

Surface subsidence monitoring with radar interference technique (study area: Meshgin plain)

Hossein Nazmfar^{1*} , Munir Shirzad Gorjan² 

1. *Corresponding Author*, Professor, Department of Geography and Urban Planning, University of Mohaghegh Ardabili, Iran
2. PhD student in Geography and Urban Planning, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 23 July 2020

Revised: 29 December 2021

Accepted: 30 January 2022

Keywords:

Groundwater,

Radar Interference,

Meshgin Plain,

Subsidence.

Land subsidence is a phenomenon that has been on the rise in recent decades in most countries around the world, especially in third world countries such as Iran. In Iran, most land subsidence is related to agriculture and the uncontrolled extraction of groundwater. This phenomenon can cause irreparable damage to the affected areas if not properly managed. Identifying subsidence areas and estimating its rate will certainly play a significant role in managing the control of this phenomenon. One of the best ways to detect a subsidence phenomenon is to use a radar differential interference technique. Meshgin plain is one of the most important plains in Ardabil province in terms of agricultural development, which in recent years has faced the phenomenon of land subsidence due to uncontrolled extraction of groundwater resources. Data collected by piezometric wells at the plain level show an average drop in static level over a 14-year period of 23.75 meters. The consequences of this drop in groundwater levels have led to subsidence and cracks and crevices in parts of the plain. Declining water level and subsequent increase in effective stress is the main reason for the subsidence of the Meshgin plain. In this study, in order to determine the affected area and finally estimate the amount of subsidence, radar interference method was used as a reliable method to measure land surface changes with very high accuracy, wide coverage and high spatial resolution. The maximum subsidence rate was calculated using the radar images of the Sentinel 1 satellite in the period from 2019/08 to 2020/04 – 9.35cm. From the results of radar interference, it was determined that the subsidence extends from southeast to southwest of the plain.

Cite this article: Nazmfar, H., Shirzad Khrjan, M. (2022). Surface subsidence monitoring with radar interference technique (study area: Meshgin plain). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(31), 25-48.
DOI: 10.22111/jneh.2022.35138.1687



© Hossein Nazmfar.

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2022.35138.1687

* Corresponding Author Email: nazmfar@uma.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره یازدهم، شماره ۳۱، بهار ۱۴۰۱

پایش فرونشست سطح زمین با فن تداخل سنجی راداری (محدوده مورد مطالعه: دشت مشگین)

حسین نظم فر^{۱*}، منیر شیرزاد گرجان^۲

۱. استاد، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه محقق اردبیلی (نویسنده مسئول)

۲. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه محقق اردبیلی

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	فرونشست زمین یک پدیده ای است که در دهه‌های اخیر میزان آن در اکثر کشورهای دنیا به‌خصوص کشورهای جهان سوم نظیر ایران رو به افزایش است. در ایران عمده فرونشست‌های زمین در رابطه با کشاورزی و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی است. این پدیده در صورت عدم مدیریت صحیح می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیری را برای مناطقی که دچار این پدیده هستند، ایجاد کند. شناسایی مناطق فرونشست و برآورد نرخ آن بی‌گمان نقش بسزایی در مدیریت کنترل این پدیده خواهد داشت. یکی از مناسب‌ترین روش‌های شناسایی پدیده فرونشست استفاده از فن تداخل‌سنجی تفاضلی راداری است. دشت مشگین یکی از دشت‌های مهم استان اردبیل از لحاظ توسعه‌ی کشاورزی به‌شمار می‌آید که در چند سال اخیر با پدیده‌ی فرونشست زمین در اثر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی روبرو بوده است. اطلاعات جمع‌آوری شده توسط چاه‌های پیژومتریک واقع در سطح دشت، متوسط افت سطح ایستابی طی یک دوره ۱۴ ساله را به میزان ۲۳٫۷۵ متر نشان می‌دهد. پیامدهای این افت سطح آب زیرزمینی منجر به فرونشست و ایجاد ترک و شکاف‌هایی در قسمت‌هایی از دشت شده است. افت سطح ایستابی و به‌دنبال آن افزایش تنش مؤثر دلیل اصلی فرونشست دشت مشگین می‌باشد. در این پژوهش به‌منظور تعیین محدوده تحت تأثیر و درنهایت برآورد میزان فرونشست از روش تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان روشی قابل‌اطمینان برای اندازه‌گیری تغییرهای سطح زمین با دقت بسیار بالا، پوشش وسیع و قدرت تفکیک مکانی بالا استفاده شد. بیشینه‌ی نرخ فرونشست با استفاده از تصاویر راداری ماهواره Sentinel-1 در بازه‌ی زمانی ۲۰۱۹/۰۸ تا ۲۰۲۰/۰۴ در حدود ۹/۳۵ سانتی‌متر محاسبه گردید. از نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری مشخص شد جهت گسترش نشست از جنوب شرق به سمت جنوب غرب دشت می‌باشد.
واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، تداخل‌سنجی راداری، دشت مشگین، فرونشست.	

استناد: نظم فر، حسین، شیرزادگرجان، منیر. (۱۴۰۱). پایش فرونشست سطح زمین با تکنیک تداخل سنجی راداری (محدوده مورد مطالعه: دشت

مشگین). مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۱)، ۴۸-۲۵. DOI: 10.22111/jneh.2022.35138.1687



© حسین نظم فر^{*}، منیر شیرزاد گرجان.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

مقدمه

افزایش روزافزون بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی، دریایی کم‌عمق یا دریاچه‌ای تحکیم نیافته انباشته شده‌اند، می‌تواند به نشست و یا فروریزش سطح زمین منجر شود. پدیده‌ی فرونشست ممکن است به‌صورت نشست تدریجی یا ناگهانی سطح زمین بر اثر تغییر شکل و جابه‌جایی ذرات خاک ایجاد شود (چن^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). پدیده فرونشست به علل گوناگونی از جمله عوامل طبیعی مانند زلزله، آتشفشان، فعالیت‌های گسلی، فرونشست ناشی از بالآمدن سطح دریا، انحلال در سنگ، اکسایش، فشردگی رسوبات آلی، توسعه چاله در زمین‌های کارستی، یا ناشی از فعالیت‌های انسانی، شامل برداشت بی‌رویه سیالات از زمین نظیر آب، نفت و گاز روی می‌دهد (آن کارن^۲ و همکاران، ۲۰۱۵). در دو دهه اخیر، فن تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان ابزاری کارآمد در مطالعه پدیده‌هایی که سبب تغییر شکل زمین می‌شود، به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (موتاگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۷). بر پایه‌ی تعریف انستیتو زمین‌شناسی ایالات متحده، پدیده‌ی فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابه‌جایی افقی اندک باشد (یامانی^۴ و همکاران، ۲۰۰۸). در کشور ما شرایطی اقلیمی به‌گونه‌ای است که حتی در پرباران‌ترین دشت‌های کشور نیاز به آب زیرزمینی احساس می‌شود و هر ساله بر تعداد چاه‌های عمیق و نیمه عمیق در آن‌ها افزوده می‌شود. این مسئله موجب افت سطح آب‌های زیرزمینی و حتی پیشروی آب‌های شور در بسیاری از دشت‌ها گردیده است (خلفی و اسدیان، ۱۳۸۹). افت سطح آب زیرزمینی یکی از علل شایع در ایجاد فرونشست می‌باشد. شناخت این پدیده و بررسی راه‌های کنترل آن و جلوگیری از تسریع روند و گسترش پدیده فرونشست مانع از وقوع خطرهای نظیر آلودگی آب‌های زیرزمینی، تغییر شیب زمین، ریزش جدار چاه‌ها، فرورفتن تدریجی دکل‌ها و سازه‌ها، تغییر شیب رودخانه‌ها و جاده‌ها و غیره می‌شود. خطرهایی که خسارت‌های مالی و جانی قابل‌توجه‌ای را بر جای می‌گذارد و از سوی دیگر موجب هدررفت زمان و نیروی انسانی، آلودگی و نابودی محیط‌زیست می‌گردد (حقیقت مهر و همکاران، ۱۳۹۰). در دشت مشکین نیز ممکن است نشانه‌هایی از فرونشست زمین به شکل کج شدگی لوله‌ها، لوله‌زایی، حفره‌های کم عمق نمایان شده باشد که هشدار برای این دشت محسوب می‌شود که اگر برنامه‌ریزی‌های مناسب در خصوص بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی صورت نگیرد به‌زودی شاهد تخریب اراضی، مساکن، آلودگی آب و غیره خواهیم بود. شناسایی با دقت بالای مناطقی که دچار فرونشست شده باشند، در رابطه با پیش فرونشست زمین از اهمیت خاصی برخوردار است. استفاده از روش‌های سنتی جهت تحقق این امر بسیار وقت‌گیر و زمان‌بر است و با توجه به اینکه فرونشست‌های ایجاد شده بیشتر به خاطر برداشت‌های بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی اتفاق می‌افتد، بنابراین شناسایی سریع و به‌هنگام فرونشست در مناطق کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین شناسایی مناطق فرونشست و برآورد نرخ آن بی‌گمان نقش بسزایی در مدیریت و کنترل این پدیده خواهد داشت. پایش و اندازه‌گیری میزان فرونشست منجر به آگاهی از الگوی فرونشست موجود در سطح زمین و مدیریت صحیح منابع محیطی می‌شود و فقط با شناخت و مطالعه‌ی صحیح می‌توان، استفاده‌ی صحیح از منابع موجود را رقم زد. در واقع با

1 Chen

2An, Karen

3 Motagh

4 Yamani

پایش این پدیده می‌توان درک صحیحی از جهت و گسترش آن به‌دست آورد. پایش و اندازه‌گیری فرونشست زمین یکی از مهمترین مؤلفه‌هایی است که در این پژوهش مورد توجه واقع شده است. استفاده از روش‌های قدیمی منجر به هدر رفتن هزینه‌ها و صرف زمان زیادی می‌شود؛ بنابراین اهمیت انجام کار صرفه‌جویی در زمان و ثروت ملی با استفاده از پیشرفت‌های نوین سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. از طرف دیگر، بدون عملی‌شدن این روش، نمی‌توان پدیده‌ی فرونشست را به‌علت وسعت زیادشان به‌صورت یکپارچه پایش کرد و فقط با سنجش‌ازدور که دارای یک دید سامان‌مند می‌باشد، این امر امکان‌پذیر است. امروزه سنجش‌ازدور راداری به‌دلیل توانایی تصویربرداری در شب و روز و در شرایط جوی مختلف بیش از پیش مورد توجه دانشمندان و متخصصان علوم زمین قرار گرفته است. از طرف دیگر، اضافه‌شدن فناوری تداخل‌سنجی راداری کاربردهای جدیدتری را فرا روی کاربران سنجش‌ازدور قرار داده است. یکی از دقیق‌ترین و کم هزینه‌ترین روش‌های پردازش داده‌های راداری برای شناسایی حرکات سطح زمین، فن تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR^۱) است. این روش با مقایسه فازهای دو تصویر راداری که از یک منطقه در دو زمان متفاوت اخذ شده‌اند، قادر به تعیین تغییرهای سطح زمین با دقت و توان تفکیک مکانی در حد سانتی‌متر و حتی میلی‌متر در آن بازه‌ی زمانی خواهد بود (ماسوننت و فیگل^۲، ۱۹۹۸). سازوکار این روش استفاده از اختلاف فاز چندین تصویر راداری (SAR) با فرمت استاندارد (SLC^۳) که در زمان‌های مختلف از یک منطقه مشخص برداشت شده، می‌باشد که در نهایت به برآورد دقیق میزان جابه‌جایی زمین در راستای خط دید ماهواره می‌انجامد (دی مارتیر^۴ و همکاران، ۲۰۱۴). در دهه‌های اخیر، در زمینه شناسایی و پایش تغییرهای سطح زمین با استفاده از فن تداخل-سنجی راداری پژوهش‌های متعددی در حوزه علوم زمین در سراسر جهان انجام پذیرفته است که از جمله می‌توان به پژوهش‌ها زیر اشاره کرد: (اسمیت^۵ و همکاران، ۲۰۱۷) در پژوهش خود به‌عنوان برآورد از دست‌دادن دائمی ذخایر آب زیرزمینی در دره سن ژواکوین کالیفرنیا عنوان کردند اگر آب بیش‌ازحد از آبخوان‌ها استخراج شود، به‌خصوص در نواحی که لایه‌های خاک رس دارند، متراکم‌شدن لایه‌های خاک به‌دلیل افت فشار آب باعث ایجاد حالت غیرقابل-برگشت می‌شود و توانایی خاک برای حفظ و نفوذ آب از دست می‌رود. از این‌رو، آبخوان ظرفیت دریافت آب خود را به طور دائم از دست می‌دهد. (هو^۶ و همکاران، ۲۰۱۶) با استفاده از روش PS، میزان فرونشست زمین در هانوی^۷ ویتنام را ۴۰ میلی‌متر در سال محاسبه کرده‌اند. (رسفین^۸ و همکاران، ۲۰۱۳) مقاله‌ای با موضوع فرونشست در شمال یونان را انجام دادند. در این پژوهش از چندین منبع اطلاعاتی و داده‌های رادار SAR استفاده کردند. در این مطالعات که دوره زمانی ۱۹۹۵-۲۰۰۱ را در بر می‌گیرد، به بررسی پدیده فرونشست در اطراف فرودگاه بین‌المللی مقدونیه پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که پدیده فرونشینی در امتداد ساحل حوضه آنترومونت^۹ به‌علت برداشت شدید آب زیرزمینی بوده است، به‌طوری‌که نرخ این فرونشینی ۱/۵-۲ سانتی‌متر در سال است. (سانبریا^{۱۰} و

1 Differential Synthetic Aperture Radar
 2 Massonet & Feigl
 3 Singel look
 4 Dimartire
 5 Smit
 6 Ho
 7 Hanoi
 8 Raspini
 9 Anthromount
 10 Sanabria

همکاران، ۲۰۱۴) در مقاله خود تحت عنوان نقشه‌های فعالیت فرونشست از داده‌های DInSAR در منطقه اریونلا^۱ روش جدیدی را برای تولید نقشه‌های فعالیت فرونشست براساس آنالیز زمین آماری بر داده‌های PSI پیشنهاد کردند. اندازه‌گیری جابه‌جایی PSI که براساس چند مرحله محاسبات SGS در منطقه صورت‌گرفته، نشان داده است که این روش قابلیت پیش‌بینی میزان خطر و خسارت پدیده فرونشست با احتمال دقت ۱۰۰ درصد را داراست و روشی مطمئن برای ارزیابی خطر و میزان خسارت فرونشست است. (مقصودی و همکاران، ۱۳۹۸) با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و فن تداخل‌سنجی راداری، میزان فرونشست غرب تهران را ۱۵ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند. (نادری و همکاران، ۱۳۹۷) با استفاده از یک مدل جدید (GARDLIF)، مناطق فرونشست احتمالی در آبخوان دشت سلماس را شناسایی کردند. همچنین (نادری و همکاران، ۱۳۹۷) با ارائه چارچوبی برای تخمین پتانسیل فرونشست آبخوان با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک در دشت شبستر استفاده کردند. (خامه چیان و همکاران، ۱۳۹۷) با استفاده از مدل وزن‌دهی ALPRIFT که نوعی مدل وزن‌دهی ساده است و شامل هفت لایه مؤثر بر فرونشست (جنس لایه زیرین، کاربری زمین، پمپاژ، تغذیه، ضخامت آبخوان، فاصله از گسل، افت سطح آب زیرزمینی) می‌شود، میزان آسیب‌پذیری فرونشست دشت طی یک سال (۱۳۹۴-۱۳۹۵) به‌دست آوردند. (افضلی و همکاران، ۱۳۹۲) طی پژوهش خود به بررسی آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های و زیرساخت‌ها از پدیده فرونشست در دشت دامغان طی دوره زمانی ۶ ماه و با استفاده از داده‌های راداری و فن تداخل‌سنجی پرداخته‌اند و نتایج حاکی از فرونشستی با نرخ ۷ سانتی‌متر در سال برای این دشت بود. (باصری نام و همکاران، ۱۳۹۴) با ارائه مقاله‌ای تحت عنوان پیشرفت و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی از فن تداخل‌سنجی راداری استفاده نموده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد در مناطق با تراکم چاه‌های بالا و سطح آب‌های زیرزمینی پایین‌تر دارای فرونشست بیشتری می‌باشند. (انتظام، ۱۳۹۵) در پژوهشی فرونشست و پیامدهای نامطلوب آن در سیرجان را مورد بررسی قرار داد، نتایج پژوهش ایشان نشان داد که عوامل مؤثر در فرونشست‌ها، حفر چاه‌های عمیق بیشتر از ظرفیت دشت حدود ۱۴۰۰ چاه مجاز و صدها چاه غیر مجاز و همچنین ایجاد سه سد غیر کارشناسی (استوار، تنگ‌ویه و مافون) که از تغذیه سفره جلوگیری نموده‌اند، می‌باشد. (امیر افشاری و همکاران، ۱۳۹۸) در پژوهشی تحت عنوان ارزیابی ناپایداری دامنه‌ها در ناحیه راه آهن لرستان با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری مورد بررسی قرار داده‌اند، نتایج به‌دست‌آمده نشان داد بیشترین میزان حرکت مواد دامنه‌ای در بازه سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ حدود ۲۸/۸ سانتی‌متر در محدوده ایستگاه تنگ هفت تا تنگ پنج می‌باشد که نشان‌دهنده فعال بودن منطقه از لحاظ حرکات دامنه‌ای است. همچنین می‌توان به کارهایی که درمورد زلزله (آتزوری^۲، ۲۰۱۳)، فرونشست (سنابریا^۳ و همکاران، ۲۰۱۴) و ناپایداری دامنه‌ای (دانگ^۴ و همکاران، ۲۰۱۸)، (نوویلینو^۵ و همکاران، ۲۰۱۵)، (بردونی^۶ و همکاران، ۲۰۱۸)، (لازکی^۷ و همکاران، ۲۰۱۵)، (خوانین زاده و همکاران، ۱۳۸۹)، (شیرانی و همکاران، ۱۳۹۳)، (روستایی و همکاران، ۱۳۹۲) (احمد زاده و همکاران، ۱۳۹۴) انجام

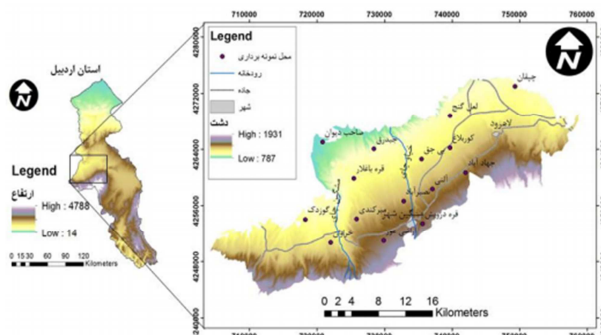
1 Areouela
2 Atzori
3 Sanabria
4 Dong
5 Novellino
6 Bordoni
7 Lazecky

شده است، اشاره کرد. هدف این مقاله شناسایی و پایش فرونشست زمین با استفاده از تصاویر راداری، تعیین تأثیر میزان برداشت آب از چاه‌ها در وقوع این پدیده، تعیین جهت و گسترش نشست زمین می‌باشد.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی مطالعاتی دشت مشگین با وسعت ۷۰۵ کیلومترمربع بین طول‌های جغرافیائی، $۴۷^{\circ} ۵۸'$ و $۴۷^{\circ} ۲۰'$ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیائی، $۳۸^{\circ} ۱۸'$ و $۳۸^{\circ} ۳۵'$ درجه شمالی گسترده شده است (شکل ۱). این محدوده مطالعاتی به مرکزیت شهرستان مشگین‌شهر واقع گردیده است. یکی از زیر حوضه‌های رودخانه‌ی ارس بوده و در حوضه آبریز دریای خزر قرار دارد. کوه سبلان مرتفع‌ترین نقطه‌ی منطقه می‌باشد که در قسمت جنوب شرقی مشگین‌شهر واقع شده است و پست‌ترین نقطه مربوط به خروجی دشت که در روستای صاحب دیوان قرار دارد. منبع تأمین آب زیرزمینی دشت شامل چشمه، قنات، چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق می‌باشند. از رودخانه‌های مهم منطقه می‌توان به قره‌سو، اهرچای، خیاوچای و مشگین‌چای اشاره کرد. از مهمترین ویژگی‌های دشت مشگین می‌توان به وجود خاک حاصلخیز و کشاورزی پر رونق اشاره کرد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه (منبع: نویسندگان)

داده‌های پژوهش

در این پژوهش از منابع داده مختلف شامل تصاویر راداری سنجنده‌ی سنتینل-۱ که از طریق پایگاه اینترنتی سازمان فضایی اروپا در دسترس می‌باشند و اطلاعات مربوط به منابع آبی منطقه شامل موقعیت چاه‌های پیژومتری منطقه و مقادیر تغییرهای سطح ایستابی آنها که از شرکت آب منطقه‌ای اخذ گردید، استفاده شد. مشخصات تصاویر دریافتی از سازمان فضایی اروپا در جدول شماره (۱) ارائه شده است. همچنین داده‌های ۳۱ چاه پیژومتری مورد استفاده قرار گرفت است (جدول ۲). داده‌های پیمایشی نیز که با استفاده از ابزار GPS برداشت شدند در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته شد. همچنین مدل رقومی ارتفاعی DEM با توان تفکیک مکانی ۲۷ متر در سیستم مختصات^۱ UTM با دیتوم WGS-84 در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. از مدل رقومی زمین برای مشخص نمودن میزان تغییرها و

¹ Univesal Transverse Mercator

همچنین به عنوان نقشه‌ی شاخص و مبنا استفاده می‌شود. برای اختصاص سطح مبنای ثابت برای هر یک از تصاویر پردازش شده در مراحل مختلف پردازش تصاویر، مدل رقومی ارتفاعی را به تصویر موردنظر اختصاص می‌دهیم. در واقع جهت مشخص شدن میزان جابه‌جایی ارتفاعی در طی بازه‌ی زمانی در تصاویر مدل رقومی زمین به عنوان سطح مبنای ثابت به همگی تصاویر اعمال می‌شود. به این صورت که با ثابت در نظر گرفتن سطح مبنای، میزان اختلاف ایجاد در هر تصویر نسبت به تصویر قبلی مشخص می‌شود و در نهایت با جمع تمام اختلاف‌های ایجاد شده در هر تصویر، میزان کلی اختلاف ارتفاع حاصل می‌شود.

جدول ۱: تصاویر مورد استفاده در پژوهش

ردیف	تصویر
۱	S1A_IW_SLC__1SDV_20190811T14
۲	S1A_IW_SLC__1SDV_20200407T14

جدول ۲: مشخصات چاه‌های پیزومتری منبع: اداره منابع آب شهرستان مشگین شهر

ردیف	X	Y	سطح پیزومتری در سال ۱۳۹۸	سطح پیزومتری در سال ۱۳۹۷
۱	۷۲۹۸۷۰	۴۲۵۰۹۹۰	۹۱،۱	۹۱
۲	۷۲۷۰۶۹	۴۲۵۸۳۶۲	۸۴،۶	۸۴،۲
۳	۷۳۵۶۲۰	۴۲۵۳۴۶۰	۷۸،۲	۷۸
۴	۷۵۱۰۵۱	۴۲۸۶۶۲۹	۵۳،۹۵	۵۳،۵
۵	۷۲۵۴۶۰	۴۲۵۹۹۰۰	۴۹،۱	۴۸،۷۵
۶	۷۳۹۷۰۱	۴۲۶۴۲۱۹	۴۶،۱	۴۵،۹
۷	۷۲۵۸۴۰	۴۲۵۴۱۲۰	۳۸،۲	۳۷،۸
۸	۲۴۰۰۴۷	۴۲۹۵۵۵۴	۳۵،۸	۳۴،۹
۹	۷۲۰۸۱۰	۴۲۶۵۰۲۰	۲۶،۸	۲۶،۲
۱۰	۷۶۰۱۱۲	۴۲۸۷۲۱۰	۲۶،۲	۲۵،۷
۱۱	۷۳۹۶۸۵	۴۲۶۸۸۱۰	۲۳،۲	۲۳،۷
۱۲	۷۲۱۹۶۳	۴۲۵۰۶۸۶	۲۳،۲	۲۲،۹
۱۳	۷۴۲۵۳۰	۴۲۶۹۱۰۰	۲۲،۳	۲۱،۸
۱۴	۷۳۲۸۲۰	۴۲۵۶۶۴۹	۲۲،۱	۲۱،۳۵
۱۵	۷۲۵۶۱۸	۴۲۵۱۴۹۱	۱۹،۷۵	۱۹
۱۶	۷۴۹۵۵۰	۴۲۸۱۷۰۰	۱۶،۲	۱۵،۴۰
۱۷	۷۴۹۰۴۰	۴۲۶۹۵۳۰	۱۴،۴	۱۳،۲
۱۸	۷۳۵۴۷۶	۴۲۶۲۶۳۳	۱۲،۳	۱۱،۵۵
۱۹	۷۴۳۰۲۴	۴۲۷۲۷۴۰	۱۱،۳	۱۰،۲۵
۲۰	۷۲۸۴۲۰	۴۲۶۴۰۶۰	۱۲،۳	۱۱،۲
۲۱	۲۴۰۸۳۴	۴۲۸۹۷۸۹	۹،۲	۸،۶
۲۲	۷۵۵۰۸۰	۴۲۷۹۰۱۰	۹،۲	۸،۳
۲۳	۷۵۴۴۰۶	۴۲۸۵۷۱۲	۸،۳	۷،۸۵
۲۴	۷۱۸۲۶۰	۴۲۵۴۰۴۰	۸،۴	۷،۸
۲۵	۷۵۶۰۳۹	۴۲۹۱۳۹۳	۸،۵	۷،۳
۲۶	۷۴۹۳۳۰	۴۲۷۳۰۴۰	۷،۳	۶،۹۵
۲۷	۷۱۰۵۷۷	۴۲۵۰۰۸۴	۶،۲	۵،۶
۲۸	۷۲۲۰۰۸	۴۲۵۰۷۰۱	۶،۳	۵،۵۵
۲۹	۷۱۴۹۱۷	۴۲۴۹۶۳۱	۴،۴	۴،۱
۳۰	۷۵۶۱۹۴	۴۲۸۸۳۱۵	۴،۲	۳،۸
۳۱	۷۳۹۷۶۰	۴۲۷۸۲۸۱	۲،۱	۱،۴۵

روش پژوهش

در این پژوهش از فن تداخل سنجی راداری به منظور پایش میزان فرونشست زمین استفاده گردید که در ادامه مختصراً تشریح می گردد:

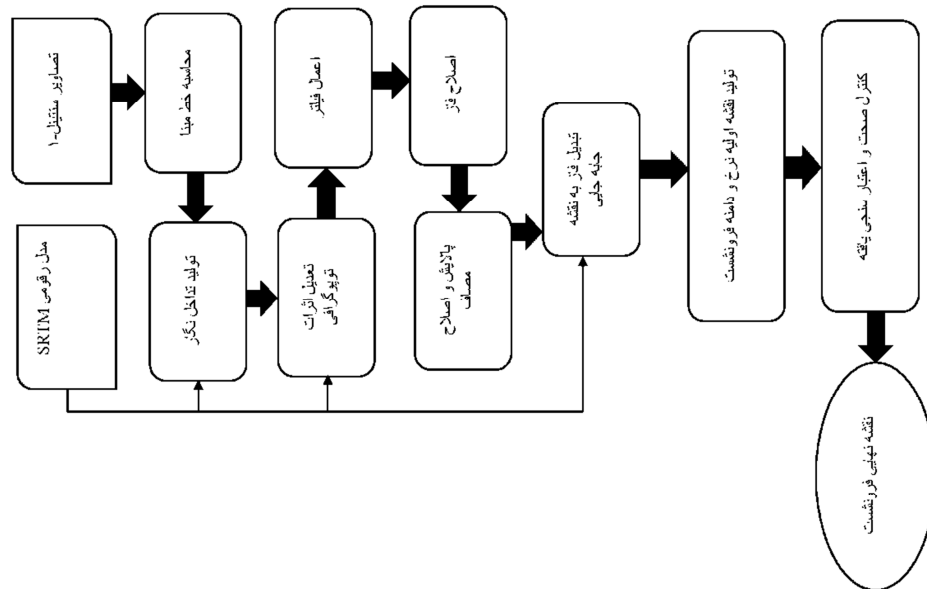
تهیه و آماده سازی داده های مورد نیاز، روش های پردازش تصاویر، استخراج نقشه میزان فرونشست منطقه در طول زمان مورد مطالعه و همچنین صحت سنجی نتایج پردازش های آزمایشگاهی (پردازش تصاویر) با استفاده از داده های پیمایشی و ثبتي می باشد. در مرحله ی پردازش تصاویر از داده های ماهواره سنتینل-۱ در باند C استفاده شد. سپس در مرحله ی بعدی از طریق افزونه ی اختصاصی SARSCAPE و به کارگیری روش تداخل سنجی، میزان فرونشست منطقه تعیین شد. سپس با انجام عملیات پیمایشی و میدانی و با استفاده از ابزار، GPS برای شناخت و پی جویی عوارض ناشی از پدیده ی نشست، نواحی و مناطق معرفی شده در مرحله ی آزمایشگاهی در سطح زمین نیز مورد شناسایی و برداشت میدانی قرار گرفت جدول (۶). یافته های این مرحله به تعیین صحت نتایج در مرحله ی نخست بسیار کمک کرد. در مرحله ی بعد به منظور تبیین علل فرونشست زمین در منطقه ی مورد مطالعه، داده های مربوط به آب های زیرزمینی تجزیه و تحلیل شد. همچنین در این پژوهش، یافته های روش تداخل سنجی راداری با ارقام حاصل از تغییرهای سطح ایستابی آب زیرزمینی که به وسیله ی چاه های مشاهده ای (پیزومتری) تولید شده بود، مورد-مقایسه قرار گرفت. نمودار مفهومی مراحل انجام پژوهش در شکل (۲) ارائه شده است.

بررسی و آماده سازی داده های آب زیرزمینی

پس از جمع آوری اطلاعات مربوط به کیفیت و تراز سطح آب زیرزمین دشت مشگین، این اطلاعات از لحاظ کمی مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله اقدام هایی از قبیل حذف داده های پرت، حذف داده های مشکوک و همچنین کنترل نرمال بودن داده ها صورت گرفت و جهت ادامه کار آماده شد. پس از بررسی نرمال بودن داده ها، اقدام به انتخاب روش مناسب جهت درون یابی نقاط که از مقدار RMSE کمتر و استحکام ساختار فضایی قوی تر برخوردار باشند، شد. بدین ترتیب که روش های مختلف درون یابی از جمله کریجینگ، کوکریجینگ و تابع معکوس وزن دار با توان های مختلف بررسی شد. در این مطالعه جهت انتخاب مناسب ترین روش درون یابی از معیار RMSE یا همان مجذور میانگین مربعات خطا استفاده گردید که از لحاظ مقداری برابر است با رابطه ۱:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(Z_{xi}) - (z_{xi}^*)]^2}{N}} \quad (1)$$

در این رابطه Z_{xi} برابر با مقدار واقعی پارامتر، z_{xi}^* برابر با مقدار تخمین زده شده ی پارامتر و N تعداد مشاهدات است که این رابطه نشان دهنده ی میزان دقت درون یابی انجام شده است.



شکل ۲: نمودار مفهومی مراحل انجام پژوهش (منبع: نویسندگان)

پردازش‌های مربوط به تداخل‌سنجی تفاضلی

تخمین بیسلاین

هنگامی که مؤلفه‌ی عمودی خط مبنا Bn ، بیشتر از خط مبنا‌ی بحرانی تشخیص داده شود، تصاویر دارای انسجام کافی نیستند و تداخل‌سنجی امکان‌پذیر نمی‌باشد. رابطه (۲) بیانگر چگونگی محاسبه‌ی خط مبنا‌ی بحرانی طبیعی است:

$$Bn\sigma = \frac{\lambda R \tan \theta}{2Rr} \quad (2)$$

در اینجا λ طول موج می‌باشد، R فاصله‌ی دامنه، Rr فضای اشغال‌شده توسط یک پیکسل در دامنه و θ زاویه‌ی فرود است (فاطمی و رضایی، ۱۳۹۱).

میزان حساسیت به تشخیص تغییرهای ارتفاعی متناسب با معکوس 2π ابهام ارتفاعی است (اسنپ^۱، ۲۰۱۵). ابهام ارتفاعی بزرگتر از این مقدار توان تشخیص تغییرهای کوچک ارتفاعی را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. رابطه (۳) بیانگر چگونگی محاسبه 2π ابهام ارتفاعی AH است:

$$AH = \frac{\lambda R \sin \theta}{4\pi Bn} \quad (3)$$

تهیه‌ی تداخل‌نگاشت

اختلاف فاصله بین یک نقطه بر روی زمین و موقعیت یک سنجنده بر روی دو برداشت در دو زمان مختلف، با اندازه-گیری اختلاف فاز یک جفت تصویر SAR محاسبه شد. این امر با ضرب مزدوج مختلط یک تصویر در تصویر دیگر که

منجر به تهیه‌ی تداخل نگاشت می‌شود، انجام شد (آمیغ پی و همکاران، ۱۳۸۸). تداخل نگاشت تصویری است که اختلاف فاز بین دو تصویر SAR را پیکسل به پیکسل به نمایش می‌گذارد. فاز تداخل نگاشت شامل فرینج‌هایی است که اثر توپوگرافی و یا جابه‌جایی سطحی را مانند منحنی ارتفاعی نمایش می‌دهد (شمشکی و همکاران، ۱۳۸۴). فاز تداخل سنجی را به صورت رابطه (۴) می‌توان بیان کرد:

$$AH = \text{ATAN}[\text{Image}(I)/\text{Real}(I)] \quad (4)$$

در اینجا $\text{Image}(I)$ و $\text{Real}(I)$ بخش‌های واقعی و تصویری تداخل نگاشت هستند.

تسطیح تداخل نگاشت

در این مرحله مدل رقومی ارتفاعی DEM مرجع جهت حذف اثر توپوگرافی از تداخل نگاشت مورد استفاده قرار گرفت. تداخل نگاشت تهیه‌شده به فاز مصنوعی و اختلاف فاز تقسیم می‌شود. سپس سیستم مختصات مدل رقومی ارتفاعی ورودی، بر اساس هندسه‌ی تصویر SAR اصلی دوباره تعریف می‌شود. از مدل رقومی ارتفاعی برای تولید تداخل نگاشت تفاضلی که شامل فرینج‌های فرونشست است استفاده شد.

اعمال فیلتر

انجام فیلتر بر روی تداخل نگاشت تسطیح‌شده، تولید یک خروجی با مقدار نویز فاز کاهش یافته را میسر می‌سازد. منابع نویز فاز در تداخل نگاشت، نا همبستگی خط مبنای مکانی و زمانی است. تصویر همدوسی تداخل سنجی شاخص کیفیت فاز تولیدشده است. تصویر همدوسی تداخل سنجی λ از دو ورودی تصاویر SAR (S_1) و (S_2) محاسبه می‌شود که طبق رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$Bn\sigma = \frac{|\sum S_1(x) \cdot S_2(x)^*|}{\sqrt{\sum |S_1(x)|^2 \cdot \sum |S_2(x)|^2}} \quad (5)$$

در اینجا $S_1(x)$ تصویر اصلی، $S_1(x)$ تصویر فرعی و $S_2(x)^*$ مزدوج مختلط تصویر فرعی است. ارزش تصویر همدوسی در محدوده بین ۰ تا ۱ است. ارزش ۱ نشان‌دهنده‌ی منطبق با انسجام بالا و ارزش صفر نشان‌دهنده‌ی مناطق با انسجام پایین است. تخمین انسجام بین ۰ تا ۱ محدوده‌ی عملکرد نا همبستگی فضایی و نا همبستگی زمانی تصویر اصلی و فرعی است. فیلتر کردن برای به حداقل رساندن نویز فاز و بازیابی اطلاعات سطح زمین از مراحل ضروری تداخل سنجی است. در این پژوهش، از فیلتر *Goldstein* برای شناسایی فرینج‌های فرونشست استفاده شد.

بازیابی فاز

فاز تداخل سنجی تنها ظرفیت 2π را دارد؛ از این رو هر زمانی که تغییر فاز بزرگتر از 2π باشد، مرحله دوباره تکرار می‌شود و این چرخه تا آخر ادامه پیدا می‌کند. بازیابی فاز فرآیندی برای برطرف کردن ابهام 2π است. در این مرحله که عمل بازیابی فاز انجام می‌شود، الگوریتم حداقل مقدار فاز با آستانه‌ی انسجام ۱ اعمال می‌شود.

استخراج فاز جابه‌جایی و نقشه‌ی نهایی

باتوجه به اینکه دو تصویر SAR در زمان‌های متفاوت و اختلاف منظر صفر تهیه شده‌اند، اطلاعات جابه‌جایی منطقه را می‌توان از آن استخراج کرد. در واقع، در بازه زمانی بین برداشت دو تصویر (۲۰۱۹-۲۰۲۰) که موقعیت مکانی نقاط به

دلیل فرونشست تغییر کرده است. برای تولید نقشه جابه‌جایی سطح زمین اثرات فاز توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی DEM برداشته شد و مقادیر باقیمانده نشان‌دهنده‌ی میزان جابه‌جایی مناطق مختلف منطقه مورد مطالعه است.

کنترل صحت و اعتبارسنجی یافته‌ها

با استفاده از نقشه‌های به‌دست‌آمده مربوط به نشست زمین و مقایسه‌ی موقعیت این نشست‌ها با موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای سطح آب زیرزمینی و میزان تغییرهای سطح آب در آن‌ها میزان ارتباط بین این دو مقوله بررسی شد.

محاسبه‌ی میزان و نرخ فرونشست

تصاویر به‌دست‌آمده از فن تداخل‌سنجی راداری از نظر موقعیت جغرافیایی با مرز منطقه مورد نظر یکسان‌سازی شدند و برای شناسایی فرینج‌های مشخص‌شده در تصاویر بر روی منطقه مورد مطالعه قرار گرفت. میزان فرونشست از طریق فرینج‌های نمایان‌شده در تصاویر راداری محاسبه شد و همچنین نرخ فرونشست نیز برای منطقه مورد مطالعه حساب شد. همچنین نقاط برداشت‌شده از طریق GPS نیز بر روی منطقه از لحاظ موقعیت جغرافیایی تثبیت شد و بر روی منطقه مورد مطالعه قرار گرفت. در فاز تداخل‌سنجی تفاضلی، هر فرینج یا یک سیکل فاز کامل (2π) اختلاف فاز رادیان) نشان‌دهنده‌ی $\lambda/2$ (طول موج رادار) جابه‌جایی زمین در امتداد خط دید رادار است که در آن λ طول موج پالس رادار است. با توجه به اینکه طول موج باند C سنجنده‌ی سنتینل - ۱ برابر ۵ سانتی‌متر است، بنابراین $\lambda/2$ برابر با $2 = 5/2$ خواهد بود. در نتیجه رابطه (۶) بیانگر میزان فرونشست در خط دید رادار می‌باشد:

$$\text{LOS deformation} = N \times 2/5 \quad (۶)$$

که در اینجا N مجموع کل تعداد رنگ‌های تخصیص داده‌شده است.

بنابراین، جهت محاسبه‌ی نرخ فرونشست طبق رابطه‌ی (۷) خواهیم داشت:

$$\text{Subsidence rate} = \frac{\text{LOS deformation}}{\Delta t} \times D \quad (۷)$$

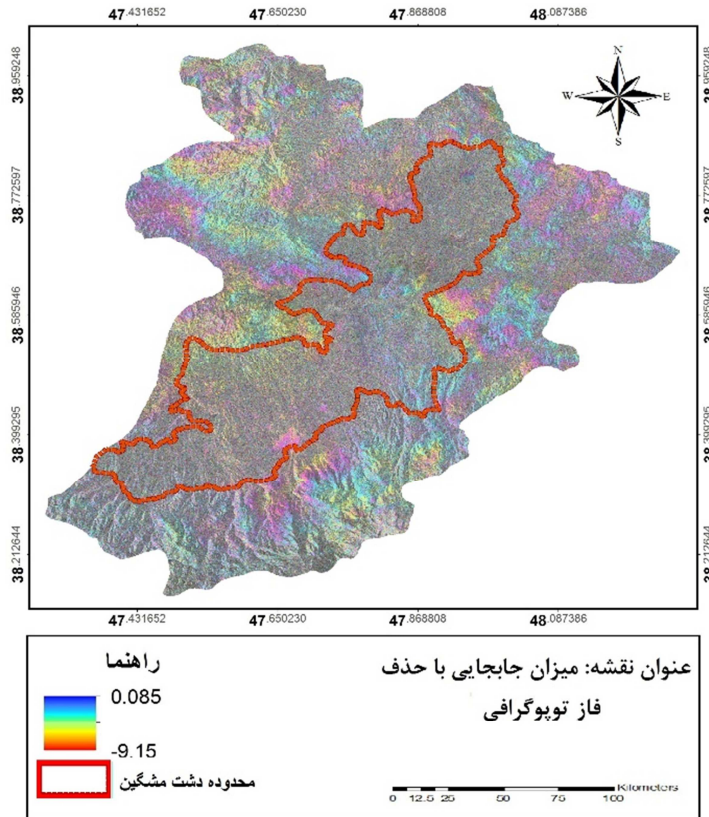
که در اینجا Δt خط مبنای زمانی تعداد روزها و D مجموع تعداد روزهای یک سال می‌باشند.

نتایج

تسطیح تداخل‌نگاشت و اعمال فیلترها

نرخ جابه‌جایی بعد از حذف باقیمانده‌ی فاز توپوگرافی

همان‌گونه که در قسمت قبل گفته شد، در این پژوهش برای حذف اثر فاز توپوگرافی و به‌منظور افزایش دقت محاسبات از مدل رقومی ارتفاعی از ASTER DEM با قدرت تفکیک مکانی ۲۷ متر در تداخل‌نگاشت استفاده شده است.

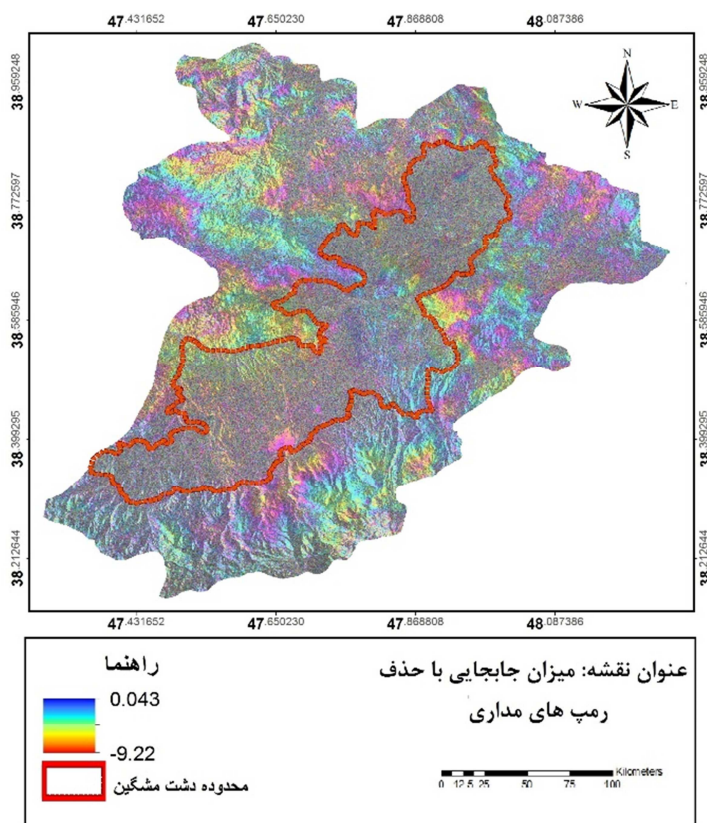


شکل ۳: میدان جابه‌جایی محاسبه‌شده با حذف فاز باقیمانده توپوگرافی

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در شکل (۳) پس از حذف سهم فاز باقیمانده اثر توپوگرافی از نتایج تداخل‌سنجی تفاضلی دامنه‌ی تغییرهای بین (۰/۰۸۵ تا -۹/۱۵) سانتی‌متر در بازه‌ی مطالعاتی حاصل شد.

نرخ جابه‌جایی بعد از حذف رمپ‌های مداری

خطای مداری به‌علت دقیق‌نبودن اطلاعات مدارهای مورد استفاده در تشکیل تداخل نگار ایجاد شده و به‌صورت رمپ-هایی در راستای آزمون بر روی نتایج تأثیر می‌گذارد. این خطا با برازش یک سوپیه‌ی درجه یک به مناطقی که فاقد جابه‌جایی هستند در هر تداخل نگار مدل‌سازی شده و از تداخل نگار مورد نظر کم می‌شوند.



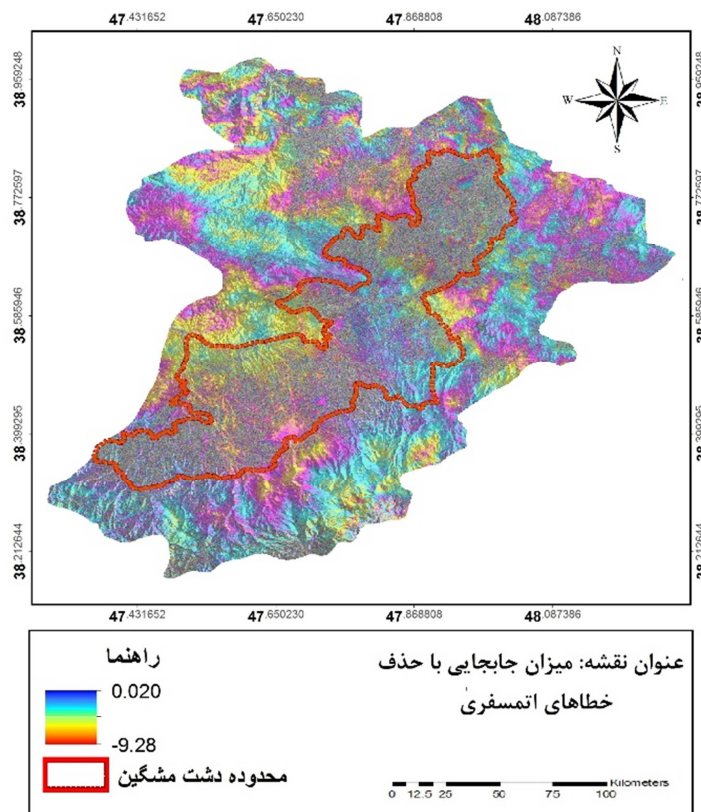
شکل ۴: میدان جابه‌جایی محاسبه‌شده با حذف رمپ‌های مداری و اثر فاز توپوگرافی

منبع: یافته‌های پژوهش

بعد از محاسبه‌ی رمپ‌های مداری، از تداخل‌نگار حذف می‌شوند و سپس میدان نرخ جابه‌جایی دوباره ترسیم می‌شود. در شکل (۴)، میدان نرخ جابه‌جایی نسبت به اثر فاز باقی‌مانده‌ی توپوگرافی و رمپ‌های مداری تصحیح شده است. باتوجه به شکل (۴)، بعد از حذف فاز مداری از نتیجه‌ی تداخل‌سنجی که قبلاً نسبت به باقی‌مانده‌ی فاز توپوگرافی تصحیح شده بود، دامنه‌ی تغییرهای میدان جابه‌جایی دستخوش تغییرهایی شد. دامنه‌ی تغییرها برای نتایج به‌دست‌آمده از فن تداخل‌سنجی بعد از حذف رمپ‌های مداری بین (۰/۰۴۳ تا -۹/۲۲) حاصل شد.

نرخ جابه‌جایی بعد از حذف اثر اتمسفری

خطای فاز اتمسفری به‌علت تغییر در ویژگی‌های پراکنشی محیط، در دو زمان متفاوت تصویربرداری ایجاد می‌شود و می‌تواند سیگنال اصلی را مخدوش کند. به‌طوری‌که ۲۰ درصد تغییر در شرایط رطوبتی محیط می‌تواند ۱۲ الی ۱۴ سانتی‌متر نتایج را دستخوش تغییرات کند. برای حذف این خطا از رابطه‌ی بین فاز و توپوگرافی استفاده شد.



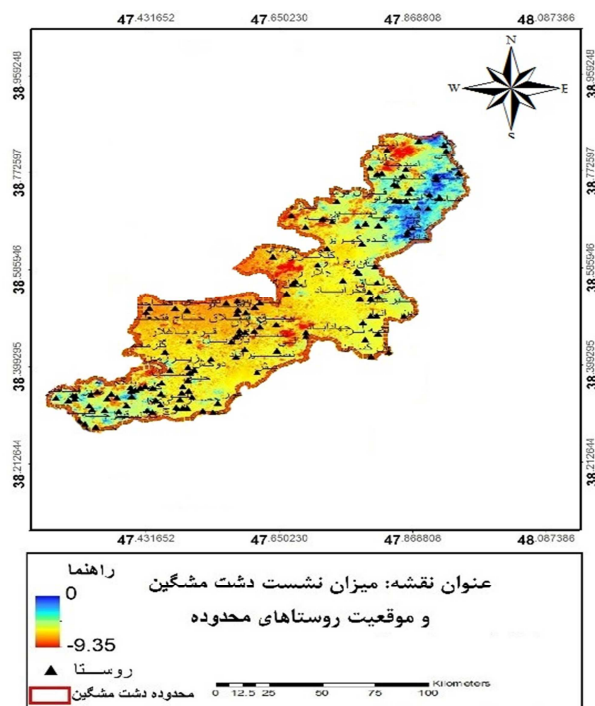
شکل ۵: میدان جابه‌جایی محاسبه‌شده پس از حذف خطاهای توپوگرافی، مداری و اثر اتمسفری

منبع: یافته‌های پژوهش

باتوجه به شکل (۵)، بعد از حذف فاز مداری از نتیجه تداخل‌سنجی که قبلاً نسبت به باقی مانده‌ی فاز توپوگرافی تصحیح شده بود، دامنه‌ی تغییرها پس از حذف خطاهای توپوگرافی، مداری و اثر اتمسفری بین (۰/۰۲۰ تا -۹/۲۸) حاصل شد.

استخراج میدان جابه‌جایی نهایی و تولید نقشه موقعیت و میزان نشست زمین

در انتها با حذف نویزها و خطاهای موجود در تداخل نگاشت تولیدشده، میدان جابه‌جایی نهایی محدوده مورد مطالعه حاصل شد که نتیجه‌ی آن در شکل (۶) ارائه شده است. نقشه‌ی استخراج‌شده بیانگر میزان جابه‌جایی عمودی در نقاط مختلف محدوده است. این نقشه با حذف خطاهای موجود در تداخل نگاشت و همچنین با کسر مقادیر صفر از تداخل نگاشت که بیانگر عدم نشست یا عدم جابه‌جایی عمودی بودند، منتج شده است. میزان ماکزیمم نشست در محدوده مورد مطالعه ۹/۳۵ سانتی‌متر محاسبه شده است. همان‌گونه که در شکل (۶) قابل مشاهده است، بیشترین تمرکز فرونشست‌ها در قسمت جنوب شرق به سمت جنوب غرب و همچنین قسمت‌های از شمال غرب قرار دارد.



شکل ۶: نقشه جابه‌جایی حاصل‌شده از پردازش تصاویر

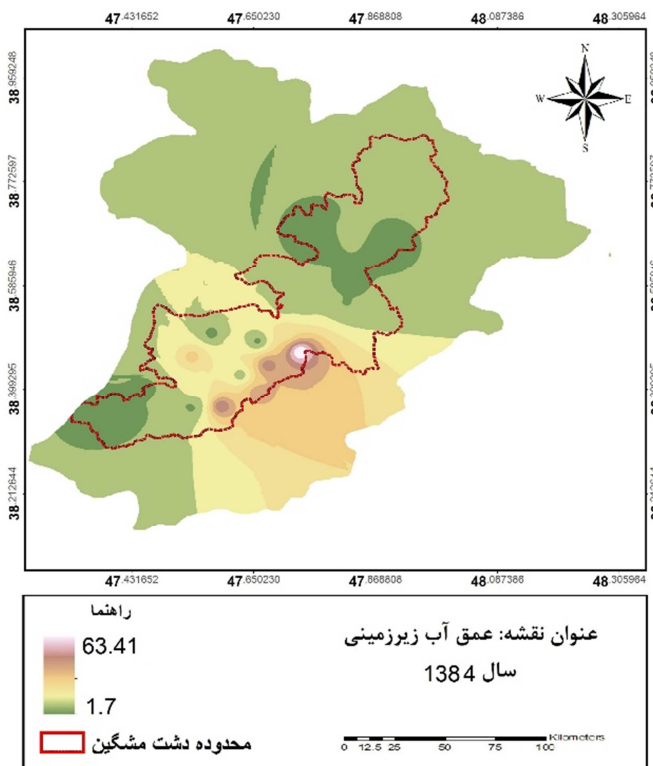
منبع: یافته‌های پژوهش

تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی عمق سطح آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه

در این مرحله به منظور پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی، در ابتدا نرمال‌بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت؛ زیرا با استفاده از داده‌های نرمال در درون‌یابی نتایج دقیق‌تری حاصل می‌شود. در مرحله بعد جهت انتخاب بهترین روش درون‌یابی، دو روش کریجینگ و تابع وزن معکوس (IDW) با توان‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. گفتنی است به دلیل اینکه همبستگی ضعیفی بین دو پارامتر سطح آب چاه‌ها و تراز سطح چاه وجود داشته و ضریب همبستگی بین آن‌ها ۰/۰۳ بود، از بکارگیری این پارامتر به عنوان پارامتر کمکی صرف نظر شد و در نتیجه از روش کوکریجینگ و کریجینگ استفاده نگردیده است. مقدار کمتر RMSE به عنوان معیار انتخاب بهترین روش درون‌یابی قرار گرفت. نتایج (جدول ۳) نشان می‌دهد که روش IDW توان ۴ مناسب‌ترین روش درون‌یابی می‌باشد و در نهایت با روش IDW توان ۴، نقشه‌ی پهنه‌بندی تغییرهای مکانی سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۸۴ در محدوده‌ی مورد مطالعه تهیه گردید (شکل ۷).

جدول ۳: ارزیابی روش‌های درون‌یابی منبع: یافته‌های پژوهش

نوع روش	RMSE
کریجینگ	۲۳/۴۹
IDW توان ۲	۲۲/۵۰
IDW توان ۴	۱۹/۷۸
IDW توان ۶	۲۴/۶۳



شکل ۷: نمونه نقشه‌ی پهنه‌بندی مکانی عمق سطح آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه در سال ۱۳۸۴

منبع: یافته‌های پژوهش

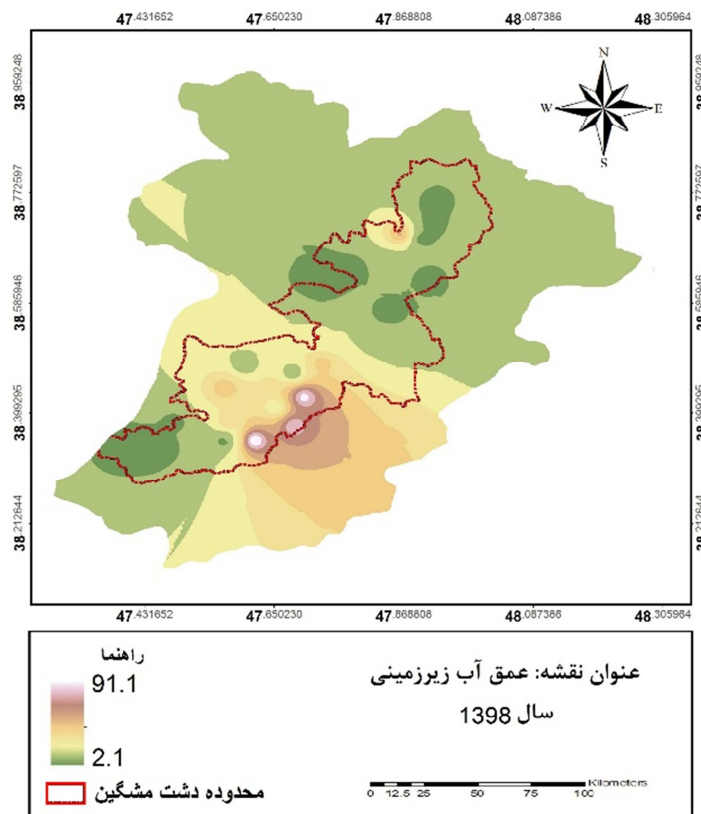
نقشه‌ی حاصل نشان می‌دهد که بیشترین عمق سطح آب زیرزمینی مربوط به مناطق جنوب شرق به سمت جنوب غربی می‌باشد. در حوالی مناطق جنوب شرقی عمق سطح آب زیرزمینی به حداکثر خود می‌رسد که دلیل آن می‌تواند بخاطر افزایش برداشت از آب زیرزمینی در این منطقه باشد.

پهنه‌بندی مکانی آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۸

در این مرحله به منظور پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی، در ابتدا نرمال بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعد جهت انتخاب بهترین روش درون‌یابی، دو روش کریجینگ و تابع وزن معکوس (IDW) با توان‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند جدول (۴). نتایج نشان می‌دهد که روش تابع وزن معکوس با توان ۴ مناسب‌ترین روش درون‌یابی می‌باشد، در نهایت با این روش درون‌یابی، نقشه‌ی پهنه‌بندی تغییرهای مکانی سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۸ در محدوده مورد مطالعه تهیه گردید شکل (۸).

جدول ۴: ارزیابی روش‌های درون‌یابی منبع: یافته‌های پژوهش

نوع روش	RMSE
کریجینگ	۲۶/۳۴
IDW توان ۲	۲۵/۶۱
IDW توان ۴	۲۱/۷۷
IDW توان ۶	۲۷/۴۲



شکل ۸: نمونه نقشه‌ی پهنه‌بندی مکانی عمق سطح آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه در سال ۱۳۹۸

منبع: یافته‌های پژوهش

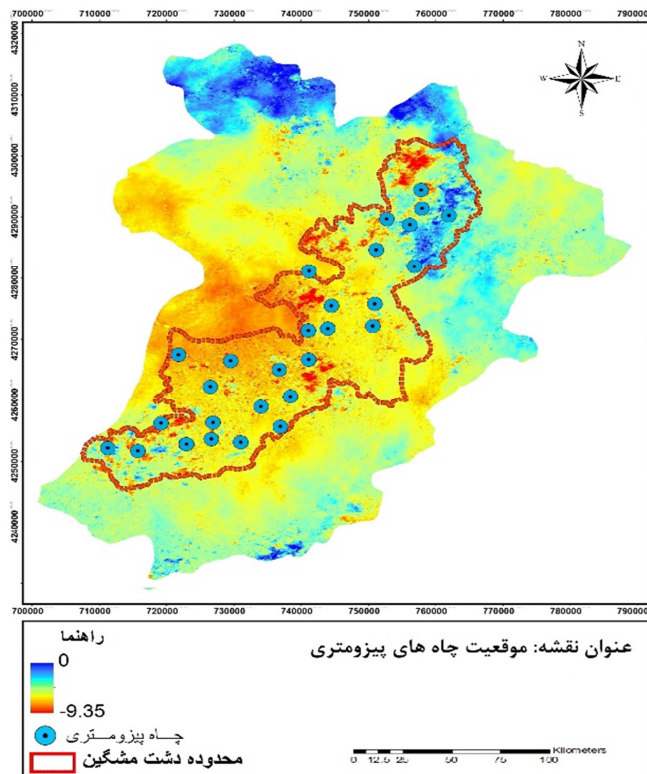
بررسی نقشه تغییرهای مکانی سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد که در این سال نیز بیشترین عمق سطح آب زیرزمینی مربوطه به مناطق جنوب شرق به سمت جنوب غرب می‌باشد و به‌طور کلی می‌توان گفت با فاصله‌گرفتن از قسمت شمالی به‌خصوص به طرف مناطق جنوب شرقی بر میزان عمق سطح آب زیرزمینی افزوده می‌شود که افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی در مناطق جنوب شرق می‌تواند در بروز این حالت نقش داشته باشد. محاسبات نشان می‌دهد که در این فاصله ۱۴ ساله سطح آب زیرزمینی به‌طور متوسط سالیانه $23/75$ متر افت کرده است. منابع تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی محدوده دشت مشگین به‌دلیل ایجاد سدهای (سبلان، دوشانلو، مزرعه جهان و قره قیه قصابه، ارباب کندی، اونار، اینچه‌نو، بیگ باغلو، لنج آباد، ینگجه و غیره) و همچنین تأمین آب شهر مشگین از طریق منابع آبی دشت، افزایش برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی را به‌دنبال داشته است. بنابراین توجیه قابل‌قبولی برای این میزان افت سطح آب زیرزمینی در طی این فاصله ۱۴ ساله می‌باشد که در صورت ادامه روند کنونی علاوه بر تشدید این پیامدها، شاهد آسیب شدید به کشاورزی منطقه و احتمال به‌وجود آمدن ناامنی‌های اجتماعی اقتصادی در منطقه خواهیم بود.

اعتبارسنجی نتایج حاصل از فرونشست

تحلیل ارتباط بین نشست زمین و افت سطح آب زیرزمینی: جهت بررسی میزان ارتباط بین تغییرهای سطح آب زیرزمینی و نشست زمین، میزان تغییرهای سطح آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه در طول بازه‌ی مطالعاتی (۱۳۸۴-۱۳۹۸) تعیین گردید جدول (۵).

جدول ۵: موقعیت و تغییرهای سطح آب زیرزمینی در فاصله بین سال‌های ۱۳۸۴-۱۳۹۸ منبع: یافته‌های پژوهش

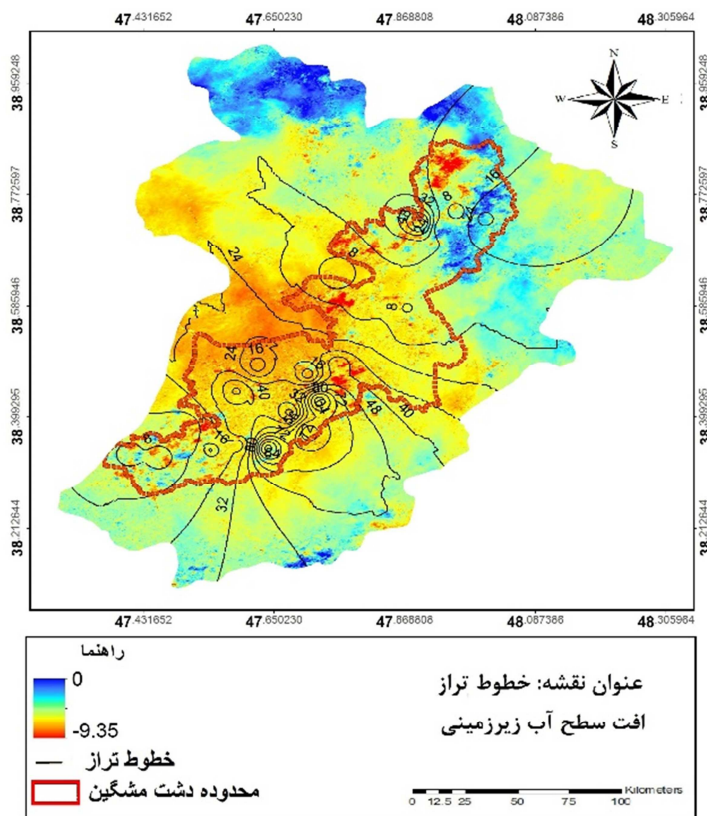
ردیف	x	y	تغییرهای سطح آب
۱	۷۲۹۸۷۰	۴۲۵۰۹۹۰	-۲۱,۷
۲	۷۳۷۰۶۹	۴۲۵۸۳۶۲	-۳,۹۵
۳	۷۳۵۶۲۰	۴۲۵۳۴۶۰	-۴
۴	۷۵۱۰۵۱	۴۲۸۶۶۲۹	-۱۶,۷۵
۵	۷۲۵۴۶۰	۴۲۵۹۹۰۰	-۷,۲۵
۶	۷۳۹۷۰۱	۴۲۶۴۲۱۹	۱,۸
۷	۷۲۵۸۴۰	۴۲۵۴۱۲۰	۱,۱۵
۸	۲۴۰۰۴۷	۴۲۹۵۵۵۴	۹,۳
۹	۷۲۰۸۱۰	۴۲۶۵۰۲۰	۴,۱۵
۱۰	۷۶۰۱۱۲	۴۲۸۷۲۱۰	۵,۲۵
۱۱	۷۳۹۶۸۵	۴۲۶۸۸۱۰	۲,۶
۱۲	۷۳۱۹۶۳	۴۲۵۰۶۸۶	۳,۵
۱۳	۷۴۲۵۳۰	۴۲۶۹۱۰۰	۵,۰۵
۱۴	۷۳۲۸۲۰	۴۲۵۶۶۴۹	۷,۹۵
۱۵	۷۲۵۶۱۸	۴۲۵۱۴۹۱	۶,۱۵
۱۶	۷۴۹۵۵۰	۴۲۸۱۷۰۰	۴,۸۵
۱۷	۷۴۹۰۴۰	۴۲۶۹۵۳۰	۳,۴
۱۸	۷۳۵۴۷۶	۴۲۶۲۶۳۳	۲,۸
۱۹	۷۴۳۰۲۴	۴۲۷۲۷۴۰	۳,۸
۲۰	۷۲۸۴۲۰	۴۲۶۴۰۶۰	۵,۱۵
۲۱	۲۴۰۸۳۴	۴۲۸۹۷۸۹	۲,۳۵
۲۲	۷۵۵۰۸۰	۴۲۷۹۰۱۰	۳,۲
۲۳	۷۵۴۴۰۶	۴۲۸۵۷۱۲	۲,۳
۲۴	۷۱۸۲۶۰	۴۲۵۴۰۴۰	۳,۳۵
۲۵	۷۵۶۰۲۹	۴۲۹۱۲۹۳	۴,۳
۲۶	۷۴۹۳۳۰	۴۲۷۳۰۴۰	۵,۶
۲۷	۷۱۰۵۷۷	۴۲۵۰۰۸۴	۴,۶
۲۸	۷۲۲۰۰۸	۴۲۵۰۷۰۱	۳,۲
۲۹	۷۱۴۹۱۷	۴۲۴۹۶۳۱	۲,۱
۳۰	۷۵۶۱۹۴	۴۲۸۸۳۱۵	۱,۳
۳۱	۷۳۹۷۶۰	۴۲۷۸۲۸۱	۰,۴



شکل ۹: نقشه موقعیت چاه های پیزومتری و فرونشست زمین

منبع: یافته های پژوهش

با بررسی چاه های پیزومتری محدوده مورد مطالعه، میزان تغییرهای سطح آب زیرزمینی از سال ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۸ شکل (۹) حاصل شد. نقشه خطوط تراز آب های زیرزمینی که در شکل (۱۰) ارائه شده است، می توان با توجه به تمرکز منحنی میزان های با ارزش بالا در نقاط جنوب شرق نقشه این گونه برداشت کرد که در مکان هایی که برداشت بیشتری از چاه ها صورت می گیرد، میزان نشست در حوالی آنها شدت بیشتری دارد و بالعکس در مناطقی که منحنی میزان های با ارزش کمتر وجود دارد، بیانگر برداشت کمتری از چاه های آن مناطق می باشد که به نسبت میزان نشست نیز از شدت کمتری برخوردار است.



شکل ۱۰: موقعیت وقوع فرونشست و خطوط هم‌تراز افت سطح آب زیرزمینی در دوره ۲ ساله

منبع: یافته‌های پژوهش

باتوجه به شکل (۱۰) و بررسی محل وقوع فرونشست و خطوط هم افت سطح آب زیرزمینی در طی این دوره دوساله نشان می‌دهد که مرکز فرونشست تقریباً در مجاورت مرکز ثقل خطوط هم‌افت سطح آب زیرزمینی قرار گرفته است که این مطلب می‌تواند دلیلی بر نقش افت سطح آب زیرزمینی در بروز فرونشست زمین در محدوده مورد مطالعه باشد. با تهیهی نقشه‌های سطح آب زیرزمینی از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۸ به صورت دوساله که در شکل (۱۱) ارائه شده است، به وضوح روند مکانی فرونشست مشخص است که از سمت جنوب شرق به سمت جنوب محدوده مورد مطالعه در حال افزایش است.

بحث

نتایج فرونشست زمین با استفاده از فن تداخل‌سنجی تفاضلی (شکل ۶) ارائه گردید. نقشه‌ی استخراج‌شده بیانگر میزان جابه‌جایی عمودی در نقاط مختلف محدوده است. این نقشه با حذف خطاهای موجود در تداخل نگاشت و همچنین با کسر مقادیر صفر از تداخل نگاشت که بیانگر عدم نشست یا عدم جابه‌جایی عمودی بودند، منتج شده است. با حذف سهم فاز باقیمانده اثر توپوگرافی از نتایج تداخل‌سنجی تفاضلی (شکل ۳)، دامنه‌ی تغییرها بین (۰/۰۸۵ تا

۹/۱۵-) سانتی متر در بازه‌ی مطالعاتی حاصل شد و بعد از حذف رمپ‌های مداری (شکل ۴)، دامنه‌ی تغییرها بین (۰/۰۴۳ تا ۹/۲۲-) سانتی متر به دست آمد. دامنه‌ی تغییرها با حذف خطاهای توپوگرافی، مداری و اثر اتمسفری (شکل ۵) بین (۰/۰۲۰ تا ۹/۲۸-) سانتی متر محاسبه شد. در نهایت با حذف نویزها و خطاهای موجود در تداخل نگاشت تولیدشده، میدان جابه‌جایی نهایی محدوده مورد مطالعه حاصل شد (شکل ۶) که بر اساس آن میزان ماکزیمم نشست در محدوده مورد مطالعه ۹/۳۵ سانتی متر می‌باشد. همان‌گونه که قابل مشاهده است، بیشترین تمرکز فرونشست‌ها در قسمت جنوب شرق به سمت جنوب غرب و همچنین قسمت‌های از شمال غرب قرار دارد. انجام عملیات پیمایشی و میدانی و با استفاده از ابزار GPS، برای شناخت و پی‌جویی عوارض ناشی از پدیده‌ی نشست، نواحی و مناطق معرفی شده در مرحله‌ی آزمایشگاهی در سطح زمین نیز مورد شناسایی و برداشت میدانی قرار گرفت جدول (۶). یافته‌های این مرحله به تعیین صحت نتایج در مرحله‌ی نخست بسیار کمک کرد. در مرحله‌ی بعد، به منظور تبیین علل فرونشست زمین در منطقه‌ی مورد مطالعه، داده‌های مربوط به آب‌های زیرزمینی تجزیه و تحلیل شد. همچنین در این پژوهش، یافته‌های روش تداخل‌سنجی راداری با ارقام حاصل از تغییرهای سطح ایستابی آب زیرزمینی که به وسیله‌ی چاه‌های مشاهده‌ای (پیزومتري) تولید شده بود، مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی تغییرهای آب زیرزمینی در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۸ نشان می‌دهد که ارتباط مستقیمی بین فرونشست و تغییرهای آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود که با نتایج نظرات احمدی و همکاران (۱۳۹۷)؛ ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۹)؛ مقصودی و همکاران (۱۳۹۸)؛ شفیعی و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت داشته است. با دقت در شکل (۱۱) که در آن نقشه‌های سطح آب زیرزمینی از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۸ به صورت دوساله ارائه شده است، به وضوح روند مکانی فرونشست مشخص است که از جنوب شرق و شرق به سمت مرکز و غرب دشت در حال افزایش است.

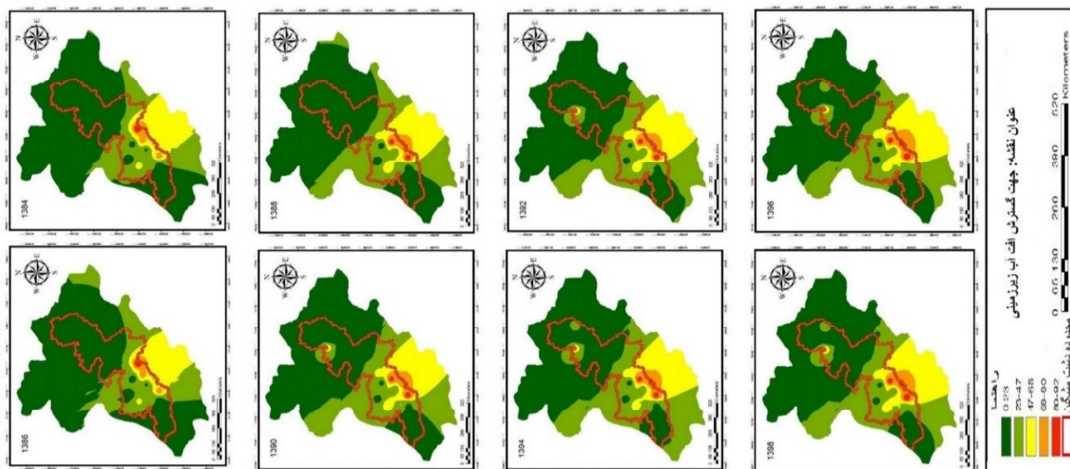
داده‌های GPS

با استفاده از ابزار GPS موقعیت ۳۰ نقطه از منطقه جهت مقایسه با نشست تشخیص داده شده از طریق فن تداخل-سنجی راداری برداشت شد. مشخصات نقاط برداشت شده در جدول (۶) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۶: مشخصات نقاط برداشت شده (GPS) منبع: یافته‌های پژوهش

ردیف	x	y
۱	۳۸۳۲۰۷	۴۷۳۷۴۶
۲	۳۸۲۹۱۹	۴۷۳۰۱۲
۳	۳۸۳۱۴۵	۴۷۳۰۴۷
۴	۳۸۳۳۲۹	۴۷۴۰۳۸
۵	۳۸۳۱۲۲	۴۷۳۲۴۴
۶	۳۸۳۲۲۸	۴۷۳۲۱۰
۷	۳۸۳۱۰۱	۴۷۳۵۴۳
۸	۳۸۲۹۴۶	۴۷۳۵۱۹
۹	۳۸۳۰۰۳	۴۷۳۶۵۵
۱۰	۳۸۲۷۳۲	۴۷۳۵۲۳
۱۱	۳۸۲۶۳۳	۴۷۳۶۵۹
۱۲	۳۸۲۳۵۶	۴۷۴۰۰۹
۱۳	۳۸۲۴۰۴	۴۷۳۸۲۵

۱۴	۳۸۲۳۱۹	۴۷۳۹۵۴
۱۵	۳۸۲۴۳۳	۴۷۴۲۵۷
۱۶	۳۸۲۶۲۰	۴۷۴۲۵۲
۱۷	۳۸۲۷۵۵	۴۷۴۶۳۹
۱۸	۳۸۲۹۲۷	۴۷۴۹۵۰
۱۹	۳۸۳۱۵۶	۴۷۵۰۰۲
۲۰	۳۸۳۴۳۵	۴۷۵۲۰۵
۲۱	۳۸۳۶۳۶	۴۷۴۸۰۰
۲۲	۳۸۳۹۳۷	۴۷۴۶۳۹
۲۳	۳۸۴۰۲۸	۴۷۵۰۲۳
۲۴	۳۸۳۹۲۷	۴۷۵۲۲۵
۲۵	۳۸۴۱۳۵	۴۷۵۲۰۱
۲۶	۳۸۴۰۲۸	۴۷۵۴۵۶
۲۷	۳۸۴۲۳۵	۴۷۵۷۳۱
۲۸	۳۸۳۹۲۱	۴۷۵۸۳۱
۲۹	۳۸۴۳۴۲	۴۷۵۴۳۲
۳۰	۳۸۴۳۵۳	۴۷۵۹۲۹



شکل ۱۱: نقشه‌های سطح آب زیرزمینی از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۸

منبع: یافته‌های پژوهش

همان‌طور که در شکل (۱۱) ارائه شده، ملاحظه می‌شود طی دوره‌ی مطالعه‌ی رفتار سطح آب زیرزمینی دشت رفته رفته دچار افت محسوسی شده است که با حرکت از جنوب شرق و شرق به سمت مرکز و غرب منطقه این افت در حال پیشروی است.

نتیجه‌گیری

باتوجه به وجود مناطق متعدد فرونشست که بیشتر به دلیل برداشت گسترده از آب‌های زیرزمینی اتفاق می‌افتد، لزوم شناسایی و کنترل و مدیریت این مناطق امری ضروری به نظر می‌رسد. رویارویی با خطر فرونشست بر سه اصل پیش-بینی، تشخیص و پایش استوار است. اولین اقدام برای مطالعه‌ی فرونشست بررسی تغییرهای سطح زمین و اندازه‌گیری نرخ جابه‌جایی می‌باشد. فن تداخل‌سنجی راداری به‌طور گسترده برای اندازه‌گیری مشخصات توپوگرافی و تغییر شکل سطوح پیوسته‌ی زمین مورداستفاده قرار می‌گیرد. به‌کارگیری روش تداخل‌سنجی تفاضلی با استفاده از تصاویر سنتینل-۱ در این پژوهش، ظرفیت مناسبی از قابلیت‌های آن در تعیین میزان و دامنه‌ی فرونشست در سطح محدوده‌ی مورد مطالعه معرفی کرد. نتایج حاصل از همپوشانی فن تداخل‌سنجی تفاضلی با داده‌های پیمایشی برداشت‌شده به‌وسیله‌ی ابزار GPS، انطباق ۷۵/۳۸ درصدی محدوده‌ی تشخیص فرونشست به‌وسیله‌ی فن تداخل-سنجی راداری با منطقه‌ی فرونشست‌ها را نشان می‌دهد که بیانگر میزان دقت فن تداخل‌سنجی راداری در تشخیص محدوده‌ی دچار فرونشست در منطقه‌ی مورد مطالعه است. به این صورت که موقعیت فرونشست‌های برداشت‌شده از محدوده مورد مطالعه به میزان ۵۰/۰۹ درصد منطبق بر مناطق دچار فرونشست شدید و به میزان ۲۵/۲۹ درصد منطبق بر مناطق دچار فرونشست خفیف می‌باشد که در مجموع به میزان ۷۵/۳۸ درصد با نقشه‌ی حاصل از فن تداخل-سنجی انطباق داشته‌اند. یافته‌های حاصل از به‌کارگیری این روش میزان فرونشست را برای منطقه (۹/۳۵ سانتی‌متر) محاسبه کرد. عامل فرونشست در این ناحیه مانند بسیاری از نواحی ایران و همچنین با استناد به پژوهش‌های صورت‌گرفته پیشین، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و فراهم‌آوردن امکان فشردگی لایه‌های زیرین و در راستای آن نشست سطح زمین است. کانون‌های حداکثری نشست منطبق بر بخش‌های جنوب شرق به سمت جنوب غرب محدوده مورد مطالعه است. این مناطق بیشتر متمرکز بر اراضی زراعی و به‌طور پراکنده، برخی سکونتگاه‌های روستایی است. مناطق شمالی محدوده مورد مطالعه به‌دلیل عدم برداشت زیاد آب از سفره‌ی زیرزمینی، از نظر قرارگیری در معرض فرونشست در حاشیه‌ی امن قرار دارند.

منابع

- آمیغ پی، معصومه، عربی، سیاوش، طالبی، علی و جمور، یحیی، (۱۳۸۸). کاربرد تکنیک تداخل سنجی راداری در مطالعات مناطق فرونشست، شانزدهمین همایش ژئوماتیک تهران، سازمان نقشه‌برداری کشور.
- احمد زاده، حسن، روستایی، شهرام، نیکجو، محمد رضا، دهقانی، مریم، (۱۳۹۴). برآورد مساحت و حجم توده‌ی لغزشی با استفاده از تکنیک‌های InSAR و مشاهدات GPS مطالعه موردی پهنه لغزشی روستای گوگرد، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۲، صص ۱۸-۲۸.
- ابراهیمی، عطربین، قاسمی افشان، گنجائیان، حمید، (۱۳۹۹). پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل-سنجی راداری، جغرافیا و روابط انسانی، دوره ۲، شماره ۴.
- احمدی، نعیمه، موسوی، زهرا، معصومی، زهرا، (۱۳۹۷). مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن، سنجش‌ازدور و GIS ایران، سال دهم، شماره سوم.
- افشاری، امیر، قهرودی تالی، منیژه، صدوق، سید حسن، احتشامی معین آبادی، محسن، (۱۳۹۸). ارزیابی ناپایداری دامنه‌ها در ناحیه راه-آهن لرستان با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال هشتم، شماره ۳، صص ۱۸۳-۲۰۲.

- افضلی، عباسعلی، شریفی کیا، محمد و شایان سیاوش، (۱۳۹۲). ارزیابی آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها و سکونتگاه‌ها از پدیده فرونشست زمین در دشت دامغان، فصلنامه‌ی ژئومورفولوژی کاربردی ایران، دوره اول، صص ۶۱ تا ۷۳.
- باصری نام، سجاد، اسماعیلی، علی، دهقانی، مریم، (۱۳۹۴). ارائه‌ی الگوریتمی جهت بهبود دقت نقشه‌ی پوشش برف با استفاده از تصاویر مودیس، نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، شماره ۱، صص ۶۱-۷۵.
- خوانین زاده، نغمه، معتق، مهدی، شریفی، محمد علی، (۱۳۸۹). مطالعه و بررسی زمین لغزش با استفاده از تداخل‌سنجی راداری، نشریه علمی - ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دوره اول، شماره ۳، صص ۷۳-۷۸.
- خامچیان، ماشالله، نادری، عطاله، منافی آذر، علی، (۱۳۹۷). مقایسه میزان آسیب‌پذیری فرونشست دشت جنوب غربی تهران با مدل وزنی TALPRIF و الگوریتم ژنتیکی، نشریه علوم زمین خوارزمی، جلد ۴، شماره ۲، صص ۱۹۹-۲۱۲.
- خلفی، جعفر و فریده اسدیان، (۱۳۸۰). پدیده‌های ژئومورفولوژی بر منابع آب زیر زمینی دشت سهرین، فصلنامه جغرافیا، شماره ۱۵، صص ۶-۱.
- حقیقت مهر، پریسا، محمدجواد ولدان زوج، رضا تاجیک، سعید جباری، محمودرضا صاحبی، رضا اسلامی، مصطفی گنجیان و مریم دهقانی، (۱۳۹۱). تحلیل سری زمانی فرونشست هشتگرد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، نشریه علمی و پژوهشی علوم زمین، ۱۱۹-۱۱۴.
- روستایی، شهرام، روستایی، مهاسا، شریفی کیا، محمد، یاراحمدی، جمشید، (۱۳۹۲). کاربرد تداخل‌سنجی تفاضلی راداری در شناسایی و پایش زمین لغزش‌ها مطالعه موردی: حوزه آبخیز گرم چای میانه، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۵، شماره ۳، صص ۱۹۰-۱۹۸.
- شمشکی، امیر، بلورچی، جواد و فرهاد انصاری، (۱۳۸۴). بررسی فرونشست زمین در دشت تهران شهریار، بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین، مدیریت زمین‌شناسی مهندسی و زیست‌محیطی، تهران - سازمان زمین‌شناسی.
- شیرانی، کورش، سیف، عبدالله، شریفی کیا، محمد، (۱۳۹۳). ارزیابی کارایی سنجنده‌های ASAR و PALSAR به کمک تداخل‌سنجی تفاضلی در شناسایی و پایش زمین لغزش‌ها در زاگرس، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، شماره ۳، جلد ۶، صص ۲۸۸-۳۰۱.
- شفیعی، نجمه، مختاری، لیلا گلی، امیر احمدی، ابوالقاسم، زندی، رحمان، (۱۳۹۹). بررسی فرونشست آبخوان دشت نور آباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال هشتم، شماره ۴، صص ۹۳-۱۱۱.
- فاطمی، سید باقر، و رضائی، یوسف، (۱۳۹۱). مبانی سنجش‌ازدور. انتشارات آزاده.
- مقصودی، یاسر، امانی، رضا، احمدی، حسن، (۱۳۹۸). بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل ۱ و تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گره‌های دائمی، مجله تحقیقات منابع آب ایران، شماره ۱، صص ۳۱۳-۲۹۹.
- نادری، کیوان، اصغری مقدم اصغر، کرد، مهدی، (۱۳۹۷). روش جدیدی برای شناسایی و تعیین مناطق فرونشست مطالعه موردی: سفره دشت سلماس، مجله اکوهیدرولوژی، شماره ۱، صص ۸۵-۹۷.
- Atzori, S., 2013. Understanding earthquakes: the key role of radar images. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 720, 178-181. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2012.12.00>.
- An, Karen., 2015. Investigating the Relationship between Land Subsidence and Groundwater Depletion in the Nort Plain Using GRACE and ICESat Master's Thesis, Univeversity of California, Los Angeles, p44.
- Bordoni, M., Boni, R., Colombo, A., Lanteri, L., Meisina, C., 2018. A methodology for ground motion area detection (GMA-D) using A-DInSAR time series in landslide investigations. Catena 163, 89-110. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.013>.
- Chen, M., Tomás, R., Li, Zh., Motagh, M., Li, T., Hu, L., Gong, H., Li, X., Yu, J., Gong, X., 2016. Imaging Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry, Remote Sens, 8(6), 468.
- Di Martire, D., Iglesias, R., Monnels, D., Centolanza, G., Sica, S., Ramondini, M., Pagano, L., Mallorqui, J.J., Calcaterra, D., 2014. Comparison between differential SAR interferometry and ground measurements data in the displacement monitoring of the earthdam of Conza della Campania (Italy). Remote Sens. Environ. 148, 58-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.014>.
- Dong, J., Liao, M., Xu, Q., Zhang, L., Tang, M., Gong, J., 2018. Detection and displacement characterization of landslides using multitemporal satellite SAR interferometry: A case study of Danba County in the Dadu River Basin. Engineering Geology 240, 95- 109. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.015>
- Ho, D. T. D., Tran, C. Q., Nguyen, A. D. and Le., 2016. Measuring ground subsidence in Hanoi city by radar interferometry. Science and Technology Development Journal, 19 (2)122-129.

- Infante, D., Confuorto, P., Dimartire, D., Ramondini, M., Calcaterra, D., 2016. Use of DInSAR data for multi-level vulnerability assessment of urban setting affected by slowmoving and intermittent landslides. *Procedia engineering* 158(2016) 470-475.
- Lazecky, M., Canaslan, H., Hlavacova, I., 2015. Gurboga, S. Practical Application of Satellite-Based SAR Interferometry for the Detection of Landslide Activity. *Procedia earth and Planetary Science* 15, 613-618. doi: 10.1016.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., et al., 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by Radar Interferometry. *Nature*, 364, 138-142.
- Motagh, M., Shamshiri, R., Haghighi, M.H., Wetzel, H.U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S. and Arabi, S., 2017. Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements.
- Novellino, A., Cigna, F., Sowter, A., Syafiudi, M.F., Di Martire, D., Ramondini, M., Calcaterra, D., 2015. Intermittent Small Baseline Subset (ISBAS) InSAR Analysis to monitor landslides in Costa Della Gaveta, Southern Italy. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 26-31 July 2015, Milan, Italy, pp. 3536-3539 <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326584>.
- Raspini, F., 2013. Advanced interpretation of land subsidence by validated multi-interferometric SAR data: the case study of the Anthemountas basin (Northern Greece). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (23): 24-45.
- Sanabria, M.P., Guardiola-Albert, C., Tomás, R., Herrera, G., Prieto, A., Sánchez, H., Tessitore, S., 2014. Subsidence activity maps derived from DInSAR data: Orihuela case study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14, 1341-1360. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-14-1341-2014>.
- Sanabria, M.P., Guardiola-Albert, C., Tomás, R., Herrera, G., Prieto, A., Sánchez, H., Tessitore, S., 2014. Subsidence activity maps derived from DInSAR data: Orihuela case study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14, 1341-1360. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-14-1341-2014>.
- Smith, R.G ; Knight R ; Chen J ; Reeves J.A ; Zebker H.A ; Farr T and Liu Z., 2017. Estimating the permanent loss of groundwater storage in the southern San Joaquin Valley, California, *Water Resources Research journal*, vol 53, , pp 2133-2148.

References

References (in Persian)

- Amighpi, M., Arabi, S., Talebi, A., Jamour., Y., (1388), Application of radar interferometry technique in studies of subsidence areas, 16th Geomatics Conference, Tehran - National Surveying Organization, 1388. [In Persian]
- Ahmadzadeh, H., Roustaei, Sh., Nikjoo, M., Dehghani., M., (2015) Estimating the area and volume of slippery mass using InSAR techniques and GPS observations: A case study of slippery slope in Sulfur village, Quantitative Geomorphological Research, Fourth Year, Issue 2. Pp. 18-28. [In Persian]
- Afshari, A., Ghahroordi Tali, M., Sadough, S., Ehteshami M., (1398) Evaluation of slope instability in Lorestan railway area using radar differential interferometry method, Quantitative Geomorphological Research, Year 8, No. 3. Pages. 183-202. [In Persian]
- Afzali, A., Sharifi Kia, M., Shayan., S., (2013) Assessing the vulnerability of infrastructures and settlements to the phenomenon of land subsidence in Damghan plain, Iranian Journal of Applied Geomorphology, Volume 1. Pp. 61 to 73. [In Persian]
- Baseri Nam, S., Ismaili, A., Dehghani, M., (2015), Algorithmic presentation to improve the accuracy of snow cover mapping using MODIS images, Journal of Spatial Information Technology Engineering, No. 1. pp. 61-75. [In Persian]
- Fatemi, S.B., Rezaei Y., (2012). Fundamentals of Remote Sensing. Azadeh Publications. [In Persian]
- Khaninzadeh, N., Motagh, M., Sharifi, M. A., (2010) Study and study of landslides using radar interferometry, Journal of Surveying Engineering and Spatial Information, Volume 1. Number 3. Pp. 73-78. [In Persian]
- Khamchian, M., Naderi, A., Monafi Azar, A., (1397) Comparison of subsidence vulnerability of plain southwest of Tehran with ALPRIFT weight model and genetic algorithm, Journal of Kharazmi Earth Sciences, Volume 4. No. 2. pp. 199-212. [In Persian]
- Maghsoudi, Y., Amani, R., Ahmadi, H., (1398) Investigation of land subsidence behavior in the western region of Tehran using Sentinel 1 sensor images and radar interferometry technique based on the distribution of permanent nodes, Iranian Journal of Water Resources Analysis, No. 1. pp. 313-299. [In Persian]
- Naderi, K., Asghari M., Asghar, Kurd, M., (2015) A New Method for Identifying and Determining Subsidence Areas (Case Study: Salmas Plain Table), Journal of Echo Hydrology, No. 1. Pp. 85-97. [In Persian]
- Rustaei, Sh., Roustaei, M., Sharifi Kia, M., Yarahmadi, J., (2013) Application of Radar Differential Interferometry in Landslide Detection and Monitoring, Case Study: Middle Tea Hot Watershed, Journal of Watershed Engineering and Watershed Management, Volume 5. No. 3. pp. 190-198. [In Persian]
- Shemshaki, A., Javad B., Ansari, F., (1384)"Study of Landslide in Tehran Shahriyar Plain". Engineering and Environmental Geology Management, (Tehran - Geological Survey). [In Persian]
- Shirani, K., Seif, A., Sharifi Kia, M., (2014) Evaluation of the efficiency of ASAR and PALSAR sensors using differential interferometry in landslide detection and monitoring in Zagros, Journal of Watershed Engineering and Management, No. 3. Volume 6. pp. 288-301. [In Persian]

References (in English)

- Atzori, S., 2013. Understanding earthquakes: the key role of radar images. Nucl. Instrum.Methods Phys. Res. 720, 178–181. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2012.12.00>.
- An, Karen., 2015. Investigating the Relationship between Land Subsidence and Groundwater Depletion in the Nort Plain Using GRACE and ICESat Master's Thesis, Univeversity of California, Los Angeles, p44.
- Bordoni, M., Boni,R., Colombo,A., Lanteri,L., Meisina,C., 2018. A methodology for ground motion area detection (GMA-D) using A-DInSAR time series in landslide investigations. Catena 163, 89–110. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.013>.
- Chen, M., Tomás, R., Li, Zh., Motagh, M., Li, T., Hu, L., Gong, H.,Li, X., Yu, J., Gong, X., 2016. Imaging Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction in Beijing (China) Using Satellite Radar Interferometry, Remote Sens, 8(6), 468.
- Di Martire, D., Iglesias, R., Monnels, D., Centolanza, G., Sica, S., Ramondini, M., Pagano, L.,Mallorqui, J.J., Calcaterra, D., 2014. Comparison between differential SAR interferometry and ground measurements data in the displacement monitoring of the earthdam of Conza della Campania (Italy). Remote Sens. Environ. 148, 58–69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.014>.
- Dong,J., Liao,M., Xu,Q., Zhang,L., Tang,M., Gong,J., 2018. Detection and displacement characterization of landslides using multitemporal satellite SAR interferometry: A case study of Danba County in the Dadu River Basin. Engineering Geology 240, 95– 109. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.015>
- Ho, D. T. D., Tran, C. Q., Nguyen, A. D. and Le., 2016. Measuring ground subsidence in Hanoi city by radar interferometry. Science and Technology Development Journal, 19 (2)122-129.
- Infante, D., Confuorto, P., Dimartire, D., Ramondini,M., Calcaterra,D., 2016. Use of DInSAR data for multi-level vulnerability assessment of urban setting affected by slowmoving and intermittent landslides. Procedia engineering 158(2016) 470-475.
- Lazecky,M.,CanaslanComut.,Hlavacova,I., 2015. Gurboga,S.Practical Application of Satellite-Based SAR Interferometry for the Detection of Landslide Activity.procedia earth and Planety Science 15, 613-618. doi: 10.1016.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer,

- G., Feigl, K., et al., 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by Radar Interferometry. *Nature*, 364, 138–142.
- Motagh, M., Shamshiri, R., Haghighi, M.H., Wetzel, H.U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S. and Arabi, S., 2017. Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements.
- Novellino, A., Cigna, F., Sowter, A., Syafiudi, M.F., Di Martire, D., Ramondini, M., Calcaterra, D., 2015. Intermittent Small Baseline Subset (ISBAS) InSAR Analysis to monitor landslides in Costa Della Gaveta, Southern Italy. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 26–31 July 2015, Milan, Italy, pp. 3536–3539 <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326584>.
- Raspini, F., 2013. Advanced interpretation of land subsidence by validati multi-interferometric SAR data: the case study of the Anthemountas basin (Northern Greece). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (23): 24-45.
- Sanabria, M.P., Guardiola-Albert, C., Tomás, R., Herrera, G., Prieto, A., Sánchez, H., Tessitore, S., 2014. Subsidence activity maps derived from DInSAR data: Orihuela case study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14, 1341–1360. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-14-1341-2014>.
- Sanabria, M.P., Guardiola-Albert, C., Tomás, R., Herrera, G., Prieto, A., Sánchez, H., Tessitore, S., 2014. Subsidence activity maps derived from DInSAR data: Orihuela case study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14, 1341–1360. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-14-1341-2014>.
- Smith, R.G ; Knight R ; Chen J ; Reeves J.A ; Zebker H.A ; Farr T and Liu Z., 2017. Estimating the permanent loss of groundwater storage in the southern San Joaquin Valley, California, *Water Resources Research journal*, vol 53, , pp 2133-2148.