

مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1399.6.1.7.1](https://doi.org/10.24767/131.1399.6.1.7.1)

## بررسی فرونشست دشت زنجان و ارتباط آن با افت تراز سطح آب‌های زیرزمینی با استفاده از تصاویر راداری ماهواره انویست بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰

مسعود دستجردی<sup>۱</sup>، سید روح‌الله عمادی<sup>۲\*</sup>

masouddastjerdy@gmail.com

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی عمران-ژئودزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

sr\_emadi@azad.ac.ir

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران-جنوب، تهران

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۱۰

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۶/۱۴

### چکیده

در این مقاله، قابلیت روش تحلیل سری زمانی پراکنش‌کننده دائمی در تعیین نرخ و الگوی منطقه تحت تأثیر فرونشست در دشت زنجان در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ محاسبه شده است. داده‌های راداری مورد استفاده، شامل دو مجموعه داده سنجنده ای سار ماهواره انویست شامل ۱۷ تصویر مربوط به گذرپایین مسیر ۴۶۴ و ۹ تصویر برای گذربالا مسیر ۲۲۸ است که پس از پردازش تصاویر با استفاده از نرم‌افزار استمپس آنالیز سری زمانی با روش پراکنش‌کننده دائمی صورت گرفت. بعد از حذف منابع خطا براساس نتایج سری‌های زمانی به دست آمده فرونشستی پیوسته و قابل ملاحظه‌ای در این منطقه مشاهده شده است. سری زمانی تداخل‌سنجی پراکنش‌کننده دائمی مربوط به مسیر بالاگذر ۲۲۸ بیشینه دامنه فرونشستی حدود ۴۰ میلی‌متر در سال را بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ و مسیر پایین‌گذر ۴۶۴ بیشینه دامنه فرونشستی حدود ۳۵ میلی‌متر در سال بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ را مشخص می‌کند. آنالیز نتایج حاصله با اطلاعات تراز آبی منطقه در بازه زمانی مشابه نشان‌دهنده وابستگی شدید بین کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و پدیده فرونشست است.

**واژه‌های کلیدی:** تداخل‌سنجی راداری، فرونشست، آب‌های زیرزمینی، پراکنش‌کننده دائمی

### ۱. مقدمه

زیرزمینی رخ می‌دهد. این پدیده به خصوص، می‌تواند در مناطق حساس به حوادث جبران‌ناپذیری منجر شود؛ به همین دلیل است که امروزه در بسیاری از کشورهای جهان بحث اندازه‌گیری، مدیریت و کنترل آن از پراهمیت‌ترین وظایف

یکی از خطرناک‌ترین رخداد‌های طبیعی فرونشست سطح زمین است که به صورت قائم-افقی ظاهر می‌شود و اغلب به دلیل سهل‌انگاری و افراط بشر در استخراج آب‌ها و معادن

انتقال نیرو در داخل و پیرامون محدوده فرونشست تا رسیدن به پایداری این ناحیه و توقف فرونشست ضروری است. اگرچه ایستگاه‌های نقشه‌برداری زمینی امکان مقایسه مشاهدات مکرر ارتفاعی را در موقعیت‌های خاص آسان می‌کنند، اما در نبود مشاهدات و هزینه‌بر بودن آن‌ها ضرورت کاربرد روشی سریع‌تر و ارزان‌تر را بیش‌ازپیش نشان می‌دهد [۴]. در این میان، تداخل سنجی تفاضلی رادار فناوری نوینی است که از تصاویر ماهواره‌ای برای پایش تغییر شکل سطح زمین استفاده می‌کند. در این روش، تصاویر حاصل با قدرت تفکیک مکانی نسبتاً بالا، امکان بررسی نوسان‌های صورت گرفته در نرخ تغییر شکل سطحی برای مدیریت و کاهش هزینه‌های جاری ضمن تولید را بهبود می‌بخشد [۴].

فرونشست زمین در شهر نانجینگ به دلیل تأثیر شرایط زمین‌شناسی و پیشرفت سریع شهرنشینی به‌طور فزاینده‌ای آشکار شده است. ژوی کیو در مقاله‌ای در سال ۲۰۱۹ با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، ۱۶ تصویر ماهواره ALOS در طول سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ را مورد پردازش قرار داد. نتایج نشان داد که با استفاده از روش تداخل سنجی راداری می‌توان به‌طور دقیق تغییر شکل‌های سطح زمین را به دست آورد [۵].

بوهو بعد از برنامه‌ریزی برای ساخت مترو در شهر فوژو چین از تکنیک تداخل سنجی راداری به روش SBAS برای نظارت بر فرونشست در این منطقه استفاده کرد. در این مطالعه از ۲۴ تصویر ماهواره TerraSAR-X در بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ و ۳۲ تصویر ماهواره سنتینل در باند C در بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حداکثر فرونشستی در حدود ۱۲ میلی‌متر در سال را نشان داد و هشت محدوده تحت تأثیر فرونشست در طول این مدت مشاهده شد. با تجزیه و تحلیل فرونشست در این مناطق در مدت زمانی طولانی به این نتیجه رسیدند که سه منطقه وجود دارد که احتمال فرونشست‌های آینده در آن‌ها بیشتر است [۶].

شهر ووهان بزرگ‌ترین شهر در مرکز چین است و به دلیل ساخت‌وساز سریع شهری در سال‌های اخیر دچار مشکلات فرونشست شده است. یانگ ژانگ در سال ۲۰۱۹ از تصاویر

مراکز تحقیقاتی علوم زمین است [۱]. طبق تعریف سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابه‌جایی افقی اندکی باشد [۲]. حرکت از نظر شدت، وسعت و میزان مناطق درگیر محدود نیست و می‌تواند در اثر پدیده‌های طبیعی زمین‌شناختی مانند انحلال، آب‌شدگی یخ‌ها و تراکم نهشته‌ها، حرکات آرام پوسته زمین و خروج گدازه از پوسته جامد زمین و یا فعالیت‌های انسانی مانند معدن‌کاری، برداشت آب‌های زیرزمینی یا نفت ایجاد شود [۳]. پدیده یادشده، زمین‌لغزه‌ها را به دلیل اینکه حرکات آن‌ها دارای بردار افقی قابل توجهی است و نشست در خاک‌های دستی را شامل نمی‌شود [۱].

عمومی‌ترین علت فرونشست زمین ناشی از فعالیت‌های انسانی، پمپاژ و استخراج آب‌های زیرزمینی، نفت و گاز است. در بسیاری از نواحی آبخیز، آب‌های زیرزمینی از فضای بین لایه‌های رس، شن، ماسه یا ریزدانه پمپاژ می‌شود. اگر بستر منطقه آبخیز از جنس خاک رس و ریزدانه باشد، استخراج آب زیرزمینی باعث فشرده‌گی در این لایه‌ها شده و در نهایت نشست قائم سطح زمین را موجب می‌شود. همچنین مطالعات گسترده آب‌شناسی، زمین‌شناسی، ژئودینامیک و ژئودتیک نشانگر ارتباط مستقیم فرونشست با استخراج آب از چاه‌های آرتزین است.

محاسبات نشان می‌دهد که میزان فرونشست حاصل از استخراج به میزان ۱ تا ۲ سانتی‌متر، در ازای هر متر افت سطح ییزومتریک بوده است. همچنین، روند فرونشست پس از کاهش برداشت از آب‌های زیرزمینی رو به کاهش نهاده است. تحقیقات نشان داده که حدود هشتاد درصد فرونشست در نواحی مختلف جهان در اثر استخراج آب‌های زیرزمینی است [۱].

برای کنترل این پدیده و کاهش خسارت‌های احتمالی، لازم است که در گام نخست هر چه سریع‌تر نسبت به کاهش بهره‌برداری از آب زیرزمینی و اعمال مدیریت صحیح منابع آب اقدامات لازم صورت پذیرد. در ضمن پایش جریان‌های حیاتی از جمله خطوط انتقال سوخت، راه‌آهن، راه، خطوط

RADARSAT-2 در بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ برای به دست آوردن فرونشست در این منطقه استفاده کرد. نتایج روش تداخل‌سنجی برای ارزیابی با ۵۶ ایستگاه ارتفاعی منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت. دو عامل طبیعی (سنگ کربنات و خاک نرم) و سه عامل انسانی (بهره‌برداری از آب زیرزمینی، حفاری مترو، ساخت‌وسازهای شهری) به دلیل روابط آن‌ها با فرونشست زمین بررسی شدند. نتایج نشان داد که چهار منطقه اصلی فرونشست شناسایی شده و میزان فرونشست از ۲۷/۸۰ تا ۵۱/۵۶ میلی‌متر در سال با میانگین تغییرات ۰/۰۳ میلی‌متر بر سال متغیر است. تفاوت داده‌های ارتفاعی و روش تداخل‌سنجی راداری ۵ میلی‌متر در سال است. در نهایت به این نتیجه رسیدند که روش تداخل‌سنجی راداری با داده‌های RADARSAT-2 برای نظارت طولانی‌مدت اراضی یک منطقه بزرگ در شهر ووهان قابل اعتماد است. علاوه بر این فرونشست زمین در اثر ترکیبی از شرایط طبیعی و فعالیت‌های انسانی ایجاد می‌شود [۷].

در ایران نیز پدیده فرونشست سابقه نسبتاً طولانی دارد، حاکم بودن شرایط اقلیمی خشک در اغلب نواحی داخلی ایران و تمرکز بهره‌برداری‌های روزافزون صنعتی، کشاورزی و مصارف آب شرب بر منابع آب زیرزمینی، زیرساخت مناسبی برای رویداد این پدیده فراهم آورده است. تداوم خشکسالی و هم‌زمان افزایش وابستگی به منابع آب زیرزمینی در دهه‌های اخیر دامنه نواحی مستعد فرونشست را به نواحی مختلف ایران از جمله غرب و شمال‌غرب ایران نیز گسترش داده است [۸-۱۰]. کار روی پدیده فرونشست از حدود سال ۱۳۸۴ توسط سازمان نقشه‌برداری کشور آغاز شده و در پی آن سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی در برنامه‌ای بلندمدت مطالعه گسترده فرونشست در دشت‌های کشور را در نظر دارد. به‌طور کلی در ایران نزدیک به ۶۰۰ دشت وجود دارد که احتمال می‌رود که بیش از نیمی از آن‌ها در معرض نشست باشند، اما مطالعات منتشر شده نشان می‌دهد که فقط در تعدادی از دشت‌ها پژوهش‌هایی پراکنده صورت گرفته است [۸].

اندرسون و همکاران در سال ۱۳۸۸ فرونشست دشت کاشمر

را با استفاده از ۲۲ تصویر ای‌سار<sup>۳</sup> برداشت‌شده بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ با روش تداخل‌سنجی متداول مطالعه نمودند و فرونشستی به اندازه ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر در سال را برای این دشت برآورد نمودند [۱۱]. دهقانی و همکاران در سال ۱۳۸۹ فرونشست دشت نیشابور را با استفاده از تصاویر راداری ای‌سار برداشت‌شده بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ را با روش SBAS مورد مطالعه قرار دادند و بیشینه فرونشستی به اندازه ۱۹ سانتی‌متر برای این ناحیه برآورد کردند [۱۲]. شریفی‌کیا و همکاران در سال ۱۳۹۰ در مطالعه‌ای به تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین با روش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی<sup>۵</sup> در دشت نوق بهرمان پرداختند. محدوده مورد مطالعه در ناحیه بیابانی ایران واقع شده و به سبب خشکی محیط و نبود منابع آب سطحی، حیات و فعالیت‌های اقتصادی آن به شدت به منابع آب زیرزمینی وابسته است. در این مطالعه میزان و دامنه نشست به کمک روش‌های نوین دورسنجی راداری تعیین شده است. بدین منظور، روش تداخل‌سنجی تفاضلی داده‌های راداری روی داده‌های ماهواره‌ای در دو باند C و L در بازه زمانی ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۹ به کار گرفته شده است. یافته‌های تحقیق مؤید حاکمیت میزان فرونشست با متوسط سالیانه حدود ۳۰ سانتی‌متر در پهنه‌ای به گستره ۲۸۱ کیلومتر مربع در بخش میانی دشت است [۸]. صالحی و همکاران در سال ۱۳۹۰ به بررسی فرونشست دشت مهبیار جنوبی از روش تداخل‌سنجی راداری پرداختند. دشت مهبیار جنوبی واقع در ۵۰ کیلومتری جنوب شرق اصفهان است که در سال‌های اخیر به واسطه برداشت بی‌رویه از منابع زیرزمینی نشست چشمگیری داشته است. افت سطح ایستایی و به دنبال آن افزایش تنش مؤثر دلیل اصلی فرونشست زمین و ایجاد ترک و شکاف‌ها در قسمت‌هایی از دشت شده است. در این مطالعه به منظور تعیین محدوده تحت‌تأثیر و در نهایت برآورد میزان فرونشست از روش تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان روشی قابل اطمینان برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت بسیار بالا، پوشش وسیع و قدرت تفکیک مکانی بالا استفاده شده است. بیشینه نرخ فرونشست با استفاده از تصاویر راداری ماهواره انویست<sup>۱</sup> در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶، ۸/۲ سانتی‌متر در سال محاسبه شده است [۱۳]. موسوی بفریثی و

۲۰۱۰ پرداختند. نتایج حاصله نشان می‌داد که بیشینه نشست با نرخ ۳۵ تا ۴۰ میلی‌متر در سال در مناطق مرکزی و جنوب این دشت اتفاق افتاده است. آنالیز نتایج حاصله با اطلاعات تراز آبی منطقه در بازه زمانی مشابه نشان‌دهنده وابستگی شدید بین کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و پدیده فرونشست است [۱۶]. حاجب در سال ۹۷ با استفاده از داده‌های راداری ماهواره انویست و به کمک تکنیک تداخل‌سنجی رادار، نرخ فرونشست سالانه زمین در دشت‌های جعفرآباد و قنات استان برای بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ را برآورد کرد. سپس با استفاده از تغییرات تراز آب پیژومترهای منطقه و مشاهده نمودارهای هیدروگراف واحد دشت‌ها، ارتباط تغییرات مکانی نرخ فرونشست در نقاط مختلف آبخوان با برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنالیز سری زمانی تصاویر تداخل‌سنجی نشان می‌دهند که نرخ متوسط فرونشست در دشت‌های جعفرآباد و قنات به ترتیب ۳۵ و ۲۸ میلی‌متر در سال در راستای خط دید ماهواره است. هیدروگراف واحد این دو دشت نیز افت سطح آبخوان را نشان می‌دهد که حاصل این افت تحکیم لایه‌های مناطق فرونشست را سبب شده است [۱۷].

احمدی و همکاران در سال ۹۷ در تحقیقی فرونشست زمین در دشت خرمدره را از روش تداخل‌سنجی راداری با تصاویر ماهواره انویست و سنتینل در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۵ و ۲۰۱۴-۲۰۱۷ با استفاده از روش‌های پراکنش گرهای پایدار و خط مبنای کوتاه به‌دست آوردند. نتایج نشان‌دهنده افزایش نرخ فرونشست در منطقه از ۴۱ میلی‌متر در سال به ۶۹ میلی‌متر در سال است. [۱۸].

در این مقاله به بررسی و تعیین نرخ فرونشست منطقه‌ای در دشت خرمدره در استان زنجان با استفاده از فناوری تداخل‌سنجی راداری در بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ پرداخته شده است. با توجه به عبور بزرگراه تهران-زنجان و وجود قسمتی از راه آهن سراسری در این منطقه نیاز به مطالعات بیشتر در این قسمت احساس می‌شود. همچنین در این تحقیق بر خلاف کارهای انجام‌شده قبلی که از داده‌های زمینی و ژئودتیکی برای بررسی و ارزیابی نتایج استفاده شده است یا

همکاران در سال ۱۳۹۰ در طی مطالعه‌ای به بررسی نشست دشت یزد-اردکان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری بین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰ پرداختند. در دشت یزد-اردکان در طی ۲۰ تا ۳۰ سال اخیر پدیده نشست به‌واسطه برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی به شکل جدی بر سازه‌ها و جاده‌های موصلاتی منطقه ظاهر شده و موجب خسارت‌هایی شده است. در این تحقیق با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به موضوع نشست دشت یزد-اردکان، پرداخته شد و نتایج حاصل از تصاویر برداشت‌شده بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰ و در فصول مختلف با همدیگر مقایسه شد. این تحقیق مشخص نمود که سه منطقه احمدآباد اردکان، رستاق و اکرمیه در جنوب شرقی یزد از نشست بیشتری نسبت به سایر نقاط استان برخوردارند. با استفاده از داده‌های سطح آب زیرزمینی دشت یزد اردکان و میزان بارندگی سالیانه در این دشت، این نتیجه به دست آمد که بین نشست و افت سطح آب در سفره یزد اردکان رابطه مستقیم وجود دارد [۱۴]. امیراحمدی و همکاران در سال ۱۳۹۲ به تعیین مناطق فرونشست احتمالی دشت اردبیل با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی<sup>۶</sup> پرداختند. برای بررسی تغییرات به وجود آمده در حجم آبی آبخوان و میزان افت آب‌های زیرزمینی در کل دشت از داده‌های آماری چاه‌های مشاهده‌ای استفاده و با بهره‌گیری از نرم‌افزار ARCGIS، نقشه‌های ایزوپیز و پهنه افت در منطقه مورد مطالعه، ترسیم شد. نقشه‌های ترسیمی نشان دادند که بیشترین میزان افت آب در قسمت جنوب و جنوب شرقی منطقه اتفاق افتاده است. با تلفیق لایه‌های میزان بارش، شیب، هیدرولوژی، ژئومورفولوژی، خاک، پوشش گیاهی و عوامل انسانی در محیط GIS، نقشه پیش‌بینی مناطق افت آب‌های زیرزمینی در آینده به روش کوکریجینگ نقطه‌ای تهیه شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که بیشترین احتمال فرونشست دشت اردبیل در آینده به دلیل برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی در قسمت جنوب شرقی و غرب اتفاق خواهد افتاد [۱۵]. بابایی و همکاران در سال ۱۳۹۵ در کار پژوهشی خود به بررسی فرونشست اتفاق افتاده در دشت قزوین بین سال‌های ۲۰۰۳ تا

حتی بدون ارزیابی نتایج ارائه و تحلیل می‌شدند، برای ارزیابی نتایج به دست آمده از داده‌های راداری انویست از همبستگی بین دو مسیر بالاگذر و پایین‌گذر استفاده شده است. میزان همبستگی بین دو مسیر در داخل محدوده تحقیق ۷۰ درصد به دست آمده است. استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای ارزیابی نتایج این مزیت را دارد که تأثیرات خطای داده‌های زمینی در آن‌ها وجود ندارد. مزیت دیگر استفاده از دو مسیر بالاگذر و پایین‌گذر این است که با این روش دوره زمانی استفاده از داده‌های انویست را تا پنج سال در مقایسه با تحقیق قبلی در این منطقه افزایش داده است.

## ۲. تکنیک تداخل‌سنجی راداری

نقش و اهمیت ماهواره‌ها طوری است که دیگر جزء لاینفک زندگی بشر امروز محسوب می‌شوند. هیچ‌گاه حیات بشری به اندازه امروز به گردش این قمرهای مصنوعی وابسته نبوده است. تصاویر ماهواره‌ای بخش مهمی از خدمات ماهواره‌ها محسوب می‌شوند. تصاویر رادار اغلب یکی از چند طول‌موج در محدوده مایکروویو را پوشش می‌دهند. تصاویر رادار فعال محسوب می‌شوند به همین دلیل در روز و شب و در هوای بارانی نیز قابلیت تصویربرداری دارند [۱۹].

در سال‌های اخیر تکنیک تداخل‌سنجی راداری به تکنیکی با استفاده گسترده در زمینه اندازه‌گیری توپوگرافی و جابه‌جایی سطح زمین تبدیل شده است [۲۰]. با این تکنیک می‌توان جابه‌جایی و تغییر شکل‌های زمین ناشی از زمین‌لرزه، آتشفشان، زمین‌لغزش، استخراج منابع زیرزمینی، پدیده تحکیم و خزش را برآورد کرد [۲۱].

تصاویر رادار با دهانه مصنوعی شامل هر دو اطلاعات شدت و فاز سیگنال‌های برگشتی از سطح زمین هستند. تداخل‌سنجی راداری تکنیکی است که در آن از دو تصویر با دهانه مصنوعی که از منطقه مشابهی از زمین با موقعیت‌های مختلف ماهواره به دست می‌آیند، برای تولید یک اینترفروگرام<sup>۷</sup> استفاده می‌شود که نشان‌دهنده اختلاف فاز بین سیگنال‌های بازگشتی در دو تصویر است [۲۰]. هر دو تصویر داده‌های دامنه و فاز تشعشعات بازگشتی از سطح زمین را ثبت می‌کند.

اطلاعات فاز که در یک تصویر وجود دارد، می‌تواند برای تعیین مکان یک نقطه از سطح زمین مورد استفاده قرار گیرد [۲۰]. در این روش پیکسل‌هایی مانند تصاویر با دهانه مصنوعی با یکدیگر مقایسه شده و اختلاف فاز آن‌ها محاسبه می‌شود. اختلاف فازهای به دست آمده خود به صورت یک تصویر جدید به نام اینترفروگرام ذخیره می‌شوند. یک اینترفروگرام شامل خطوط موازی شبیه خطوط منحنی میزان است که معرف اختلاف فاز هستند [۲۱]. این اختلاف فاز به علت توپوگرافی و تغییرات در جهت خط‌دید ماهواره<sup>۸</sup> به علت جابه‌جایی سطح و تغییر در طول مسیر انتشار است. این اختلافات فاز می‌تواند به یک مدل رقومی ارتفاعی<sup>۹</sup> تبدیل شود اگر داده‌های مداری خیلی دقیق ماهواره در دسترس باشد. این تکنیک می‌تواند برای اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح زمین با دقت بالا و نقشه‌های توپوگرافی مورد استفاده قرار گیرد [۲۰].

بنابراین، فاکتورهای زیادی به‌عنوان مثال، فاصله بین آنتن و پیکسل زمینی، توپوگرافی سطح، مدارهای ماهواره، خصوصیت دی‌الکتریک سطح زمین، اتمسفر و نویز سیستم، همه بر روی اینترفروگرام تأثیر می‌گذارند. در روش تداخل‌سنجی تکرار مسیر، دو تصویر ثبت هندسی شده‌ای که از ماهواره بین عبورهای متعاقب با بیس‌لاین<sup>۱۰</sup> B، به دست آمده است برای اینترفروگرام مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصویر اول، تصویر مرجع<sup>۱۱</sup> نامیده می‌شود و تصویر دوم، تصویر فرعی<sup>۱۲</sup> نامیده می‌شود. لازم به توضیح است که در سیستم‌های تک‌گذر به دلیل اخذ هم‌زمان تصاویر، برخی از خطاها مانند خطاهای مداری، اتمسفری و غیره تا حد خوبی کاهش می‌یابد، اما در سیستم‌های چند عبوری همچنان اثرات ناشی از این خطا وجود دارد [۲۲]. فاز اینترفرومتریک (اختلاف فاز بین دو تصویر فاز ثبت هندسی شده) از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۳].

$$\Delta\phi = \phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{flat}} + \phi_{\text{disp}} + \phi_{\text{orbit}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{noise}} \quad (1) \text{ معادله}$$

در اینجا  $\phi_{\text{topo}}$  علامت فاز توپوگرافی،  $\phi_{\text{flat}}$  فاز زمین مسطح به علت هندسه تصویربرداری،  $\phi_{\text{disp}}$  الگوی جابه‌جایی‌های مختلف،  $\phi_{\text{orbit}}$  خطای فاز به علت پارامترهای مداری

منظور تصاویر ماهواره انویست متعلق به مدار بالاگذر ۲۲۸ در بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ و مدار پایین‌گذر متعلق به مسیر ۴۶۴ در بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ مورد پردازش قرار گرفت. در جدول (۱) به معرفی برخی از مشخصات ماهواره انویست و سنجنده ای سار پرداخته شده است. آنالیز نتایج حاصله با اطلاعات تراز آبی منطقه در بازه زمانی مشابه نشان‌دهنده وابستگی شدید بین کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و پدیده فرونشست است.

جدول ۱. مشخصات ماهواره انویست و سنجنده ای سار

تاریخ پرتاب	۱ مارس ۲۰۰۲
مدار	خورشید آهنگ
ارتفاع	۷۹۰ کیلومتر
زاویه میل	۹۸/۵۲
دوره	۱۰۱ دقیقه
تکرار مدار	۳۵ روزه
سنجنده راداری	ASAR
فرکانس	باند C با فرکانس ۵/۳۳۱ گیگاهرتز
طول موج	۵۶/۶ میلی‌متر
پلاریزاسیون	VV or HH
زاویه برخورد	۱۵ تا ۴۵/۲ درجه
رزولوشن مکانی	۳۰

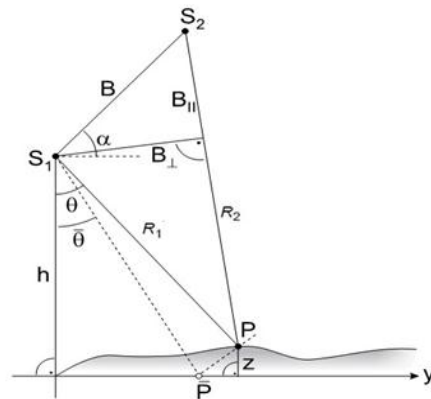
تکنیک تداخل سنجی راداری به منظور محاسبه جابه‌جایی ناشی از تغییرات سطح زمین مانند فرونشست از جفت تصویر راداری که از یک منطقه و در زمان‌های متفاوت برداشت شده‌اند استفاده می‌کند. در واقع تکنیک تداخل سنجی راداری با محاسبه اختلاف فاز بین یک پیکسل در زمان‌های مختلف از منطقه میزان جابه‌جایی پیکسل مربوطه را تخمین می‌زند، [۲۲] به این صورت که، در ابتدا پس از فراهم کردن زوج تصاویر ماهواره انویست و مشخص کردن تصاویر فرعی و اصلی عملیات ثبت هندسی روی تصاویر صورت می‌گیرد. در ادامه با تشکیل اینترفروگرام‌ها، آنالیز سری زمانی آن‌ها با روش پراکنش‌کننده دائمی<sup>۲</sup> صورت می‌گیرد. مدلی که برای فاز هر اینترفروگرام برآورد شده در حالت کلی در نظر گرفته می‌شود به صورت معادله شماره ۱ است. [۲۳، ۲۴]

غیردقیق،  $\phi_{atm}$  تأثیرات اتمسفری و  $\phi_{noise}$  به توزیع نویز مربوط می‌شود [۲۴]. در منابع بسیاری فاز اینترفرومتریک به صورت زیر بیان شده است [۲۳]:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta D_0 + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{HB^\perp}{R \sin\theta} + \frac{4\pi}{\lambda} B_{||} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{dielectric} + \Delta\phi_{pn} + 2n\pi$$

معادله (۲)

در اینجا  $\Delta D_0$  جابه‌جایی خط‌دید (LOS) (جابه‌جایی سطح در جهت بین ماهواره و پیکسل زمینی است)،  $\lambda$  طول موج سیستم SAR،  $B_{||}$ ،  $B^\perp$  به ترتیب اجزای موازی و عمودی جدایی مدار بیس‌لاین در جفت تصویر SAR است.  $H$  ارتفاع یک پیکسل بالای یک صفحه مرجع،  $R$  فاصله مایل بین پیکسل زمینی و آنتن در تصویر اصلی است.  $\theta$  زاویه برخورد محلی، در واقع زاویه بین اشعه رادار و یک خط عمود بر سطح در نقطه برخورد است [۲۳]. در شکل (۱) هندسه تداخل سنجی راداری نشان داده شده است.

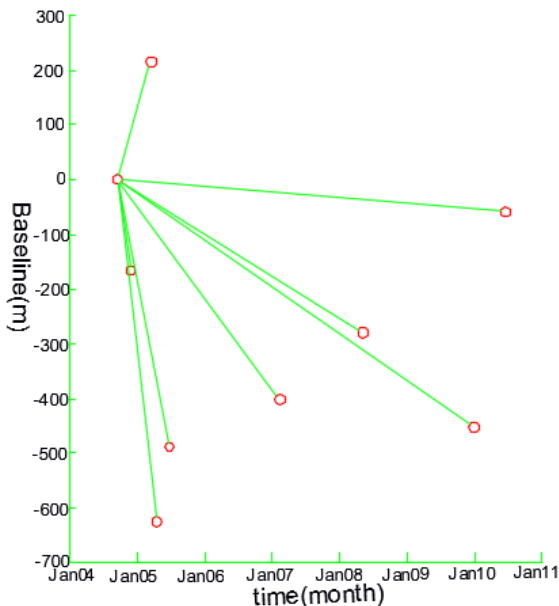
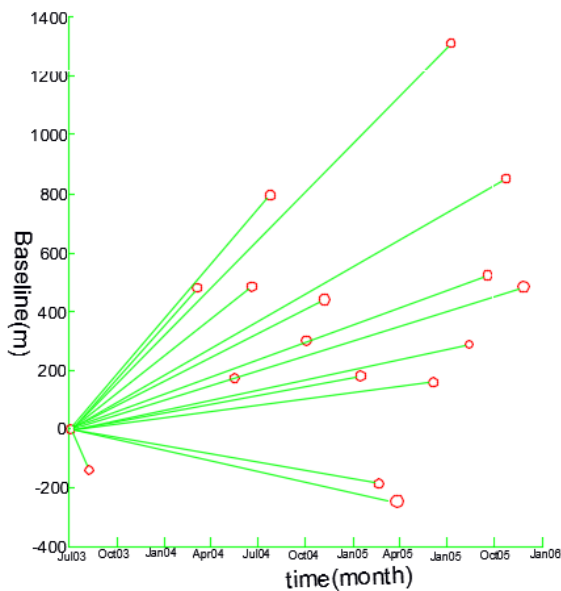


شکل ۱. هندسه تداخل سنجی راداری [۱]

### ۳. مواد و روش‌ها

به منظور تعیین محدوده و نرخ فرونشست دشت خرمدره در استان زنجان، از روش تداخل سنجی راداری استفاده شده است. در این پژوهش سعی بر این است تا نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری دشت خرمدره به صورت نقشه فرونشست ارائه شود. از آنجا که در برخی از مناطق دارای فرونشست، تغییرات زمانی سرعت نیز مطرح است، علاوه بر تعیین نرخ و محدوده فرونشست به بررسی تغییرات نرخ فرونشست در طول زمان نیز پرداخته شده است. به همین

در شکل (۲) محور افقی خط مبنای زمانی و محور قائم خط مبنای قائم را نشان می‌دهد. هر نقطه نشان‌دهنده یک تصویر و خط نمایانگر یک تداخل سنج است. شکل سمت چپ مربوط به ۹ تصویر راداری متعلق به مسیر بالاگذر ۲۲۸ و شکل سمت راست مربوط به ۱۷ تصویر راداری متعلق به مسیر پایین گذر ۴۶۴ است که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۲. خط مبنای مکانی و زمانی تصاویر مورد استفاده

### ۳-۱. منطقه مورد مطالعه

شهرستان خرمدره در ۴۹ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی نصف النهار مبدأ و ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۰ دقیقه شمالی خط استوا قرار گرفته است.

مدل ارائه شده نشان‌دهنده آن است که فاز برآورد شده ترکیبی از فاز جابه‌جایی، فاز مربوط به اثر توپوگرافی، فاز مربوط به اثر اتمسفر، اثر خطای مداری و اثر مربوط به نویز است. بنابراین ابتدا باید این فازها را برآورد کرده و از فاز تخمین زده شده کسر شود تا فاز صحیح جابه‌جایی حاصل شود. در ادامه پس از پردازش اینترفروگرام‌ها، اثرات زمین مسطح بایستی حذف شود که بعد از این مرحله عملیات بازیابی فاز<sup>۱۳</sup> انجام می‌شود تا جابه‌جایی تعیین شود و در انتها ژئوکدینگ<sup>۱۴</sup> انجام می‌گیرد، سپس به منظور محاسبه نرخ میدان جابه‌جایی در منطقه نقاط پراکنش کننده دائمی که دارای رفتار پایدار در دامنه و فازشان هستند، شناسایی می‌شوند و سری زمانی تغییر شکل با دقت بالا برای این نقاط محاسبه می‌شود.

با استفاده از روش پراکنش کننده‌های دائمی به آنالیز سری زمانی تصاویر راداری سنجنده ای سار در پکیج نرم‌افزاری استمپس<sup>۴</sup> پرداخته می‌شود و برای حذف سایر مؤلفه‌های مزاحم مانند فاز توپوگرافی، فاز مداری و خطای اتمسفری به ترتیب از داده‌های زیر کمک گرفته می‌شود:

- حذف فاز ناشی از توپوگرافی با استفاده از داده‌های مدل ارتفاع رقومی SRTM 90؛

- حذف فاز مداری و باقی مانده مداری با استفاده از اطلاعات مداری دقیق ODR و برآزش یک صفحه درجه یک. به همین منظور ۱۷ تصویر مدار پایین گذر متعلق به مسیر ۴۶۴ و ۹ تصویر مدار بالاگذر متعلق به مسیر ۲۲۸، به ترتیب برای تشکیل ۱۶ و ۸ تداخل سنج نسبت به یک تصویر اصلی به کار رفته است.

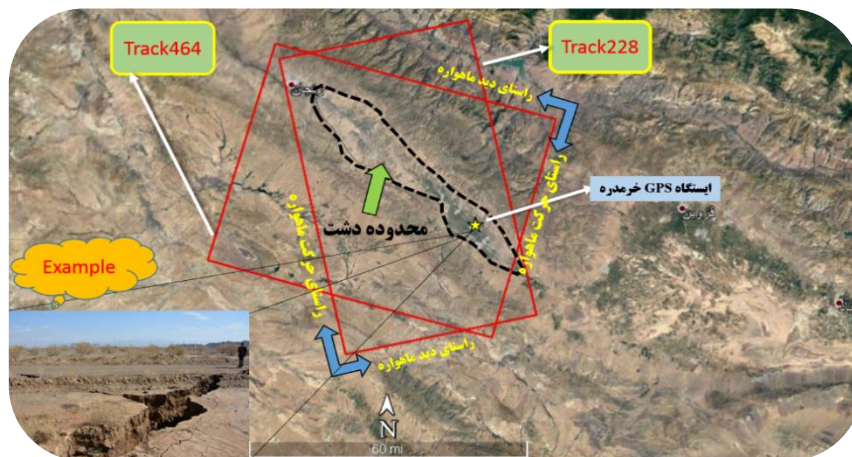
شکل (۲) نشانگر خط مبنای مکانی تصاویر اخذ شده در طول زمان است. در روش استمپس از روش تحلیل دامنه و فاز برای شناسایی پیکسل‌های پراکنش کننده‌های دائمی استفاده شد. به همین منظور آستانه استفاده شده برای شاخص پراکنندگی دامنه ۰/۴ انتخاب شد. این دامنه به صورتی تعیین می‌شود که احتمال انتخاب پراکنش کننده‌های واقعی را افزایش داده و احتمال انتخاب پیکسل‌های با فاز تصادفی کاهش یابد.

سجاس، ۶۵ سانتی متر در دشت قیدار و ۷۳ سانتی متر در دشت گل تپه زرین آباد افت دارند [۲۷].

بحرانی ترین دشت استان متعلق به دشت ابهر و خرمدره است که عمق چاه‌های آب زیرزمینی به‌طور میانگین سالانه یک متر و ۴۰ سانتی متر پایین می‌آید. در حال حاضر این دشت‌ها در حال فرونشست هستند و ممکن است در این مناطق شاهد زلزله خاموش باشیم (مدیرعامل شرکت آب منطقه‌ای استان زنجان، ۱۳۹۶)

در شکل (۳) موقعیت منطقه مورد مطالعه با خط‌چین‌های سیاه مشخص شده است. کادراه‌های مستطیلی قرمز متعلق به مسیرهای ۲۲۸ (بالاگذر) و ۴۶۴ (پایین گذر) ماهواره انویست است که بر روی تصویر گوگل ارث رسم شده‌اند. موقعیت ایستگاه تعیین موقعیت خرمدره با نماد ستاره در تصویر مشخص شده است.

وسعت آن ۵/۳۹۴ کیلومتر مربع و کوچک‌ترین شهرستان استان زنجان است. بلندترین ارتفاع ۳۰۰۰ متر واقع در ارتفاعات الوند و کمترین ارتفاع که تقریباً اکثر نقاط شهرستان را شامل می‌شود، برابر ۱۵۰۰ متر است. ارتفاع این شهرستان از سطح دریا ۱۵۷۵ متر است. این شهرستان در قسمت جنوبی استان زنجان واقع شده که از شمال به استان قزوین و از شرق و غرب به شهرستان ابهر و از جنوب به شهرستان خدابنده محدود می‌شود [۲۶]. برداشت بی‌رویه از سفره‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی موجب فرونشست زمین در اغلب دشت‌های کشور و استان زنجان شده است. زنجان هفت دشت دارد که پنج دشت از آن به‌عنوان مناطق ممنوعه استخراج آب زیرزمینی اعلام شده است و هر نوع برداشتی از سفره‌های زیرزمینی آن‌ها با برخورد قانونی مواجه خواهد شد. این دشت‌ها به‌طور متوسط ۵۵ سانتی متر در دشت زنجان، ۱۴۴ سانتی متر در دشت ابهر، ۵۱ سانتی متر در دشت



شکل ۳. موقعیت منطقه مورد مطالعه به همراه نمایی از داده‌های مورد استفاده

متعلق به مسیر ۲۲۸ بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ مورد استفاده قرار گرفت. مدار پایین گذر یعنی این که ماهواره مسیر کره زمین را از شمال شرقی به سمت جنوب غربی طی می‌کند و دید راداری ماهواره (آنتن) به سمت غرب است و به همین ترتیب مدار بالاگذر یعنی این که ماهواره مسیر کره زمین را از جنوب شرقی به سمت شمال غربی طی می‌کند و دید ماهواره (آنتن) به سمت شرق است. زاویه دید برای هر دو مسیر در راستای مایل تقریباً ۲۳/۵ درجه و طول موج تصاویر ۵۶ میلی‌متر است.

### ۲-۳. داده‌های راداری مورد استفاده

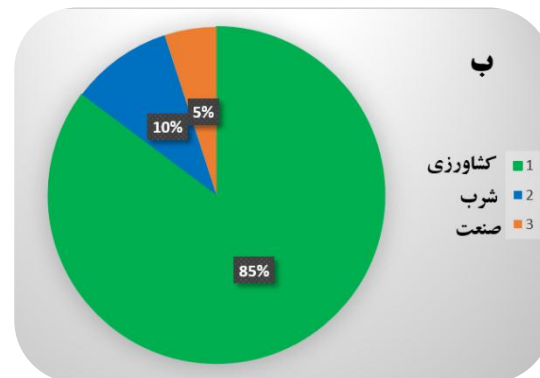
داده‌های راداری مورد استفاده، شامل دو مجموعه تصاویر سنجنده پیشرفته راداری پهلونگر با دریچه مصنوعی (ASAR) مربوط به مسیر پایین گذر ۴۶۴ و بالاگذر ۲۲۸ که روی ماهواره انویست قرار دارد، می‌باشند. داده‌ها توسط آژانس فضایی اروپا (<http://earth.eas.int>) و دانلود با نرم‌افزار EOLI-SA در اختیار این پژوهش قرار گرفت. در نهایت ۱۷ تصویر راداری مدار پایین گذر متعلق به مسیر ۴۶۴ اخذ شده بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ و ۹ تصویر راداری مدار بالاگذر



### ۳-۳. وضعیت مصرف منابع آب‌های زیرزمینی دشت

#### زنجان

به منظور بررسی اهمیت منابع آب زیرزمینی شامل چاه، چشمه و قنات از نظر مصرف در دشت زنجان، از آمار منابع آب موجود در این دشت استفاده شده است. با توجه به نتایج، تعداد ۱۸۵۲۳ حلقه چاه عمیق و کم عمق، ۶۵۲۸ دهنه چشمه و ۷۹۲ رشته قنات در محدوده مورد بررسی وجود دارند که در مجموع ۱۲۵۵/۳۳ میلیون مترمکعب از آب‌های زیرزمینی را تخلیه می‌کنند. بخش اعظم آب‌های به دست آمده از چاه‌ها و چشمه‌ها صرف آبیاری کشاورزی می‌شود.



شکل (۴) الف) نوع، میزان و مصرف منابع آب در دشت زنجان ب) نوع و میزان تخلیه منابع آب از آبخوان دشت زنجان

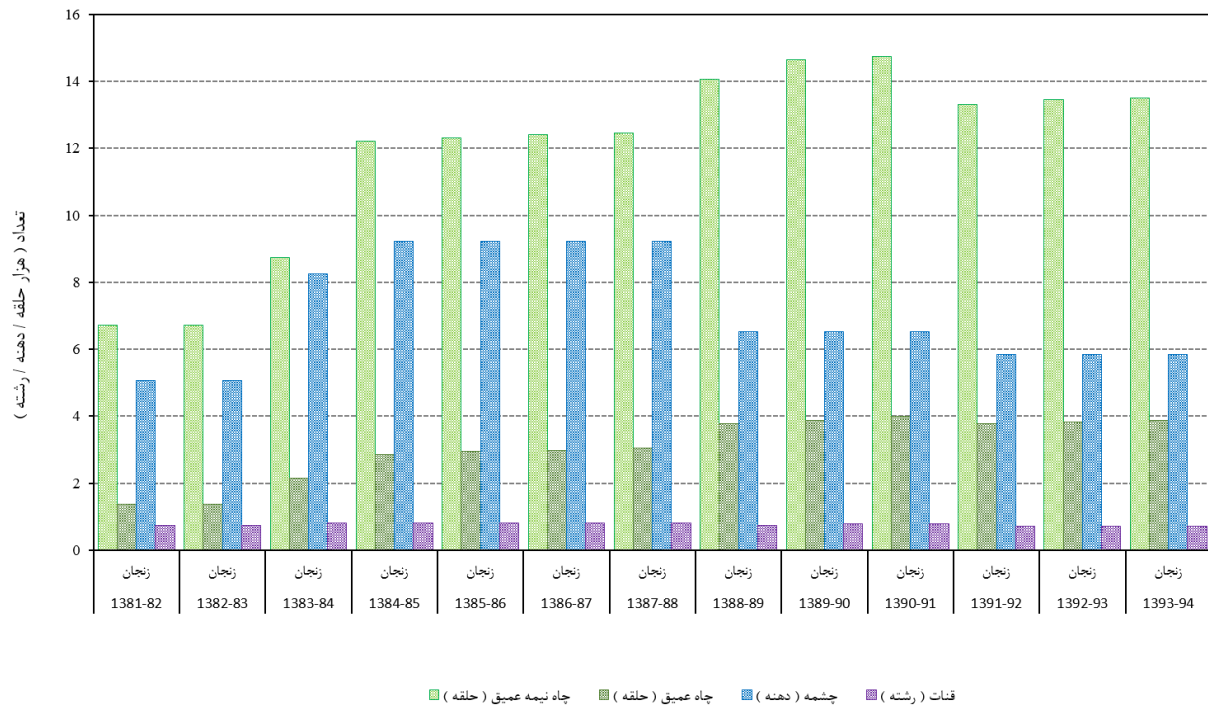
با توجه به شکل (۴) حدود ۸۲ درصد از آب برداشت شده به وسیله چاه‌ها، ۱۴ درصد از آب تخلیه شده توسط چشمه‌ها و ۴ درصد توسط قنات تخلیه می‌شود و در مجموع بیش از ۸۵ درصد از آب حاصله از این منابع آب زیرزمینی صرف مصارف کشاورزی می‌شود. بنابراین کاملاً واضح است که

بیشترین آب مصرفی در منطقه مربوط به کشاورزی بوده که در این بین، چاه‌ها مهم‌ترین نقش را در تأمین آب مورد نیاز کشاورزی ایفا می‌کنند.

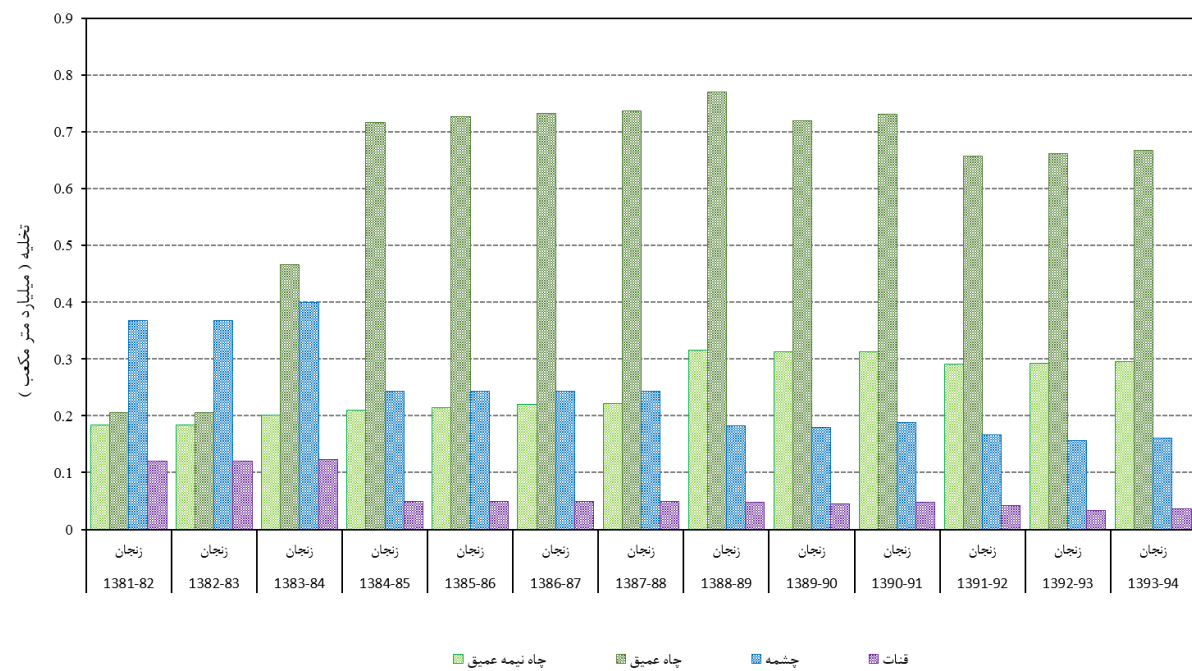
شکل (۵) تغییرات تعداد چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات‌های استان زنجان را در طول سال‌های ۸۱ تا ۹۴ نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودارها مشخص است، چاه‌ها بیشترین سهم را در تأمین منابع آب زیرزمینی دارند. تعداد چاه‌های نیمه عمیق از ۶۷۱۱ دهنه در سال ۸۱ به ۱۳۵۰۶ دهنه در سال ۹۴ و تعداد چاه‌های عمیق از ۱۳۷۶ دهنه در سال ۸۱ به ۳۸۶۵ دهنه در سال ۹۴ رسیده است. با توجه به افزایش بهره‌برداری از منابع زیرزمینی این تغییرات کاملاً مشخص است.

شکل (۶) تغییرات مقدار تخلیه از چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات‌های استان زنجان را نشان می‌دهد. طبق آمار منتشر شده از سازمان آب منطقه‌ای استان، میزان تخلیه از چاه‌های نیمه عمیق از ۱۸۳/۳۳ میلیون مترمکعب در سال ۸۱ به ۲۹۵/۶۳ میلیون مترمکعب در سال ۹۴ و چاه‌های عمیق از ۲۹۵/۹۸ میلیون مترمکعب در سال ۸۱ به ۶۶۷/۳۳ میلیون مترمکعب در سال ۹۴ افزایش یافته است و چشمه‌ها از ۳۶۷/۷۳ میلیون مترمکعب در سال ۸۱ به ۱۶۱/۲۵ میلیون مترمکعب در سال ۹۴ و قنات‌ها از ۱۱۹/۷۸ میلیون مترمکعب در سال ۸۱ به ۳۵/۶۱ میلیون مترمکعب در سال ۹۴ کاهش یافته است.

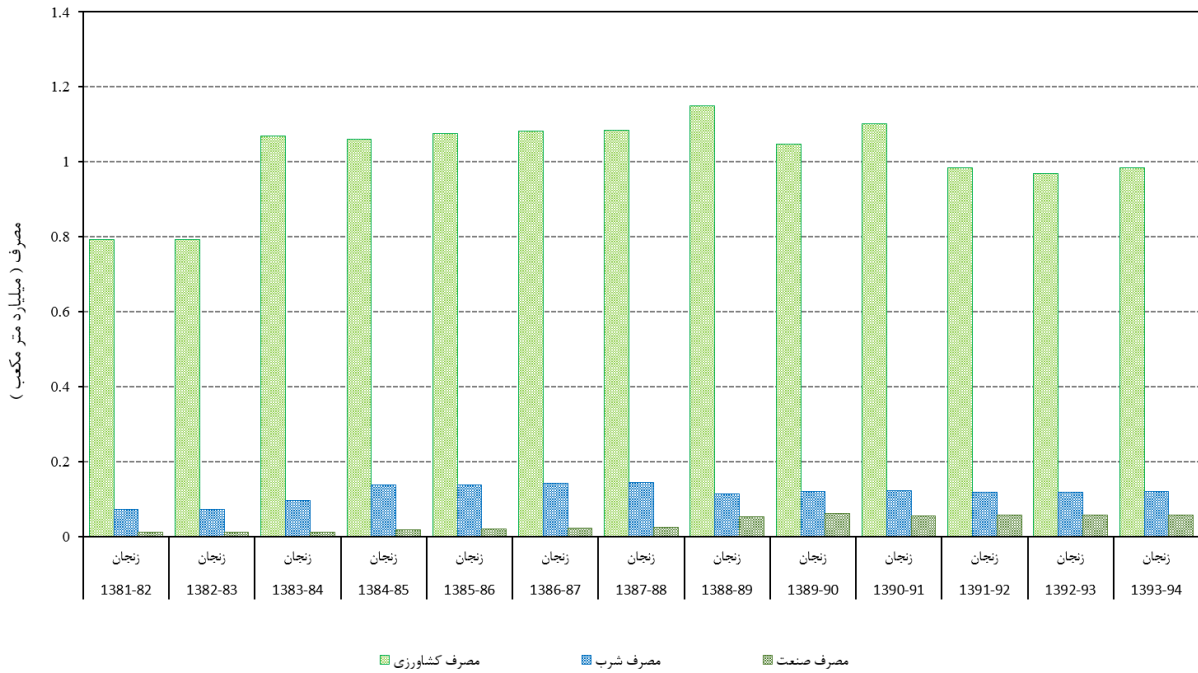
شکل (۷) تغییرات میزان مصرف از منابع آب زیرزمینی استان زنجان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودارها مشخص است بیشترین میزان مصرف از منابع آب زیرزمینی استان در طول سال‌های ۸۱ تا ۹۴ صرف مصارف کشاورزی می‌شود. طبق آمار منتشر شده از سازمان آب منطقه‌ای استان از ۸۷۶/۸۱ میلیون مترمکعب تخلیه کل از منابع آب زیرزمینی در سال ۸۱، ۷۹۳/۲۶ میلیون مترمکعب آن صرف مصارف کشاورزی می‌شود که این مقدار در سال ۹۴ از ۱۱۵۹/۸۲ میلیون مترمکعب تخلیه کل از منابع آب زیرزمینی، ۹۸۳/۷۲ میلیون مترمکعب را به خود اختصاص داده است.



شکل ۵. تغییرات تعداد چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات استان زنجان بین سال‌های ۸۱ تا ۹۴

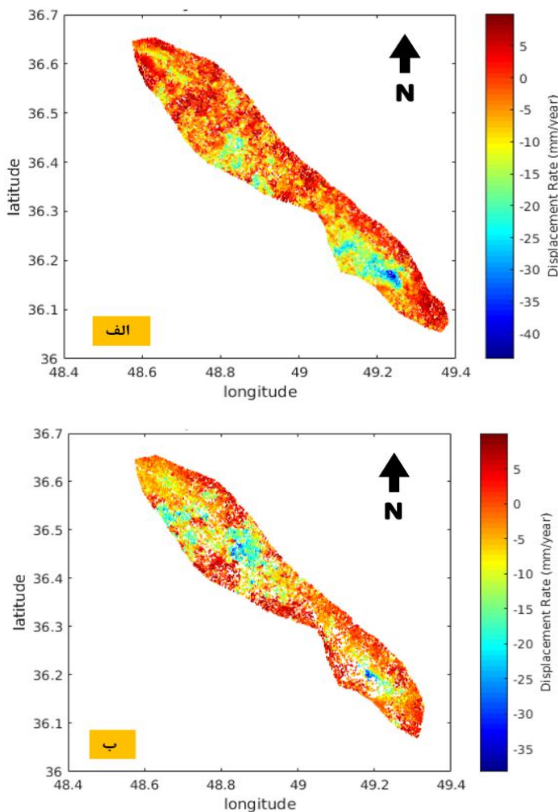


شکل ۶. تغییرات مقدار تخلیه از چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات استان زنجان بین سال‌های ۸۱ تا ۹۴



شکل ۷. تغییرات میزان مصرف از منابع آب زیرزمینی استان زنجان بین سال‌های ۸۱ تا ۹۴

بدین منظور پیکسل‌های پایدار در هر دو مسیر، در محدوده دشت خرمدره، شناسایی شدند شکل منطقه برش داده شده، محاسبه همبستگی مداری را نشان می‌دهد. پیکسل‌های



شکل ۸. نقشه نرخ متوسط فرونشست سالانه دشت خرمدره

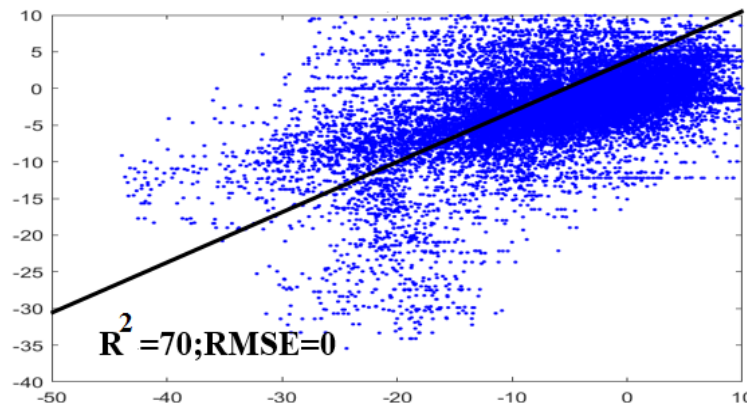
#### ۴. یافته‌ها

در این تحقیق تصاویر ماهواره انویست اخذ شده از سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ و ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵، با استفاده از بسته نرم‌افزاری استمپس پردازش و بر اساس پراکنش گرهای پایدار، آنالیز سری زمانی انجام شد. نقشه نهایی نرخ متوسط فرونشست به دست آمده از این روش، در شکل (۸)، نشان داده شده است. در شکل (۸) تصویر سمت راست (الف) مربوط به مسیر ۲۲۸ و تصویر سمت چپ (ب) مربوط به مسیر ۴۶۴ است. مقادیر منفی شکل (۸)، نشان‌دهنده جابه‌جایی در راستای دور شدن از ماهواره است. بنابراین با توجه به این نقشه، بیشینه نرخ متوسط تغییر شکل در منطقه مورد مطالعه در بین سال‌های (۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵) ۳۵ میلی‌متر بر سال و در بین سال‌های (۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰) ۴۰ میلی‌متر بر سال در راستای دور شدن از ماهواره در جهت خط دید ماهواره است.

#### ۴-۱. اعتبارسنجی نتایج به دست آمده

بعد از محاسبه فرونشست و تعیین نرخ جابه‌جایی در مناطق مورد نظر با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، با توجه به استفاده از مدارهای بالاگذر و پایین‌گذر، از همبستگی بین این دو مسیر به منظور ارزیابی نتایج به دست آمده استفاده شد.

مقادیر مانند آن در مسیر ۴۶۴ به دست آمد و محاسبه همبستگی بین دو مسیر امکان پذیر شد. شکل (۹) همبستگی بین دو مسیر ۲۲۸ و ۴۶۴ را نشان می دهد. همان طور که در شکل مشخص است نتایج نشان دهنده همبستگی ۷۰ درصدی در داخل محدوده مورد مطالعه است.



شکل ۹. همبستگی بین مدار بالاگذر ۴۶۴ و پایین گذر ۲۲۸

بررسی نمودارها نشان دهنده این موضوع است که ارتباط مستقیمی بین افت تراز آب و ایجاد فرونشست در منطقه وجود دارد. این مسئله اهمیت توجه به بهره برداری های بی رویه از منابع آب زیرزمینی در این منطقه، استفاده از روش های نوین آبیاری در مزارع، استفاده بهینه از منابع آب و صرفه جویی در مصرف آب برای مصارف خانگی و صنعتی را به خوبی آشکار می سازد. موقعیت چاه های پیزومتریک مورد بررسی نیز در شکل (۱۰)، نشان داده شده است. در شکل (۱۰) نقاط ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ایستگاه های باغ پروفوسور عدل، نصیرآباد و سوکهریز در داخل محدوده مطالعاتی فرونشست را نشان می دهد.



شکل ۱۰. موقعیت چاه های پیزومتری مطالعاتی در سه نقطه باغ پروفوسور عدل (۱)، نصیرآباد (۲)، سوکهریز (۳)

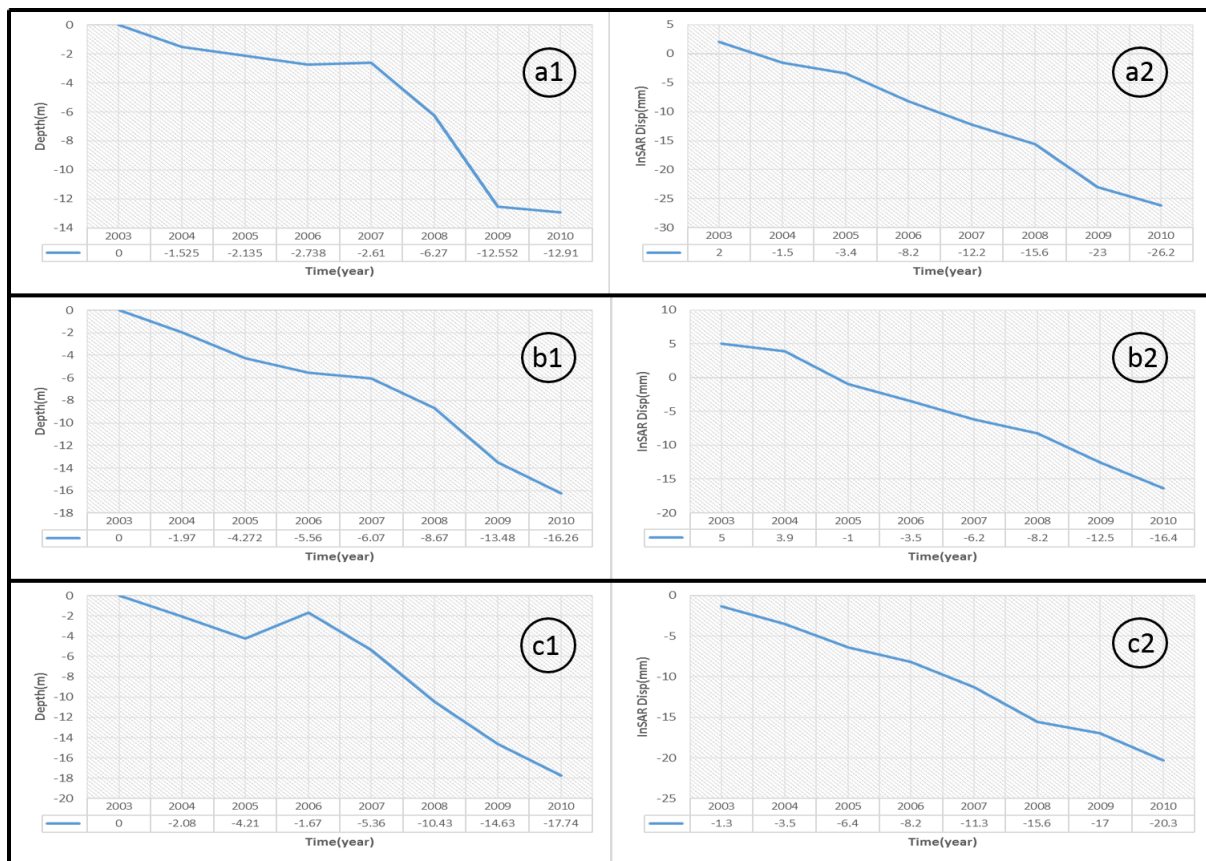
شناسایی شده در مسیر ۲۲۸، ۱۶۴۶۳ مورد و در مسیر ۴۶۴، ۱۹۴۴۱ مورد شناسایی شدند. از آنجا که تعداد پیکسل های شناسایی شده در هر مسیر از نظر تعداد و موقعیت با همدیگر یکسان نبودند، به منظور محاسبه همبستگی بین این دو مسیر پیکسل های شناسایی شده در مسیر ۲۲۸، در مسیر ۴۶۴ درون یابی شد. در نهایت به ازای هر پیکسل در مسیر ۲۲۸

#### ۵. سری زمانی چاه های پیزومتری

برای بررسی ارتباط بین برداشت آب های زیرزمینی و افت سطح تراز آب با ایجاد فرونشست در منطقه، اطلاعات به دست آمده از چاه های پیزومتری (باغ پروفوسور عدل، نصیرآباد و سوکهریز) موجود در منطقه مورد مطالعه، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. شکل (۱۱) سری زمانی مربوط به جابه جایی ها برای نقاط انتخاب شده در محل پیزومترها و داده های ثبت شده به وسیله چاه های پیزومتری موجود در منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.

با توجه به اطلاعات ثبت شده در این ایستگاه ها، افت تراز آب به ترتیب برابر با ۱۳، ۱۶/۵ و ۱۸ متر است. نتایج حاصل از

در شکل (۱۰) کادر قرمز نشان‌دهنده منطقه برش داده شده برای محاسبه همبستگی بین مدار بالاگذر ۲۲۸ و پایین‌گذر ۴۶۴ است.



شکل ۱۱. سری زمانی حاصل از تداخل‌سنجی راداری و چاه‌های پیزومتر

فرونشست پیوسته و قابل ملاحظه‌ای در این منطقه در حال اتفاق افتادن است. سری زمانی تداخل‌سنجی پراکنش‌کننده دائمی مربوط به مسیر ۲۲۸ بیشینه دامنه فرونشستی حدود ۴۰ میلی‌متر در سال را بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ و مسیر ۴۶۴ بیشینه دامنه فرونشستی حدود ۳۵ میلی‌متر در سال را بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ مشخص می‌کند و نتایج هر دو هم‌خوانی خیلی خوبی با همدیگر دارند.

با توجه به مباحثی که مطرح شد، نشان داده می‌شود که روش تداخل‌سنجی راداری قابلیت مناسبی را در تعیین نرخ و الگوی فرونشست در داخل محدوده مورد مطالعه دارد. خشکی محیط ناحیه، اثر تغییر فاز ناشی از ترکیبات اتمسفری به‌ویژه مسئله رطوبت را تعدیل می‌کند و دقت مناسبی از سنجش اختلاف‌فاز ناشی از جابه‌جایی سطح را فراهم می‌آورد. همچنین، فقدان پوشش گیاهی چالش‌ناهمدوسی در فاز تصاویر راداری را به حداقل رساند و امکان سنجش

در شکل (۱۱) نمودارهای a1 و b1 به ترتیب سری زمانی تغییرات تراز سطح آب اندازه‌گیری شده با چاه‌های پیزومتری در مناطق باغ پروفوسور عدل، نصیرآباد و سوکهریز را نشان می‌دهد. نمودارهای a2، b2 و c2 به ترتیب سری زمانی فرونشست اندازه‌گیری شده با استفاده از تداخل‌سنجی راداری در همان مناطق است.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، قابلیت روش تحلیل سری زمانی پراکنش‌کننده دائمی در تعیین نرخ و الگوی منطقه تحت‌تأثیر فرونشست در دشت خرمدره به تصویر کشیده شده است. داده‌های راداری مورداستفاده، شامل دو مجموعه داده سنجنده انویست ای سار مربوط به گذرپایین مسیر ۴۶۴ و گذر بالا مسیر ۲۲۸ هستند که پردازش سری زمانی پراکنش‌کننده دائمی روی آن‌ها صورت گرفت، بعد از حذف منابع خطا از روی نتایج این سری‌های زمانی مشخص شد که

استان زنجان به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های تراز چاه‌های پیزومتری تشکر و قدردانی می‌کنند.

### مراجع

[۱] اکبری وحید. نظارت بر فرونشست زمین ناشی از استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در دشت مشهد با استفاده از سری زمانی تکنیک تداخل‌سنجی راداری و مقایسه با مشاهدات ژئودتیک [پایان‌نامه کارشناسی ارشد]. تهران: دانشکده فنی مهندسی؛ دانشگاه تهران؛ ۱۳۸۷.

[2] USGS (United State Geological Survey)[Internet]. Research and Review Information Located Assess on September 2011. Available from <http://water.usgs.gov/ogw/pubs/fs00165>

[۳] تابناک. در مورد فرونشست زمین بیشتر بخوانید [اینترنت]. نشانی اینترنتی:

<https://www.tabnak.ir/fa/tags/16668/1/> فرونشست-زمین

[۴] فولادی مقدم، نگین. آشکارسازی تغییر شکل سطحی بر پایه تداخل‌سنجی تفاضلی رادار در میدان نفتی آغاجاری. مجله علوم زمین. تابستان ۹۰؛ ۸۰(۲۰): ۱۰۳-۱۱۲.

[5] Qiu Z, Jiang T, Zhou L, Wang C, Luzi G. Study of subsidence monitoring in Nanjing City with small-baseline InSAR approach. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2019 Jan 1;10(1):1412-24.

[6] Hu B, Yang B, Zhang X, Chen X, Wu Y. Time-Series Displacement of Land Subsidence in Fuzhou Downtown, Monitored by SBAS-InSAR Technique. *Journal of Sensors*. 2019 May 19;2019.

[7] Zhang Y, Liu Y, Jin M, Jing Y, Liu Y, Liu Y, et al. Monitoring land subsidence in Wuhan city (China) using the SBAS-InSAR method with radarsat-2 imagery data. *Sensors*. 2019 Jan;19(3):743.

[8] شریفی کیا محمدرضا. تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق-بهرمان. برنامه‌ریزی و آمایش فضا. ۱۳۹۱؛ ۳(۱۶): ۵۵-۷۷.

تغییرات فاز در بازه‌های زمانی سالانه برای داده‌های C BAND را میسر کرد. این یافته تأکید بر کارایی این روش و داده‌های موردبحث برای مطالعه تغییرات سطحی پوسته زمین در اغلب نواحی کشور است. یافته‌های حاصل از به‌کارگیری این روش نشان داد که تغییرات سطح چاه‌های پیزومتری یا در واقع برداشت آب زیرزمینی ارتباط تنگاتنگی با فرونشست زمین دارد. مهم‌ترین علت فرونشست منطقه‌ای سطح زمین در حوزه‌های رسوبی مناطق خشک و نیمه‌خشک، تراکم سفره‌های آب زیرزمینی در اثر استخراج بی‌رویه از این منابع است. در این مناطق برای رفع نیاز آبی فعالیت‌های کشاورزی، شرب و صنعتی به استخراج از منابع زیرزمینی روی می‌آورند. با کاهش سطح ایستایی آب و به تبع آن کاهش میزان فشار منفذی در اثر نیروی وزن لایه‌های رویی شاهد کاهش ضخامت در لایه‌های آبدار هستیم و خلل و فرج موجود در آن‌ها آرایش و چیدمان جدیدی پیدا می‌کنند؛ اگر این خلل و فرج بر اثر آب حاصل از بارندگی یا رودخانه‌های موقتی بر شود نتیجه آن کاهش سرعت فرونشست در منطقه است. درحالی‌که در منطقه دشت خرمدره در سال‌های اخیر نزولات جوی به حدی نبوده است که بتواند خلل و فرج ناشی از آب‌های زیرزمینی را پر کند و در نتیجه فرونشست در دشت رخ داده است.

به‌عنوان راهکار درازمدت بر مبنای تجربه سایر کشورها چاره‌ای جز اصلاح روش‌های مدیریت منابع آب وجود ندارد و تا زمان باقی است باید به سوی آن حرکت شود. اما تا آن هنگام و به‌عنوان راهکار فوری و اضطراری دست کم می‌توان به جلوگیری از ادامه فعالیت استفاده‌کنندگان غیرمجاز و چاه‌های حفر شده به این روش مبادرت ورزید. در غیر این صورت و با روند موجود ضمن از دست دادن بخش عظیمی از منابع آب برای همیشه، پدیده‌هایی مانند فروچاله‌ها و فرونشست‌های ناحیه‌ای با ابعاد نامعلوم و با آسیب‌های جبران‌ناپذیر، باز هم به وقوع خواهد پیوست.

### ۷. سپاسگزاری

مؤلفان این مقاله از آژانس فضایی اروپا به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های راداری انویست و شرکت آب منطقه‌ای

- دشت قزوین. نشریه علمی پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری. ۱۳۹۵؛ ۵(۴).
- [۱۷] زهرا حاجب. بررسی فرونشست دشت قم با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. مجموعه مقاله‌های هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران؛ اردیبهشت ۱۳۹۷. ص. ۳۵۲-۳۵۵.
- [۱۸] احمدی نعیمه. مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن. مجله سنجش‌ازدور و GIS ایران. پاییز ۱۳۹۷؛ ۱۰(۳).
- [۱۹] شرکت آرکا. تصاویر ماهواره‌ای و انواع آن [اینترنت]. مطالب تخصصی؛ سپتامبر ۲۰۱۷؛ نشانی اینترنتی: [www.arcamap.com](http://www.arcamap.com) / تصاویر-ماهواره-ای-و-انواع-آن
- [20] Singh LP. Application of SAR interferometry in landslide studies with special reference to generation of input data for statistical susceptibility assessment. Netherlands: ITC; 2003.
- [۲۱] امین جعفری سعید. پایش و مدل‌سازی تغییر شکل و جابه‌جایی سدهای خاکی با ترکیب روش تداخل‌سنجی تصاویر راداری و روش‌های عددی (آنالیز المان محدود) [پایان‌نامه کارشناسی ارشد]. تهران: دانشکده فنی مهندسی؛ دانشگاه تهران؛ ۱۳۹۳.
- [۲۲] سعادت‌مند یحیی. تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و عوامل مؤثر بر آن [سمینار کارشناسی ارشد]. زنجان: دانشکده فنی مهندسی، گرایش ژئودزی؛ دانشگاه زنجان؛ ۱۳۹۵.
- [23] Zhou X, Chang NB, Li S. Applications of SAR interferometry in earth and environmental science research. Sensors. 2009 Mar;9(3):1876-912.
- [24] Goudarzi MA. Detection and measurement of land deformations caused by seismic events using InSAR, sub-pixel correlation and inversion techniques [master's thesis]. University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC); 2010 Jan.
- [۹] حقیقت مهر پریسا. مطالعه فرونشست سطح زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی و چاه‌های نفتی به کمک تداخل‌سنجی راداری [پایان‌نامه کارشناسی ارشد]. تهران: دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک؛ دانشکده صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ ۱۳۸۶.
- [۱۰] محمدی آرمان. ارزیابی تراکم مخزن و فرونشست سطح میادین هیدروکربوی با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی رادار و مدل‌سازی ژئوماتیکی: مطالعه موردی میدان نفتی درود [پایان‌نامه کارشناسی ارشد]. شاهرود: مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود؛ ۱۳۸۹.
- [11] Anderssohn J, Wetzel HU, Walter TR, Motagh M, Djamour Y, Kaufmann H. Land subsidence pattern controlled by old alpine basement faults in the Kashmar Valley, northeast Iran: results from InSAR and levelling. Geophysical Journal International. 2008 Jul 1;174(1):287-94.
- [12] Dehghani M, Valadan Zoej MJ, Entezam I, Mansourian A, Saatchi S. InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. Geophysical Journal International. 2009 Jul 1;178(1):47-56.
- [۱۳] صالحی رضا. بررسی فرونشست دشت مهیار جنوبی با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. مجله مهندسی آبیاری و آب ایران. بهار ۱۳۹۳، ۱۱(۳)؛ ۴۷-۵۷.
- [۱۴] موسوی بفرئی‌سید مرتضی. استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری برای نظارت بر فرونشست زمین ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در دشت یزد- اردکان (۱۳۸۵-۱۳۹۰). وزارت علوم، تحقیقات و فناوری؛ دانشکده علوم پایه؛ دانشگاه یزد؛ ۱۳۹۲.
- [۱۵] امیراحمدی ابوالقاسم. تعیین مناطق فرونشست احتمالی دشت اردبیل با استفاده از GIS. نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی. زمستان ۱۳۹۲، مقاله ۱، ۱۷(۴۶)؛ ۱-۲۵.
- [۱۶] بابایی سید ساسان. آنالیز سری زمانی تصاویر راداری، با استفاده از روش‌های طول خط مبنا کوتاه (SBAS) و پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS) در تعیین نرخ فرونشست

[۲۵] فرمانداری شهرستان خرمدره. شهرستان خرمدره. شهرستان

خرمدره [اینترنت]. مارس ۲۰۲۰. نشانی اینترنتی:

[www.fa.Wikipedia.org/wiki/خرمدره](http://www.fa.Wikipedia.org/wiki/خرمدره)

[۲۶] رفعتی رؤیا. فرونشست زمین در کمین دشت های

زنجان [اینترنت]. مهر ۱۳۹۶. نشانی اینترنتی:

[www.irmna.ir/news/82704556/](http://www.irmna.ir/news/82704556/) در - زمین -

کمین - دشت های زنجان

### پی نوشت ها

1. ENVISAT
2. Persistent Scatterer(PS)
3. ASAR
4. Stamps
5. D-InSAR
6. GIS
7. Interferogram
8. Range
9. DEM
10. Baseline
11. Master image
12. Slave image
13. Phase Unwrapping
14. Geocoding