقه‌بندی سنگ‌ها در حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد که ماسه‌سنگ و سنگ آهک ماسه‌ای و حساسیت متوسط تا زیاد نسبت به فرسایش دارند، یعنی نسبت به سازندهای دیگر فرسایش‌پذیرتر می‌باشند. هم‌چنین وجود رسوبات مارن و راه‌های مارنی موجود در حوضه نیز به علت رطوبت زیاد حوضه مورد مطالعه باعث ایجاد حرکت‌های توده‌ای به شکل لغزش و سولی فلوکسیون می‌شوند و به این ترتیب که رسوبات لس و رس و سیلت و مارن موجود در حوضه، در دامنه‌های شمالی به دلیل اینکه مدت کم‌تری از نور خورشید بهره می‌گیرند دمای پایین‌تری دارند که این پدیده

باعث کاهش تبخیر و افزایش رطوبت خاک می‌گردد، بنابراین آب به تدریج در زمین نفوذ کرده و موجب آبیگری مارن و رس و رسیدن به حد خمیری و سیلان و افزایش نیروی ثقل و حرکت بر روی دامنه خواهد شد. ضمناً از آنجایی که حوضه مورد مطالعه و حتی تا شعاع نسبتاً زیادی خارج از این محدوده، زیرپوشش جنگلی قرار گرفته و این پوشش سبب شده که سازندها و سنگ‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها جز در موارد کم، رخنمون پیدا نکنند، بنابراین بررسی دقیق چینه‌شناسی آن، جز به کمک حفاری‌های متعدد امکان‌پذیر نیست. در حوضه مورد مطالعه، حساس‌ترین سازندها در مقابل لغزش سازند باکو، آغچه گیل و آبشرون است [۲۹]. سنگ‌های تشکیل‌دهنده سازند باکو در حوضه مورد مطالعه از نظر درجه سختی بسیار کم سخت شده یا سخت نشده که بنا به ماهیت سنگ‌شناسی آن‌ها معمولاً به آسانی تحت تأثیر فرسایش قرار می‌گیرند و چون لایه‌های بالا تناوبی از رسوبات نفوذناپذیر و کم نفوذپذیر هستند، بنابراین با توجه به میزان بارندگی‌های نسبتاً زیاد ناحیه یا تجمع آب در لایه‌های نفوذناپذیر استعداد لغزش و نشست لایه‌های دیگر را زیاد می‌نماید به خصوص وقتی که لایه‌ها از نظر مورفولوژی دارای شیب توپوگرافی تندتر نیز باشند.

سازند آغچه گیل و آبشرون نیز اهمیت حضورشان در حوضه کم‌تر از سازند باکو بوده و اهمیت آن‌ها عمدتاً از نقطه نظر دخالت در ساختمان کلی منطقه هست، هم‌چنین قابل ذکر است که مهم‌ترین گسل‌های اصلی در حوضه، گسل خزر و گسل البرز و نیز سه گسل فرعی تجون، توجی و بشل می‌باشند [۲۹]. طی مطالعاتی که بر روی توده لغزشی صورت گرفت، دو توده لغزشی در حوضه مورد نظر شناسایی گردیده که این دو توده لغزشی از نوع چرخشی در فاصله ۱۰۰ متری سد زمزم بوده که در بخش شمالی دریاچه سد قراردادند. مساحت توده اولی شش هزار مترمربع بوده که با حرکت در جهت شیب، حجم زیادی از خاک‌های مارنی را به داخل آبراهه منتقل



شکل ۱: موقعیت حوزه آبخیز برنجستانک در استان و کشور

می‌کند. با هر بارندگی مقادیر زیادی از این خاک‌ها شسته شده و توسط آبراهه‌ها به رودخانه اصلی آبتیجون حمل می‌گردد [۱۷]. طی این عمل، حرکت این توده مجدداً تکرار شده و به سمت آبراهه می‌لغزد. توده دوم به مساحت ۴۰۰۰ مترمربع هست که در نزدیکی محل سد مزم قرار گرفته و این توده لغزشی دارای حجم زیادی است که حجم آن در حدود ۳۰ هزار مترمکعب و توده اول دارای حجمی در حدود ۵۵ هزار مترمکعب می‌باشد. عمل حرکت توده دوم به خاطر برداشت بی‌رویه خاک‌هایی است که در قسمت پایین دامنه قرار گرفته است (باید متذکر شد که از خاکه‌ای برداشت شده جهت ساخت هسته سد، استفاده به‌عمل آمده است، بدون اینکه به معضل حرکت این توده‌ها توجه شود و با توجه به این مورد باید اظهار داشت که در صورت آگیری سد در زمان بهره‌برداری، قسمت اعظمی از این توده به زیرآب رفته و حرکت مجدد توده را تشدید می‌نماید) [۲۹]. با این عمل شیب طبیعی آن توده تغییر کرده و شیب ناپایدار به وجود آمده که سبب حرکت توده لغزشی تحت تأثیر نیروی ثقل و شیب گردیده و به تبع آن، تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب رودخانه‌ها و آبراهه‌ها و سازه‌های انتقال آب، اختلال در بهره‌برداری از آب چشمه‌ها و در نتیجه از بین رفتن یا کاهش تخلخل مفید خاک و کاهش نفوذپذیری سطحی، یکی از دلایل ایجاد نشست زمین است [۲۹]. سد مزم سدی از نوع خاکی با هسته رسی واقع در قائم‌شهر، روستای برنجستانک می‌باشد. طول این سد ۲۴۹ متر، عرض آن ۱۰ متر و ارتفاعش از کف پی ۳۲ متر بوده و حجم مخزن سه میلیون مترمکعب می‌باشد. این سد به‌منظور ذخیره‌سازی آب و استفاده از آن در مواقع کم‌آبی برای تأمین آب در ۱۱۲۰ هکتار از اراضی کشاورزی و شالیزارهای پایین‌دست سد، احداث گردیده و قابلیت تنظیم نه میلیون مترمکعب آب در سال را دارا می‌باشد [۲۲].

### داده‌های تحقیق

داده‌های موردنیاز به‌منظور برآورد نرخ فرونشست حداقل دو تصویر ماهواره سنتینل یک از منطقه مطالعه در تاریخ‌های متفاوت موردنیاز است که منبع تهیهی تصاویر ماهواره‌ای پایگاه <https://>

scihub.copernicus.eu است. در این پژوهش هدف انجام تداخل‌سنجی راداری و شناسایی پستی‌وبلندی‌ها، ناهمواری‌ها، شرایط توپوگرافی، میزان جابجایی و نهایتاً تهیه نقشه فرونشست می‌باشد. بدین منظور به کمک نرم‌افزار SNAP که در واقع نرم‌افزاری برای پردازش تصاویر - سنتینل یک می‌باشد [۲۷] فرونشست زمین در منطقه ارزیابی و تخمین زده شد. برای تعیین میزان فرونشست منطقه موردنظر از دو تصویر ماهواره سنتینل یک استفاده شد (جدول ۱).

- مطالعات اسنادی (بررسی پایان‌نامه‌ها و مقالات و گزارش طرح منطقه‌ای)
- داده‌های محیطی (نقشه‌های زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه کاربری اراضی و DEM سی متری).
- مطالعات میدانی
- ارزیابی میزان فرونشست منطقه مورد مطالعه با توجه به عوامل زمین‌شناسی، تکتونیک و کاربری اراضی

### روش تحقیق

روش تداخل‌سنجی راداری با سنتز دیافراگم (Interferometric Synthetic Aperture Radar - InSAR) یکی از مؤثرترین ابزارها برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت سانتی‌متری است. در این روش، با استفاده از دو یا چند تصویر راداری از یک منطقه، میزان جابه‌جایی سطح در بازه‌های زمانی مختلف استخراج می‌شود [۱۵]. (شکل ۲)

$$x, y = S_1(x, y) \times S_2^*(x, y)$$

معادله یک  
مراحل اجرای آن به ترتیب زیر است:

### گام ۱: دریافت داده‌ها

تصاویر راداری از ماهواره‌هایی مانند سنتینل یک، ALOS-۲ یا ENVISAT از سامانه‌ی Copernicus Open Access Hub یا ASF Distributed Active Archive Center دانلود می‌شوند. اطلاعات پایه شامل نوع مدار (ascending/descending)، قطبش

جدول ۱: مشخصات تصاویر سنتینل یک مورد استفاده در پردازش فرونشست حوزه آبخیز سد برنجستانک

منبع داده	حالت تصویر برداری	قطبش	نوع داده	فاصله زمانی (روز)	تاریخ Slave	تاریخ Master	جهت مداری	مسیر گذر	نوع سنجنده	ماهواره	زوج تصویر
Copernicus Open Access Hub	IW (Interferometric Wide Swath)	VV + VH	SLC (Single Look Complex)	۲۶۴	2014-12-01	2015-08-22	شمال غرب به جنوب شرق	Ascending	C-Band SAR	Sentinel-1A	زوج اول
Copernicus Open Access Hub	IW (Interferometric Wide Swath)	VV + VH	SLC (Single Look Complex)	۲۵۲	2020-12-09	2021-08-18	شمال غرب به جنوب شرق	Ascending	C-Band SAR	Sentinel-1A	زوج دوم

### گام ۲: پیش‌پردازش<sup>۱</sup>

در این مرحله تصحیحات هندسی و رادیومتریکی برای هر تصویر اعمال می‌شود تا خطاهای ناشی از مدار و زاویه دید حذف شوند [۳۶] که شامل مراحل زیر است:

Apply Orbit File (اصلاح مسیر پرواز بر اساس داده‌های دقیق مدار ماهواره)

Deburs (یکپارچه‌سازی burst های تصویری)

Calibration (کالیبراسیون شدت بازتاب‌ها به واحد dB)

### گام ۳: هم‌ترازسازی تصاویر<sup>۲</sup>

برای تشکیل تداخل‌نگار، تصاویر اصلی (Master) و ثانویه (Slave) باید کاملاً هم‌پوشان باشند. در SNAP یا GAMMA، با روش Cross-Correlation، نقاط زمینی به هم تطبیق داده می‌شوند تا اختلاف پیکسلی حذف گردد [۲].

### گام ۴: تشکیل تداخل‌نگار<sup>۳</sup> در این مرحله اختلاف فاز بین دو تصویر تولید می‌شود:

که در آن S1 و S2 سیگنال‌های بازتابی کمپلکس از دو زمان تصویربرداری هستند و علامت ستاره نشانگر مزدوج مختلط است. خروجی این گام نقشه‌ای از فاز اختلافی کل است که ترکیبی از مؤلفه‌های جابه‌جایی، توپوگرافی و اثرات اتمسفری است [۵].

### گام ۵: تصحیح اثرات اتمسفری<sup>۴</sup>

تغییرات فشار و رطوبت هوا موجب انحراف فاز می‌شود. تصحیح این اثرات با استفاده از مدل‌های اقلیمی (GACOS، ERA۵) یا فیلترهای همدوسی<sup>۵</sup> انجام می‌شود تا مؤلفه‌ی فاز ناشی از نوسانات جوی حذف گردد.

### گام ۶: فیلترگذاری فاز<sup>۶</sup>

برای کاهش نویز ناشی از پراکندگی‌های سطحی از فیلتر آداپتیو گلدستین (Goldstein Adaptive Filter) استفاده می‌شود. این فرآیند وضوح الگوی تداخل را افزایش و ارزش همدوسی پیکسل‌ها را پایدار می‌کند [۳۳].

### گام ۷: بازگشایی فاز<sup>۷</sup>

فاز تداخل‌نگار به صورت تناوبی در بازه‌ی  $2\pi$  ثبت می‌شود و باید

1. Pre processing
2. Co-registration
3. Interferogram Generation
4. Atmospheric Correction
5. Coherence-based filtering
6. Phase Filtering
7. Phase Unwrapping

### گام ۸: حذف مؤلفه‌های توپوگرافی

برای حذف فاز ناشی از ارتفاع سطح زمین، از مدل رقومی ارتفاع (DEM) مانند ۳۰ mSRTM یا Copernicus DEM استفاده شده و مؤلفه‌ی توپوگرافی از فاز کل کسر می‌شود.

### گام ۹: محاسبه‌ی جابه‌جایی در امتداد خط دید<sup>۸</sup>

فاز بازگشایی شده و تصحیح شده به جابه‌جایی خط دید تبدیل می‌شود:

$$\text{Con} = \lambda \cdot \Delta \phi_{\text{disp}} \quad \text{معادله ۲}$$

که در آن  $\lambda$  طول موج رادار است (برای سنتینل-۱ک: حدود ۵,۶ cm) [۱۹].

### گام ۱۰: تبدیل جابه‌جایی خط دید به مؤلفه‌ی عمودی

برای ارزیابی نشست یا بالآمدگی زمین، جابه‌جایی خط دید به مؤلفه‌ی عمودی تبدیل می‌شود:

$$d_v = d_{\text{LOS}} / \cos \theta \quad \text{معادله ۳}$$

که  $\theta$  زاویه‌ی دید ماهواره نسبت به قائم زمین است.

### گام ۱۱: تولید نقشه‌ی جابه‌جایی سطح

با اعمال ماسک همدوسی (محدوده‌ی همدوسی  $\leq 0.3$ )، داده‌های غیرهمدوس حذف و خروجی نهایی به صورت نقشه‌ی فرونشست تهیه می‌شود [۵].

در این نقشه، پیکسل‌های مثبت نشان‌دهنده‌ی بالآمدگی و پیکسل‌های منفی بیانگر فرونشست زمین هستند.

### گام ۱۲: صحت‌سنجی نتایج

مقادیر جابه‌جایی حاصل از InSAR با داده‌های GPS، اندازه‌گیری‌های میدانی و تراکم سازه‌ها، جنس خاک و طبقات زمین‌شناسی مقایسه می‌شود.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با روش تداخل‌سنجی راداری میزان و دامنه فرونشست تبیین شده است، که کمک فراوانی به ارزیابی جابه‌جایی زمین خواهد کرد. در این بررسی همان‌طور که در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است مناطق مختلف حوضه موردنظر در بازه زمانی شش سال، ۶۰ میلی‌متر فرونشست داشته یعنی به صورت سالانه در مناطق مختلف حدود ۱۰ میلی‌متر فرونشست قابل مشاهده است که می‌توان اذعان داشت، میزان فرونشست در منطقه مورد مطالعه کم بوده به طوری که نشست در ابتدای راه خود قرار دارد [۲۸]. با توجه به اینکه در روزهای اخیر این پدیده فرونشست زمین در

مازندران، هم‌زمان با سایر استان‌های کشور، شدت یافته و به معضلی نگران‌کننده و جدی تبدیل شده است، ضرورت توجه و اقدام فوری در این زمینه بیش‌ازپیش احساس می‌شود [۲۲].

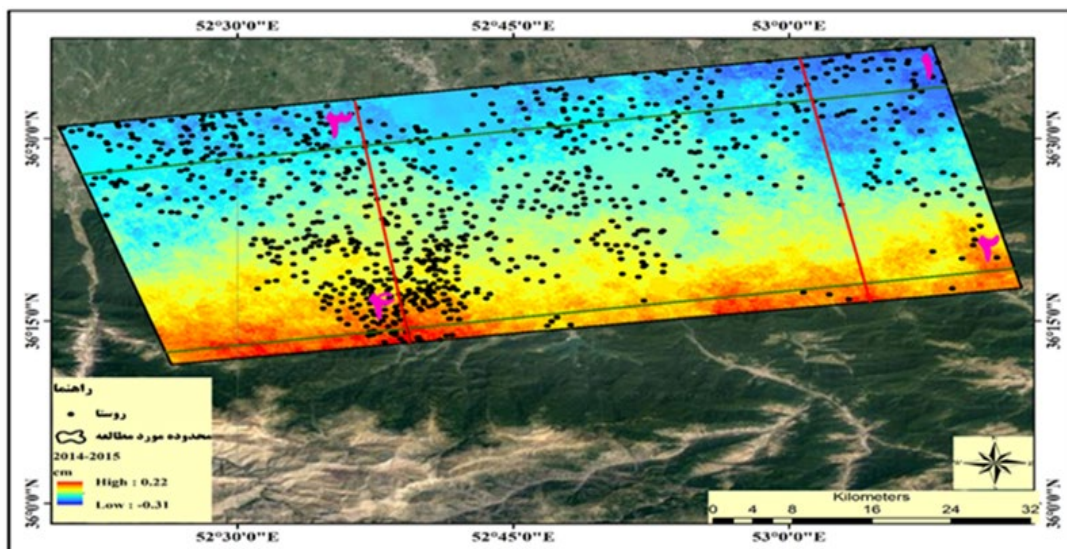


شکل ۲: مراحل انجام تداخل سنجی راداری

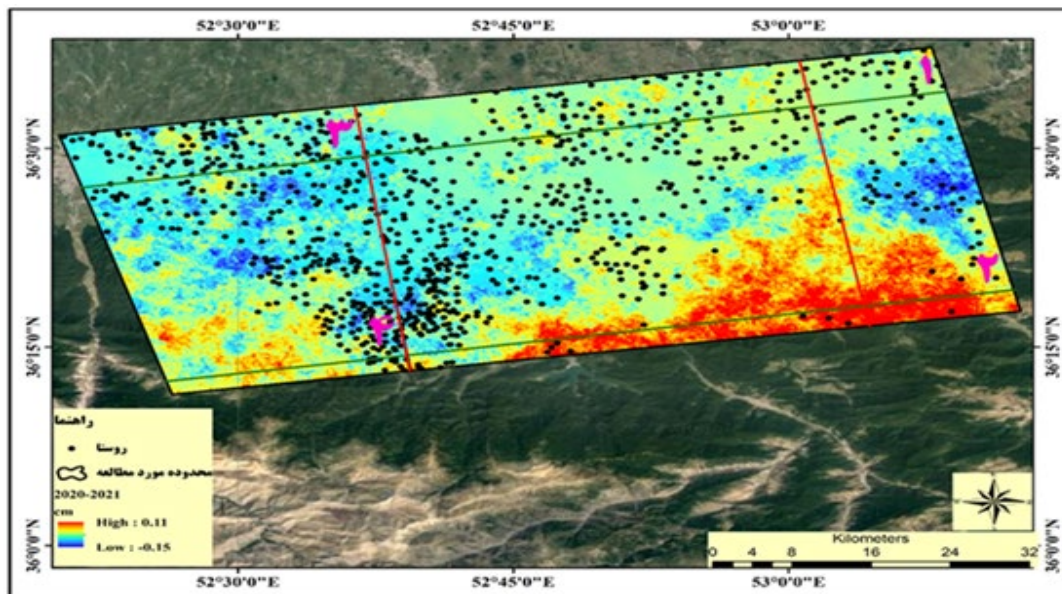
رابطه بین ساختار تکتونیکی منطقه و فرونشست

بر اساس بررسی‌های زمین‌شناسی و داده‌های تداخل‌سنجی، میزان فرونشست در حوزه آبخیز برنجستانک ارتباط مستقیمی با

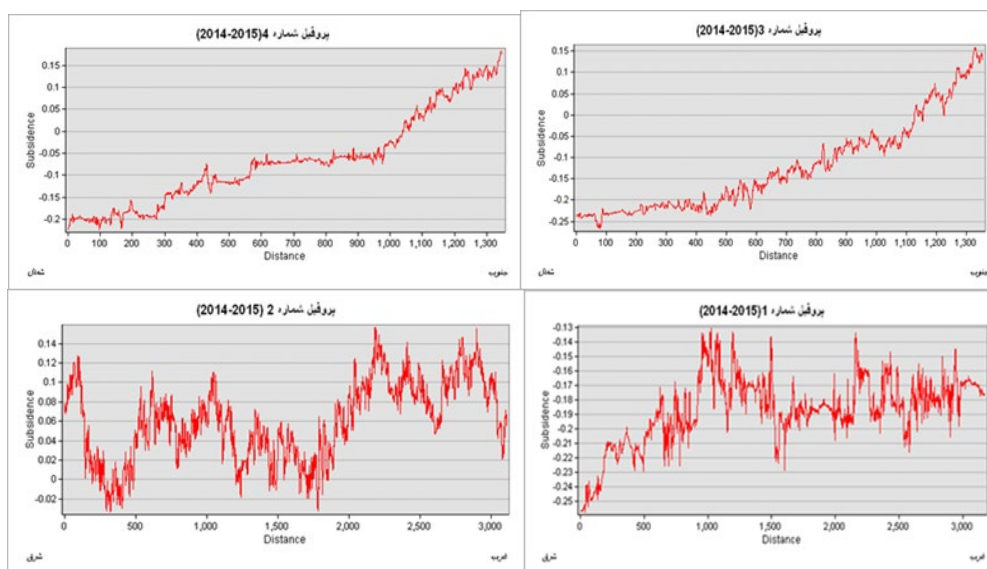
نوع سازندهای موجود و ویژگی‌های ساختاری منطقه دارد [۱۷]. در بخش شمالی که شامل مارن، کنگلومرا، مخروط‌افکنه‌ها و پادگانه‌های آبرفتی (OM\m,c,s) و (Qs و Q1) است، فرونشست قابل توجهی مشاهده نشده است. دلیل اصلی این پایداری، وجود سد خاکی زمزم می‌باشد که با ذخیره و مهار آب‌های سطحی، وابستگی به منابع آب زیرزمینی را کاهش داده است. تنها در سال‌های اخیر، در اثر کم‌آبی و کاهش حجم آب سد، نشست خفیف گزارش شده است. در بخش‌های مرکزی و جنوبی با سازندهای آهکی، مارنی و ماسه‌سنگ‌های آهکی (PIQc,m,s و Pem,l,s,Pr,Qc,OM\m,c,s)، میزان فرونشست بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ افزایش چشمگیری داشته است. این مناطق که در دو سوی رودخانه اصلی قرار دارند، به دلیل تغییرات آبدهی رودخانه و فرسایش نهشته‌های سست، دچار تراکم و افت سطح زمین شده‌اند. در نتیجه، پایداری شمال حوضه حاصل شرایط تکتونیکی آرام و کنترل منابع آب توسط سد زمزم است، در حالی که جنوب و مرکز حوضه به دلیل ترکیب لیتولوژیکی ضعیف و تأثیر جریان‌های رودخانه‌ای، بیش‌ترین مقدار فرونشست را نشان می‌دهند. ترکیب لیتولوژیکی این منطقه که عمدتاً از جنس مارن، رس و ماسه‌های دانه‌درشت هستند که در مقابل نیروی جریان آب بخصوص در مواقع سیلابی فرسوده شده و متناسب با قدرت تخریب آب فرسایش می‌یابند و دچار نشست می‌شوند. نکته قابل توجه‌تر اینکه در مساحت کمی از حوضه که سازند شمشک و دارای شیل‌های خاکستری و سیاه و ماسه‌سنگ و رس سنگ و زغال دار (TR3Js) و هم‌چنین سنگ‌آهک نازک و شیل آهکی (TRe1) و سنگ‌آهک دولومیتی و سنگ‌آهک (TRe2) بوده، میزان فرونشست به مقدار قابل توجهی زیاد شده که روند صعودی آن به نسبت دیگر مناطق قابل توجه است. سازند شمشک به‌عنوان یک توده‌ی سنگ مرکب از تناوبی از لایه‌های سست و سخت



شکل ۳: نقشه فرونشست در محدوده حوزه آبخیز برنجستانک مازندران در سال ۲۰۱۴-۲۰۱۵



شکل ۴: نقشه فرونشست در محدوده حوزه آبخیز برنجستانک مازندران در سال ۲۰۲۰-۲۰۲۱



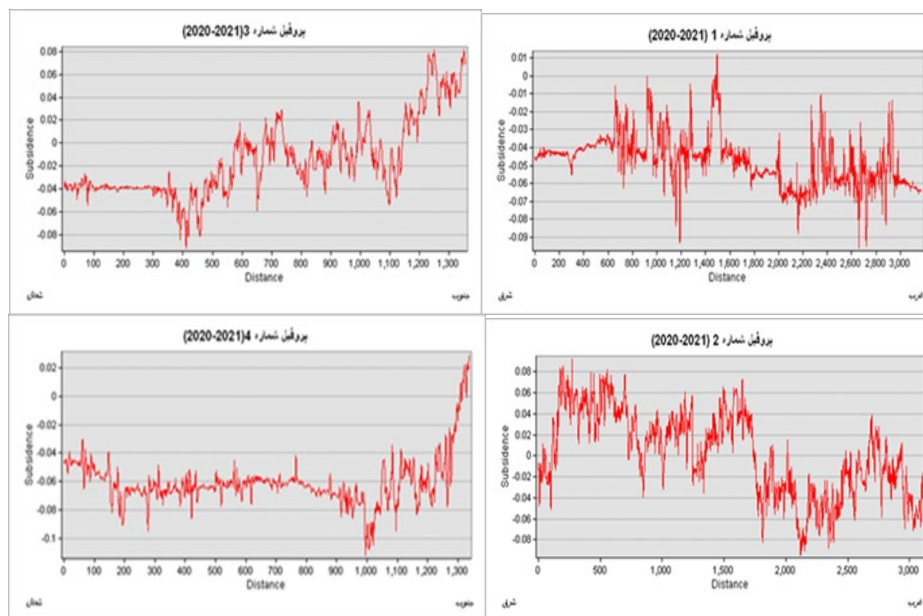
شکل ۵: پروفیل‌های بررسی روند فرونشست در حوزه آبخیز برنجستانک در بازه ۲۰۱۵-۲۰۱۴

حساسی مانند مارن و شیل و آهک کشیده شده است. جدول (۲)، میانگین تغییرات میزان فرونشست را، طی سال‌های مورد مطالعه در لیتولوژی‌های مختلف حوضه نشان می‌دهد.

#### رابطه بین کاربری اراضی و فرونشست

کاربری‌های مختلف باعث شده تا آرایش طبیعی فرآیندهای آبراه‌ای که آب و رسوب را از مناطق بالادست به طرف حوضه‌های پایین‌دست انتقال می‌دهند تحت تأثیر مداخلات انسانی قرار گرفته و یکی از مسائل مخاطره‌آمیز در مناطق مختلف که همانا تغییرات ایجاد شده در الگوی جریان‌های سطحی و شرایط طبیعی حوضه‌ها

تعریف شده است. در کل، بر اساس مطالعه و بررسی‌های انجام شده در حوضه مورد مطالعه، به نتایج و یافته‌های زیر رسیدیم: قسمت بالادست حوضه (نیمه شمالی نقشه) در شکل ۷ به علت خصوصیات فیزیکوشیمیایی سنگ‌های تشکیل دهنده از پایداری بیش‌تری نسبت به رسوبات پایین‌دست (مارن، رس، شیل و آهک) برخوردار است، چون مارن و رس و ترکیبات مشابه در مقابل تغییرات محیطی سریعاً کنده شده و حمل می‌گردند [۲۹]. در قسمت مرکزی حوضه نیز یک کانال جهت انتقال آب به مزارع وجود دارد که به علت عدم رعایت اصول مربوط به احداث کانال، سبب افزایش تخریب و فرسایش در حوضه مورد مطالعه شده است و هم‌چنین این کانال در لایه‌های

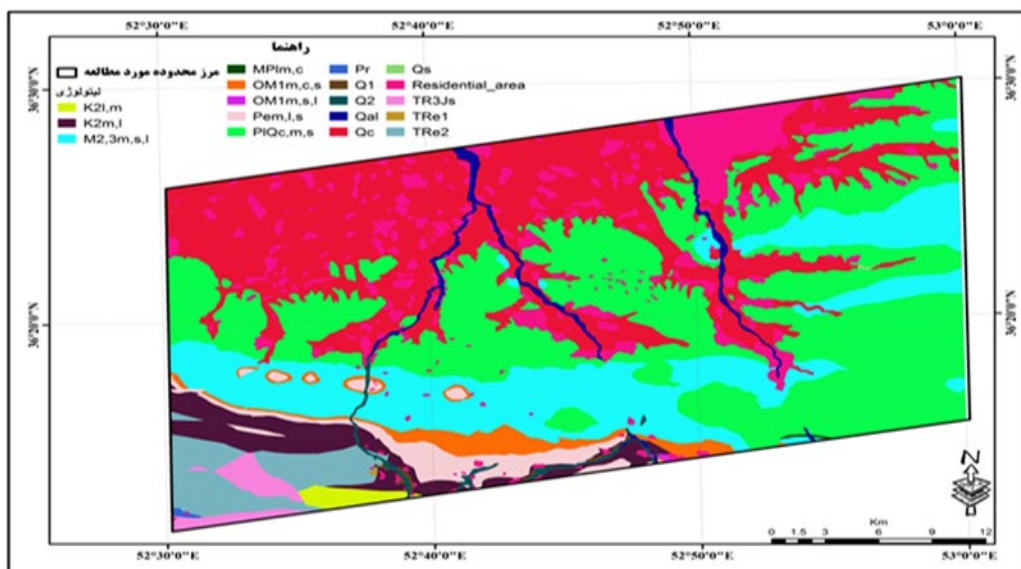


شکل ۶: پروفیل‌های بررسی روند فرونشست در حوزه آبخیز برنجستانک در بازه ۲۰۱۵-۲۰۱۴  
 جدول ۲: میانگین و انحراف معیار میزان فرونشست در لیتولوژی‌های مختلف در حوزه آبخیز برنجستانک

لیتولوژی	MEAN		STD	
	۲۰۱۴	۲۰۲۱	۲۰۱۴	۲۰۲۱
K2l, m	۱۲/۴	۳/۱۸	۰/۳۲	۰/۴۹
K2m, l	۳/۶۳	۳/۱۱	۰/۵۹	۰/۵۹
M2,3m, s, l	۲/۹۷	۲/۹۳	۰/۷۰	۰/۷۰
MPlm, c	۳/۷۰	۴/۲۷	۰/۴۶	۰/۴۹
OM1m, c, s	۳/۷۵	۲/۸۶	۰/۴۴	۰/۷۶
OM1m, s, l	۳/۴۵	۳/۹۶	۰/۵۰	۰/۲۰
Pem, l, s	۳/۸۲	۳/۰۰	۰/۴۵	۰/۶۶
PIQc, m, s	۲/۶۸	۲/۹۱	۰/۷۶	۰/۸۴
Pr	۴/۰۰	۳/۹۳	۰/۰۷	۰/۳۰
Q1	۴/۱۱	۳/۵۶	۰/۷۱	۰/۶۴
Q2	۳/۸۰	۳/۲۶	۰/۵۷	۰/۷۳
Qal	۲/۱۹	۲/۴۱	۰/۶۳	۰/۶۰
Qc	۲/۰۵	۲/۳۵	۰/۴۶	۰/۴۹
Qs	۲/۲۸	۳/۰۹	۰/۴۵	۰/۲۸
Residential_area	۲/۲۰	۲/۵۴	۰/۵۶	۰/۵۴
TR3Js	۴/۰۴	۳/۱۴	۰/۲۱	۰/۵۶
TRe1	۴/۰۰	۲/۸۱	۰/۰۰	۰/۳۹
TRe2	۴/۰۰	۳/۰۴	۰/۲۷	۰/۵۴

سرعت بیش‌تری به نقاط پست و رسوبی حوضه برسد و در نتیجه، اشباع بیش‌ازحد لایه‌های سطحی و فشردگی تدریجی رسوبات نرم (مخصوصاً در واحدهای Qc و PIQc) رخ دهد. این پدیده، به‌ویژه در نواحی جنوب و مرکز حوضه برنجستانک که جنس زمین از مارن و شیل‌های سازند شمشک (TR3Js) و نهشته‌های آبرفتی نرم است، شدت بیش‌تری دارد. در چنین مناطقی، تمرکز سریع جریان سطحی و نفوذ زیاد آب در خاک، به همراه افت سطح آب زیرزمینی ناشی از

و تجاوز به حریم رودها و آبراهه‌ها هست را به وجود آورد [۲۰]. تغییرات ناشی از فعالیت‌های انسانی نقش بارزی در تشدید فرآیندهای ژئومورفیک به‌ویژه فرونشست زمین و نابسامانی‌های هیدرولوژیکی ایفا کرده‌اند. اشغال و دست‌کاری بستر رودخانه‌ها برای ساخت‌وساز، توسعه اراضی کشاورزی و احداث جاده‌های روستایی سبب تغییر در مسیر طبیعی جریان آب و کاهش زمان تمرکز رواناب‌ها شده است [۲۳]. این تغییر باعث می‌شود آب با



شکل ۷: نقشه لیتولوژی حوزه آبخیز برنجستانک

۸). در بحث آبیاری زمین‌های کشاورزی و باغات، آبیاری که در اکثر سیستم‌ها وجود دارد به این صورت است که این آب، از منابع سطحی یا زیرزمینی تأمین می‌شود و به‌طور غیرمستقیم به دلیل اینکه با تخلیه آبخوان‌ها مرتبط است باعث تخلیه و تهی شدن زیرزمین و ایجاد فرونشست می‌شود.

جدول ۳: میانگین و انحراف معیار میزان فرونشست در کاربری‌های مختلف در حوزه آبخیز برنجستانک

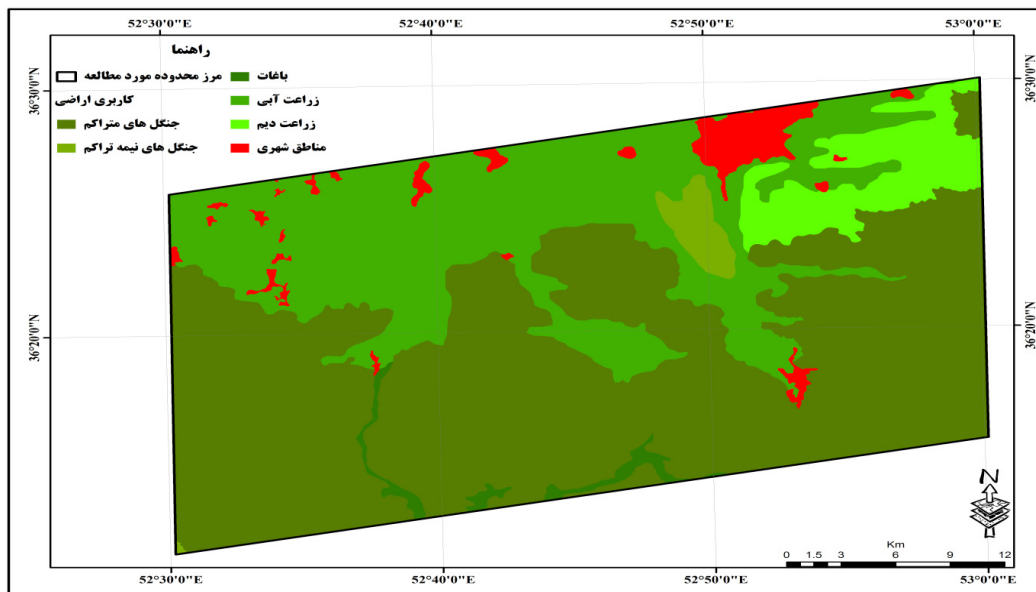
کاربری اراضی	MEAN		STD	
	۲۰۱۴	۲۰۲۱	۲۰۱۴	۲۰۲۱
جنگل‌های متراکم	۳/۱۰	۲/۹۶	۰/۷۷	۰/۷۸
زراعت آبی	۲/۰۸	۲/۳۴	۰/۴۶	۰/۴۸
باغات	۳/۷۰	۳/۴۱	۰/۶۴	۰/۷۳
زراعت دیم	۱/۷۹	۲/۵۹	۰/۴۱	۰/۵۰
جنگل‌های نیمه متراکم	۲/۲۰	۲/۶۷	۰/۴۶	۰/۴۶
مناطق شهری	۲/۰۳	۲/۶۹	۰/۴۱	۰/۴۶

#### اعتبار سنجی

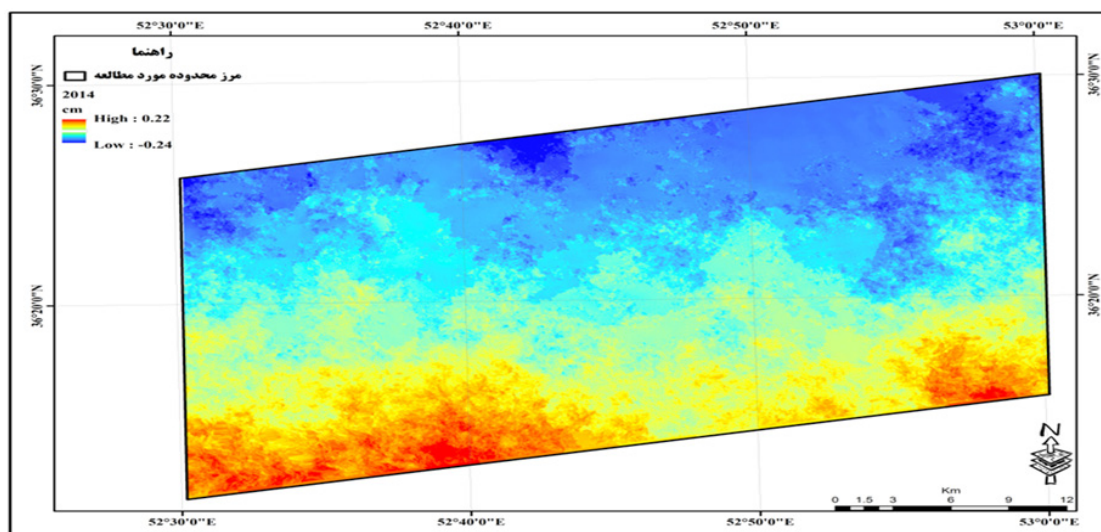
برای صحت سنجی محاسبات انجام‌شده و انطباق نتایج حاصل از تکنیک تداخل سنجی راداری با نقشه کاربری اراضی مطابق با شکل ۸) و نقشه نهایی فرونشست حوضه (شکل ۹) نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان فرونشست به ترتیب مربوط به باغات و زمین‌های کشاورزی و شالیزار ۴۳/۵ درصد و زمین‌های آبی ۱۲/۳ درصد بوده که قسمت‌های جنوبی و مرکزی حوضه را اشغال کرده‌اند و به سمت غرب حوضه گسترانیده شده‌اند. به‌طوری‌که مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی و باغات به دلیل بهره‌برداری از آب چشمه‌ها، پتانسیل بالایی جهت وقوع فرونشست دارد. جهت تطبیق نقشه لیتولوژیکی حوضه (شکل ۷) با نقشه نهایی فرونشست (شکل ۹) در

برداشت‌های بی‌رویه، زمینه را برای تسریع فرونشست تدریجی زمین فراهم می‌کند. در مقابل، نواحی شمالی حوضه که تحت اثر مدیریت سد زرم قرار دارند، به دلیل تثبیت نسبی وضعیت هیدرولوژیکی و کنترل جریان‌های سطحی، پایداری بیشتری در برابر فرونشست نشان می‌دهند. به‌طورکلی، می‌توان گفت تغییر شکل بستر جریان‌ها توسط انسان، تمرکز سریع رواناب‌ها و افت سطح آب زیرزمینی سه عامل هم‌افزا در بروز و گسترش فرونشست در حوضه برنجستانک به شمار می‌روند؛ عواملی که در صورت استمرار، نه‌تنها باعث تغییر دائمی در مورفولوژی زمین می‌شوند، بلکه خطرهای جدی برای زیرساخت‌های کشاورزی و سکونتگاهی منطقه به همراه خواهند داشت. تغییر کاربری اراضی در طی زمان می‌تواند بر منابع آب زیرزمینی تأثیرگذار باشد که با توجه به خسارات طبیعی و انسانی ناشی از فرونشست بر اثر کاهش یا شاید نابودی منابع آب زیرزمینی می‌تواند مخاطرات جبران‌ناپذیری را برای آیندگان به بار آورد [۳۵]. ازجمله دلایل مستعد بودن برای فرونشست در مناطقی از مازندران استفاده مفرط و مستمر از آب‌های زیرزمینی و چشمه‌ها می‌باشد، ایجاد چاه‌های عمیق و نیمه عمیق، تهدیدی عظیم برای سفره‌های زیرزمینی هستند، علاوه بر اینکه این سفره‌ها در حال تهی شدن می‌باشند [۲۶]. لذا، خطر بزرگ فرونشست زمین در مناطق زراعی و مسکونی وجود دارد که قابل جبران نیست. هدررفت آب باران و آب‌های سطحی در مازندران در برخی فصول زیاد بوده که این آب‌ها به دریا و یا به‌جای گسیل و سرازیر می‌شوند که قابل استحصال و بهره‌برداری در فصل نیاز نیستند.

با استفاده از نقشه کاربری اراضی و تشخیص مکان‌ها، حداکثر تغییر در باغات و زمین‌های آبی و کشاورزی با مقدار حدوداً یک‌دهم سانتی‌متر و هم‌چنین در مناطق شهری و جنگل‌های متراکم و نیمه متراکم با افزایش (۰/۰۵) سانتی‌متر بوده است (جدول ۲ و شکل



شکل ۸: نقشه کاربری اراضی در محدوده حوزه آبخیز برنجستانک



شکل ۹: نقشه نهایی فرونشست در حوزه آبخیز برنجستانک در سال ۲۰۲۰-۲۰۲۱

به‌خصوص پدیده‌هایی که قابلیت ایجاد مخاطره را برای جوامع انسانی دارند اهمیت بسیار زیاد و انکارناپذیری در تحلیل، کنترل و مدیریت آن‌ها خواهند داشت [۲۴]. اهمیت فرونشست زمین با گستره وسیع در کشور سبب شده تا امروزه بسیاری از تحقیقات به‌خصوص در زمینه مخاطرات به این موضوع اختصاص یابد. در همین رابطه استفاده از تکنیک‌های به‌روز، دقیق و کارآمد الزامی است. تداخل سنجی تکنیک استفاده از امواج الکترومغناطیس به‌منظور استخراج اطلاعات است [۲۶]. تداخل سنجی راداری با استفاده از اختلاف فاز زوج تصویر راداری با حد تفکیک مکانی بالا به دنبال تولید مدل رقومی ارتفاعی منطقه و برآورد میزان تغییر شکل و جابه‌جایی پوسته زمین است و از کاربردهای مهم این تکنیک، برآورد میزان فرونشست در سطح زمین می‌باشد که

قسمت‌های جنوبی‌تر حوضه و هم‌چنین قسمت‌های مرکزی و غربی که دارای سازندهایی از سنگ‌آهک دولومیتی و مخروط‌افکنه‌ها - پادگانه‌های سیلابی و رودخانه‌ای - مارن‌سیلت‌دار و ماسه‌سنگ‌آهکی - سنگ‌آهک ماسه‌ای و مارنی و سیلت سنگ (Pr-Qc-OMI<sub>m,c,s</sub> و Pem<sub>i,l,s</sub> و PIQ<sub>c,m,s</sub>) می‌باشند، میزان فرونشست در طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ در پادگانه‌های آبرفتی و سیلابی و رودخانه‌ای بیش‌تر افزایش پیدا کرده که در دو طرف رودخانه در حوضه مورد مطالعه (قسمت مرکزی و جنوبی) مشاهده شده که بر اثر عملکرد آبدمی متفاوت رودخانه به وجود آمده‌اند.

#### جمع‌بندی

به‌طورکلی شناخت صحیح و تشخیص علت وقوع پدیده‌ها و



#### جدول ۴: نتیجه کلی فرونشست و تحلیل آن در ارتباط با عوامل بررسی شده در حوزه آبخیز برنجستانک

در این پژوهش، فرونشست حوضه برنجستانک بررسی و ارتباط آن با عوامل مختلف تحلیل شد. به منظور سازگاری نتایج حاصل از تداخلسنجی راداری و صحتسنجی با دیگر داده‌های تکمیلی از نقشه کاربری اراضی و نقشه زمین‌شناسی و داده‌های چشمه‌ها در سطح حوضه استفاده شد. بررسی‌ها حاکی از آن بود که میزان فرونشست حداکثر یک سانتی‌متر در سال و با روند شمالی-جنوبی و شرقی-غربی بوده که در قسمت جنوبی حوضه به علت وجود سازند شمشک و زغال‌دار نمود بیش‌تری داشت. هم‌چنین، بیش‌ترین مساحت حوضه را رسوبات مارن و آهک‌های مارنی تشکیل داده که در مناطق مرطوب به علت رطوبت زیاد در این نواحی، سازندهای ریزدانه مانند مارن و رس و آهک‌های مارنی ایجاد فرونشست را تشدید می‌کند. بررسی و تحلیل نقشه کاربری اراضی و ارتباط آن با نقشه فرونشست حوضه برنجستانک، نشان‌دهنده رخداد بیشینه عرصه فرونشست در زمین‌های کشاورزی و باغات بوده که این امر می‌تواند به صورت غیرمستقیم باعث تنزل کیفیت شرایط محیطی و زندگی ساکنان آن منطقه شود. هم‌چنین در منطقه موردنظر، افت سطح آب چشمه‌ها به واسطه توسعه کشاورزی و زمین‌های شالیزاری و کشت برنج در دو فصل از سال (زیرا آب موردنیاز کشت دوم را معمولاً از آب‌های زیرزمینی و یا پمپ‌های دیزلی و آب چشمه‌ها تأمین می‌کنند درحالی‌که درکشت اول، آب‌های سطحی و یا بارش باران برای آبیاری زمین‌های کشاورزی کافی است) منجر به بهره‌برداری بیش‌ازحد آن شده و همین مسئله می‌تواند مخاطرات ناشی از فرونشست را تشدید نموده و نهایتاً بحرانی نماید. کمینه مقدار نشست در قسمت شمالی حوضه بوده که وجود سد را می‌توان دلیل آن دانست به این سبب که احداث سدهای اصلاحی به‌عنوان مانعی در برابر جریان آب قرار می‌گیرد و باعث کم شدن سرعت جریان و در نتیجه نفوذپذیری بیش‌تر می‌گردد [۲۰]. بررسی‌های حاصل از داده‌های INSAR، تحلیل‌های تکتونیک و ویژگی‌های لیتولوژیکی نشان می‌دهد که اشغال بسترهای رودخانه‌ای، احداث سازه‌های کنترلی و سدهای اصلاحی سبب افزایش زمان پایه سیلاب و در نتیجه کاهش دبی اوج جریان‌ها گردیده است. این امر باعث تأخیر در تخلیه طبیعی سیلاب‌ها از آبراهه‌ها و افزایش فرصت نفوذ

آب در خاک‌های سطحی شده است. نفوذ رواناب از طریق سازه‌های اصلاحی در بخش‌های پایین‌دست، موجب تغذیه موضعی چشمه‌ها و افزایش سطح آب زیرزمینی گردیده و در کوتاه‌مدت آثار مثبتی بر احیای آبخوان‌ها داشته است [۲۶]. با این حال، در جنوب حوضه برنجستانک که عمدتاً در واحدهای زمین‌شناسی نرم مانند مارن‌ها، شیل‌ها و رسوبات سازند شمشک (TR۳Js) و آبرفت‌های ریزدانه Qc قرار دارد. این افزایش نفوذ همراه با افت تدریجی سطح آب زیرزمینی و وجود ساختارهای گسلی فعال، به فشردگی رسوبات و در نهایت شروع و تشدید فرونشست زمین انجامیده است. نتایج پردازش‌های تداخلسنجی راداری در بازه‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۵ و ۲۰۲۰-۲۰۲۱ نیز این روند را در بخش‌های جنوبی و جنوب غربی حوضه تأیید می‌کنند. بر اساس تحلیل‌های ساختاری و هیدروژئومورفیک، می‌توان بیان کرد که آغاز فرونشست زمین در برنجستانک نتیجه‌ی هم‌زمان اثرات انسانی (تغییر مسیر جریان‌ها، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی) و ویژگی‌های تکتونیک و لیتولوژیکی منطقه است. شدت بیش‌تر این پدیده در نواحی واقع بر سازند شمشک و پهنه‌های گسلی فعال، وابسته به جنس زمین و نفوذپذیری متفاوت رسوبات است.

#### پیشنهادها و راهکارهای مدیریتی

- \* مدیریت برداشت آب‌های زیرزمینی و کنترل چاه‌های غیرمجاز به‌منظور جلوگیری از افت سطح آب و کاهش نرخ فرونشست.
- \* تقویت آبخوان‌ها با اجرای طرح‌های نفوذ مصنوعی و هدایت رواناب در مناطق نفوذپذیر شمال حوضه.
- \* بهینه‌سازی سازه‌های اصلاحی و سدهای کنترلی برای تنظیم نفوذ و جلوگیری از اشباع بیش‌ازحد رسوبات نرم در جنوب منطقه.
- \* پایش مداوم فرونشست با داده‌های ماهواره‌ای و نقاط زمینی (InSAR و GPS) برای ارزیابی تغییرات سالانه.
- \* مدیریت کاربری اراضی و اصلاح الگوی آبیاری کشاورزی (استفاده از روش‌های کم‌مصرف و هدایت‌شده) به‌منظور حفظ پایداری خاک و کاهش فشار بر منابع زیرزمینی.

ence using persistent scatterer interferometry techniques and ground truth data in arid and semi arid regions: The case of Remah, UAE. *Science of the Total Environment*, 776, 145946.

10- Ferretti, A., Prati, C., and Rocca, F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8.

11- Gharechelo, S., Kbari Ghochani, H., Golian, S., and Ganji, K. 2012. Evaluating the rate of land subsidence in open ground with groundwater using Sentinel 1 and Envisat radar satellite data (Study area: Mashhad Plain). *Journal of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources*, 1(3), 40–61 (In Persian).

12- Gao, M., Gong, H., Chen, B., Li, X., Zhou, C., Shi, M., Si, Y., Chen, Z., and Duan, G. 2018. Regional land subsidence analysis in the eastern Beijing Plain by InSAR time series and wavelet transforms. *Remote Sensing*, 10(3), 365.

13- Guo, L. 2014. Evaluation of PS DInSAR technology for subsidence monitoring caused by repeated mining in mountainous areas. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(10), 3309–3315.

14- Goorabi, A., Karimi, M., Yamani, M., and Perissin, D. 2020. Land subsidence in Isfahan metropolitan area and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel 1A InSAR observations. *Journal of Arid Environments*, 181, 104220.

15- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., and Kampes, B. 2004. Persistent Scatterer InSAR for measuring deformation. *Geophysical Research Letters*, 31(23), L23611.

16- Jeanne, P., Faar, T. G., Rutqvist, J., and Vasco, D. W. 2019. Role of agricultural activity on land subsidence in the Joaquin Valley, California. *Journal of Hydrology*, 569, 462–469.

17- Mazandaran Province Natural Resources Department. 2016. Consolidated report of the executive plan for the Berenjestanak watershed (In Persian).

18- Mazandaran Province Natural Resources Department. 2018. Research report on the comprehensive geological plan for the Savadkouh region. (In Persian).

19- Mateos, J., López Dekker, P., and Mallorquí, J. J. 2012. InSAR atmospheric phase screen estimation using MERIS and MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(12), 5181–5192.

1- Aghayari, L., Abedini, M., and Asghari Saraskanroud, P. 2022. Estimating the rate of subsidence using radar interferometry technique and groundwater and land use parameters (Case study: Ardabil). *Journal of Quantitative Geomorphology Research*, 11(11), 117–132 (In Persian).

2- Anderssohn, J., and Wetzel, H. U. 2008. Land subsidence pattern controlled by old Alpine basement faults in the Kashmar Valley, northeast Iran: Results from InSAR and levelling. *Geophysical Journal International*, 174(1), 287–294.

3- Arvin, A., Vahabzadeh, G., Mousavi, S. R., and Bakhtyari, K. I. A. M. 2019. Geospatial modeling of land subsidence in the south of the Minab watershed using remote sensing and GIS. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(3), 19–34 (In Persian).

4- Cian, F., Blasco, J. M. D., and Carrera, L. 2019. Sentinel-1 monitoring of land subsidence in coastal cities in Africa using PSInSAR: A methodology based on the integration of SNAP and StaMPS. *Geosciences*, 9(3), 124–135.

5- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Crippa, B., and Devanthéry, N. 2016. Spaceborne differential SAR interferometry: Trends and validation. *Remote Sensing*, 8(4), 296.

6- Emad al Din, S., Shahi, V., Arkhi, S., and Aq Atabay, M. 2014. Determining the rate of land subsidence in the Jajrud alluvial fan area using radar interferometry technique. *Quarterly Journal of Physical Geography Research*, 51(2), 169–183 (In Persian).

7- Ebrahimi, A., Ghasemi, A., and Ganjaeian, H. 2019. Monitoring the subsidence rate of the Pakdasht urban area using radar interferometry method. *Quarterly Journal of Geography and Human Relations*, 2(4), 1–13 (In Persian).

8- European Space Agency (ESA). 2023. Sentinel 1 technical guide: InSAR processing. European Space Agency, Copernicus Open Access Hub. Retrieved from.

9- ElKamali, M., Papoutsis, I., oupasakis, C., and Abuelgasim, A. 2021. Monitoring of land surface subsid-

- 28- Regional Water Department of Mazandaran Province. 2015. Research report on the faults of the province. (In Persian).
- 29- Roohi, M., Faeli, M., Irani, M., and Shamsaei, E. 2021. Calculation of land subsidence and changes in soil moisture and salinity using remote sensing techniques. *Environmental Earth Sciences*, 80,423.
- 30- Simons, M., and Rosen, P. A. 2017. Interferometric synthetic aperture radar geodesy: Theory and measurement of surface deformation using satellite radar interferometry. In G. Schaeffer (Ed), *Treatise on Geophysics* (Vol. 3, pp. 391–446). Elsevier.
- 31- Sadrikiya, M., and Kazemipour, N. 2024. Land subsidence assessment using radar interferometry time series and spatial analyses. *Journal of Geography and Planning*, 28(90) , 188–209. (In Persian).
- 32- Shirani, K., and Pasandi, M. 2015. Land subsidence risk assessment and zoning in the watersheds of Isfahan Province using the synthetic aperture radar interferometry method with persistent scatterers. *Journal of Geography and Planning*, 26(77) , 83–98. (In Persian).
- 33- Yu, C., Li, Z., and Penna, N. T. 2018. GACOS: A global atmospheric correction service for InSAR. *Geophysical Research Letters*, 45(6) , 2335–2342.
- 34- Zandi, R., Farzinkia, R., and Sharifi, N. 2019. Land subsidence and radar.
- 35- Zandi, R., Farzinkia, R., and Sharifi, N. 2019. Land subsidence and radar interferometry book, *Satellite Publications*, Chapter 3, First Edition.
- 20- Mehrabi, A., Karimi, S., and Khalisi, M. 2014. Spatial analysis of Jiroft Plain subsidence using the Coherence Pixel Technique (CPT). *Journal of Geography and Environmental Planning*, 34(1) ,99–116 (In Persian).
- 21- Mohammadi, M., Pourghasemi, H. R., and Amiri, M. 2012. Evaluating the sensitivity of land subsidence in the Semnan Plain using the entropy model. *Watershed Management Research Journal*, 12(23) , 75–85 (In Persian).
- 22- Mazandaran Province Regional Water Joint Stock Company. 2022. Management report: Basic studies of water resources (In Persian).
- 23- Memarian Khalilabad, H., Muslimzadeh, A., Tajbakhsh, M., and Akbari, M. 2024. Quantitative assessment of land subsidence in the northern part of the Kashmar aquifer using radar interferometry and PSI drought index. *Environmental Erosion Research*, 53(15), 178–203 (In Persian).
- 24- Moradi, A., Emad al Din, S., Arakh, S., and Rezaei, K. 2019. Land subsidence analysis using radar interferometry technique and geotechnical and piezometric well data (Case study: Urban area 18 of Tehran). *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 7(1), 153–176 (In Persian).
- 25- Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E. J., Schenk, A., and Baes, M. 2008. Land subsidence in Iran using InSAR observations. *Environmental Earth Sciences*, 57(2), 283–297.
- 26- Roštami Barani, H. R., Lashkaripour, G. R., Kohandel, A., and Tarshizi, M. 2006. Investigation of land subsidence in Mashhad city using phase displacement method. *Journal of Water and Soil Conservation*, 13(3), 137–154 (In Persian).
- 27- Rouhani Zadeh, S. 2007. Evaluation of watershed management operations in the Berenjestanak Dam catchment area [Master's thesis, Shahid Beheshti University]. (In Persian).



## Abstract

**Land Subsidence Assessment in Berenjestanak Watershed, Mazandaran Province, Iran, Using Sentinel-1 InSAR time Series**S. A Hejaz<sup>1</sup> and S. Rouhani Zadeh<sup>2\*</sup>

Received: 2025/08/30 Accepted: 2025/12/10

Land subsidence is one of the most significant geomorphological hazards in watershed areas and is directly associated with the unsustainable exploitation of groundwater resources. This phenomenon, resulting from the reduction of aquifer volume and the compaction of sedimentary layers, leads to deformation and disturbance of the basin's natural functioning, causing consequences such as surface lowering, damage to agricultural and civil infrastructure, decreased soil permeability, increased surface runoff, and intensified flood risk. Therefore, monitoring the rate of land subsidence and analyzing its influencing factors are essential for effective hazard control and management. This study investigates land subsidence in Mazandaran Province, with a particular focus on the Baranjestanak watershed, during the period 2014–2021, using the radar interferometry (InSAR) technique. The Sentinel-1 satellite data were processed within two distinct time intervals using the SNAP software, and interferograms were generated to measure surface deformation. In addition to radar data, geological maps, topography, land-use layers, spring location data, and field observations were utilized to interpret and explain the causes of land subsidence. The results revealed a maximum subsidence rate of approximately 10 mm per year, exhibiting an east–west and north–south directional pattern. The highest deformation intensity occurred in the central, western, and southern sectors of the area. The presence of the Shamshak Formation and coal-bearing strata in the southern part of the watershed was identified as one of the key factors contributing to the accelerated subsidence rate. Moreover, the spatial correlation between the subsidence maps and land-use data revealed that the highest rates of ground subsidence occurred within agricultural areas, primarily due to excessive groundwater extraction following the rapid expansion of farmlands and paddy fields. Management strategies, including the regulation of groundwater withdrawal, modification of cropping patterns, and the adoption of advanced irrigation technologies, are recognized as the most effective approaches for mitigating this phenomenon within the studied region.

**Keywords: Radar interferometry, Berenjestanak watershed, Subsidence, SENTINEL 1**

1. Associate Professor, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz. Iran.
2. PhD Student in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Email.sabikeruhani@gmail.com.Iran.