



جغرافیا و روابط انسانی، تابستان ۱۴۰۱، دوره ۵، شماره ۱، صص ۱۵۷-۱۳۹

پایش فروچاله‌های شهر کبودرآهنگ همدان با استفاده از تکنیک تداخل سنجی

راداری

آرزو امینی^۱، نیکروز مستوفی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد سنجش از دور، دانشکده فنی-مهندسی، دانشگاه آزاد تهران-جنوب، تهران، ایران

Arezouamini73@gmail.com

۲- عضو هیئت علمی و مدیر گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده فنی-مهندسی، دانشگاه آزاد تهران-جنوب، تهران،

mostofi_n@yahoo.com

ایران (نویسنده مسئول)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۰

پیش‌زمینه و هدف: فرونشست سطح زمین در اثر استخراج بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، یکی از رویدادهایی است که در ایران به وفور مشاهده شده است. با توجه به استخراج بی‌رویه منابع آب زیرزمینی در کشور، متأسفانه روزبه‌روز استان‌های بیشتری دچار فرونشست زمین شده یا در معرض خطر فرونشست زمین قرار می‌گیرند از جمله استان‌های کرمان، تهران، خراسان رضوی، همدان، گلستان و اصفهان را می‌توان نام برد. دشت کبودرآهنگ همدان غنی‌ترین دشت استان همدان از نظر دارا بودن منابع آب زیرزمینی می‌باشد اما متأسفانه در ۳۰ سال اخیر به علت برداشت بیش از حد از آب‌های زیرزمینی به منظور تامین نیازهای کشاورزی و صنعتی و عدم وجود نظارت کافی بر این مسئله، به شدت با افت سطح آب‌های زیرزمینی مواجه شده است که سبب بروز فرونشست و البته وقوع فروچاله‌ها در شهر کبودرآهنگ شده است. هدف از انجام این پژوهش شناسایی مناطق مستعد وقوع فروچاله با بررسی نرخ فرونشست جهت پیشگیری و کاهش آسیب‌های ناشی از آن می‌باشد.

روش: با نتایج پردازش بدست آمده به کمک شش سری تصاویر راداری ماهواره SENTINEL-1 در بازه زمانی سال ۲۰۱۷ الی ۲۰۱۸ با استفاده از نرم‌افزار SNAP نرخ فرونشست بدست آمده است و براساس نرخ بدست آمده نواحی پرخطر و مستعد وقوع فروچاله شناسایی شده است.

یافته‌ها: پس از بررسی بازه‌های تقریباً سه ماهه از منطقه مورد مطالعه با استفاده از تصویر دوره اول و دوره آخر به بازه زمانی ۳۶۱ روز یعنی تصاویر ۲۰۱۷/۰۹/۱۵ تا ۲۰۱۸/۰۹/۱۰ منطقه مورد مطالعه به طور کلی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که در بازه یک ساله به میزان ۱۴/۵ سانتی‌متر محدوده مورد مطالعه فرونشست داشته است، که این فرونشست به طور جزئی بیشتر در مناطق کردآباد، نوآباد، کبودرآهنگ، فامنین و به طور کلی در دشت فامنین، کبودرآهنگ، قهاوند و اطراف همدان اتفاق افتاده است. که این نتایج می‌تواند خبر وقوع خطر فروچاله‌ها در این مناطق را بدهد.

نتیجه‌گیری: نتایج نهایی در مجموع فرونشست حدود ۱۴/۵ سانتی‌متر در محدوده را نشان می‌دهد که بیشتر این فرونشست‌ها در اطراف مناطق شهری و نزدیک به مناطق مسکونی اتفاق افتاده است که این عامل می‌تواند خبر از وقوع فاجعه‌های انسانی قریب به وقوع را در استان همدان به خصوص دشت کبودرآهنگ را بدهد.

کلید واژه: فرونشست، فروچاله، تداخل سنجی راداری، شهر کبودرآهنگ، استان همدان



مقدمه

پدیده فروچاله و نشست زمین در دشت‌ها از خطرات طبیعی تشدیدشونده هستند که امروزه به دلیل سرعت و تراکم شکل‌گیری مورد توجه قرار گرفته‌اند. این پدیده در اغلب موارد به صورت عمودی اتفاق افتاده و در مدت زمان کوتاه محسوس نیست. عموماً این پدیده به صورت موضعی است و مکانیسم آن‌ها به فرایندهای فیزیکی و طبیعی بستگی دارد (امیدوار، ۲۰۱۱). این مخاطرات طبیعی جان و مال انسان‌ها را در نقاط مختلف کارستی دنیا تهدید می‌کنند. در مقیاس جهانی، خطر فرونشست و فروچاله‌ها بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ که هم‌زمان با صنعتی‌شدن و رشد شهرنشینی است به اوج خود رسید (والتام، ۱۹۸۹). عوامل متعددی باعث ایجاد فرونشست زمین می‌شوند: از جمله انحلال، آب‌شدگی یخ‌ها و تراکم نهشته‌ها، حرکت آرام زمین و خروج گدازه و با عملیات انسانی نظیر معدن‌کاری با برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، نفت و گاز، ریزش سازه‌های زیرزمینی مانند تونل‌ها و یا ایجاد حفرات در اثر انحلال (مهادنیا، ۱۳۸۵). خسارت‌های ناشی از رخداد فرونشست و پدیده‌های پیرو آن شامل: بیابان‌زایی، آسیب‌پذیری آبخوان‌ها، تغییر توپوگرافی زمین، آلودگی زیست‌محیطی و تغییر کیفیت آب‌های زیرزمینی و فروچاله‌ها می‌باشد (رشیدترابی و بی‌نا، ۱۳۹۳). فروچاله‌ها گودال‌های بسته‌ای هستند که به صورت حفره‌هایی در سطح زمین‌های آهکی و دیگر سنگ‌های انحلال‌پذیر یا آبرفتی به وجود می‌آیند (کرم و همکاران، ۱۳۹۲). مصرف روزافزون آب، رشد مصرف آب در کشاورزی، حفر چاه‌های مجاز و غیرمجاز در طول چند دهه گذشته، موجب کاهش و افت سطح منابع آب زیرزمینی و در پی آن نشست دشت‌ها و ایجاد فروچاله شده است. طبق گزارش‌ها تاکنون ۱۵ استان ایران از جمله تهران، کرمان، یزد، اصفهان، خراسان رضوی، همدان، فارس، آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، سمنان، البرز، قزوین، مرکزی، اردبیل و گلستان با پدیده فرونشست زمین مواجه شده‌اند. در این بین استان همدان با داشتن ۲۴ فروچاله از مناطق آسیب‌دیده از این پدیده زیست‌محیطی است. بیشترین عمق فروچاله در استان همدان مربوط به روستای کردآباد در شهرستان کبودرآهنگ با ۶۰ متر عمق است (<http://www.drangle.ir/>). تغییرات سطح زمین به میزان قابل توجهی باعث افزایش روند بلایای طبیعی می‌شوند که اثر این بلایا باعث خسارات شدید بر عوارض سطح زمین می‌شود و با بهره‌گیری از تکنیک‌های راداری که به منظور شناسایی و هشدار و کاهش خسارات مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مطالعه و شناسایی فروچاله‌ها می‌توان از روش‌های سنتی مانند روش‌های ژئومورفولوژیکی و مجموعه داده‌های جغرافیایی مثل تصاویر هوایی، نقشه‌های توپوگرافی یا نقشه‌های ارتفاعی و نقشه‌برداری زمینی استفاده کرد. استفاده از روش‌های سنتی اگرچه دقت بالایی دارند اما با توجه به اینکه وقوع فروچاله در یک ناحیه ناگهانی رخ می‌دهد و در اندازه‌های مختلفی هستند قابل پیش‌بینی و اندازه‌گیری نیستند. استفاده از روش‌های سنتی برای بررسی نشست‌ها و فروچاله‌ها برای مناطق وسیع از لحاظ اقتصادی به صرفه نیست و گاهی اوقات غیرممکن می‌باشد همچنین در این روش‌ها نیاز به مواردی چون نیروی انسانی، نقاط کنترل زمینی و ایستگاه زمینی داریم. در این روش فقط تغییرات بزرگ قابل شناسایی هستند (گوتیرز و همکاران، ۲۰۱۱). استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری INSAR این امکان را فراهم می‌آورد با دقت بالا، در مناطق وسیع و در تمام ساعات شبانه روز تغییرات

¹Waltham

²Geomorphological

³Topographic maps

⁴Digital elevation models) DEMs(

⁵Gutierrez

در حد سانتی متر بررسی و شناسایی شود (باکون^۱ و همکاران، ۲۰۲۰؛ براردینو^۲ و همکاران، ۲۰۰۳؛ باونگا، نوتریکاتو، رفیس و واسوفسکی^۳؛ هائو^۴ و همکاران، ۲۰۱۹؛ کانگ، ژائو، ژانگ، لو، و لی^۵؛ ۲۰۱۷؛ واسوسکی و بوونگا^۶؛ ۲۰۱۴؛ ژائو، وو، دینگ و وانگ^۷؛ بوزانو^۸ و همکاران، ۲۰۱۷). البته این روش محدودیت‌هایی نیز دارد که به علت ثابت بودن مدار و شرایط هندسی اخذ داده اتفاق می‌افتد و سبب کاهش انسجام در اخذ داده‌ها می‌شود (کاستاندا، پورتی و سویریس^۹؛ ۲۰۱۱؛ فرتی، پراتی، و روکا^{۱۰}، ۲۰۱۱). استفاده تلفیقی از دو روش سنتی و جدید به صورت مکمل سبب می‌شود مجموعه اطلاعات کاملی برای بررسی تغییرات سطح زمین فراهم آورده شود (براردینو و همکاران، ۲۰۰۳؛ بوونگا و همکاران، ۲۰۰۶؛ واسوفسکی و بوونگا، ۲۰۱۴). در دو دهه اخیر تحقیقات زیادی در زمینه بررسی فروچاله‌ها با استفاده از تکنیک‌تداخل‌سنجی راداری INSAR انجام شده است (آتزوری، بائر، آنتونیولی و سالوی^{۱۱}؛ ۲۰۱۵؛ گالو، کاستاندا، گتوریز، و هررا^{۱۲}؛ ۲۰۱۵؛ گوتیرز و همکاران، ۲۰۱۱؛ ایتیری^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۵؛ نوف^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۹). اولین مطالعه رسمی فروچاله‌ها توسط سازمان یونسکو در ۱۹۰۰ انجام شد که به بررسی تفصیلی ۴۵ فروچاله در ۱۵ کشور جهان پرداخت از جمله مطالعات می‌توان به فروچاله‌های جنوب شرق آمریکا (ویلسون و بک^{۱۵}؛ ۱۹۸۸)، فروچاله‌های پاناما (امریکا نام برد، گونگیو^{۱۶} و انفانگ^{۱۷} در مطالعه‌ای (۱۹۹۹) ایجاد فروچاله‌های معدن ذغال‌سنگ و سنگ آهن مناطق کارستی چین دریافتند که هجوم آب از آبخوان‌ها، خلأهای موجود در خاک، وزن خاک و فرایند اشباع به تشکیل فروچاله کمک می‌کنند و اقدامات کلیدی کنترل‌کننده وقوع فروچاله، کاهش نوسانات آفت آب و مهر و موم کردن حفرات مناطق کارستی است. در سال ۲۰۰۸ پانو^{۱۸} و زیسمان^{۱۹} ارتباط عکس‌های هوایی، نقشه‌ها، حفره‌ها و مطالعات ژئوفیزیکی برای تشخیص فروچاله‌ها تأیید می‌کنند. پین و همکارانش در سال ۲۰۱۲، از پردازش‌های میکروگرامتری^{۲۰} GPS و INSAR در بازه زمانی ژانویه تا جولای سال ۲۰۰۷ و از تداخل‌نماهای ماهواره ALOS-1 در تگزاس استفاده کرد و نشان داد نرخ فرونشست حدود ۳۰ سانتی متر در سال است (پین، باکلی، کالینز و ویلسون^{۲۱}؛ ۲۰۱۲). در سال ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ در همان ناحیه از تصاویر Sentinel-1A/B جهت بررسی ریزش فروچاله‌ها استفاده شده است (کیم و لو^{۲۲}؛ ۲۰۱۸؛ کیم، لو و دگراندر^{۲۳}؛ ۲۰۱۶). تکنیک تداخل‌سنجی راداری که جهت

¹Bakon²Berardino³Bovenga, Nutricato, Refice, & Wasowski⁴Hao⁵Kang, Zhao, Zhang, Lu, & Li⁶Wasowski & Bovenga,⁷Zhao, Wu, Ding, & Wang⁸Bozzano⁹Castaneda, Pourthie, & Souyris¹⁰Ferretti, Prati, & Rocca¹¹Atzori, Baer, Antonioli, & Salvi¹²Galve, Castañeda, Gutiérrez,² & Herrera¹³Intrieri¹⁴Nof¹⁵Wilson & Beck¹⁶Orlando¹⁷Gongyu¹⁸Wanfang¹⁹Panno²⁰Zisman²¹Microgrammetry²²Paine, Buckley, Collins, & Wilson²³Kim & Lu²⁴Degrandpre

تشخیص تغییر شکل‌های طولانی مدت در مناطق مستعد تشکیل فروچاله انجام شده است (چانگ و هانسن، ۲۰۱۴). و این روش جهت شناسایی حرکت مکانی فروچاله‌ها در مناطقی از اسرائیل، آمریکا، مکزیک و اسپانیا انجام شده است (آونی و همکاران، ۱۳۹۵؛ بائر و همکاران، ۲۰۰۲؛ کاستاندا، گوتیرز، مانونتا، وگالو، ۲۰۰۹؛ کلسون و همکاران، ۲۰۰۳؛ گوتیرز و همکاران، ۲۰۱۱؛ جونز و بلوم، ۲۰۱۴؛ نوف و همکاران، ۲۰۱۳؛ راکر، پاندا، مایرز و لوملر، ۲۰۱۳). در مطالعه‌ای تحت عنوان "پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری" با استفاده از تصاویر راداری ماهواره سنتینل-۱ و نرم‌افزارهای *snaphu* و *snaphu* مقدار جابه‌جایی در این محدوده محاسبه شده است و علت اصلی وقوع فرونشست در این ناحیه برداشت آب‌های زیرزمینی عنوان شده است (ابراهیمی، عطری، قاسمی، افشان، & گنجائیان، ۲۰۲۰).

در مطالعه‌ای در سیلزیای لهستان ۳۴۵ فروچاله در بازه زمانی ۲۰ سال (۲۰۱۳-۱۹۹۲) بررسی شده است. بیشتر این فروچاله در مناطقی با جمعیت بالا رخ داده است و علت اصلی وقوع آن‌ها، معدن‌کاری بوده است. برای بررسی و شناسایی از فناوری راداری استفاده شده است و از تصاویر *ENVISAT SAR* در مدت زمان ماه مارچ ۲۰۰۳ تا آگوست ۲۰۱۰ و از روش *PSI* با استفاده از نرم‌افزار *Doris* برای تهیه اختلاف فاز و از *SRTM* برای تولید *DEM* استفاده شده است. با استفاده از تصاویر اخذ شده مناطق مستعد فروچاله نیز شناسایی شده است (مالینوفسکا و همکاران، ۲۰۱۹). در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۹، به تجزیه و تحلیل فرونشست در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ با استفاده از تکنیک *InSAR* در تگزاس که سبب پدید آمدن فروچاله‌ها می‌شود. در این مطالعه از تکنیک سری زمانی *InSAR* برای پردازش ۱۶ تصویر با پلاریزاسیون *HH* در باند *L* که توسط ماهواره *AlosPlasar* اخذ شده است، استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که دو فروچاله بزرگ طی سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۰۲ رخ داده است و پس از آن در طی سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۱۱ در بازه زمانی ۴ ساله بزرگترین فروچاله رخ داده است نرخ فرونشست در این بازه ۴۰ سانتی‌متر در سال و در سال ۲۰۱۰، ۵۰ سانتی‌متر در سال است. که یکی از علل رخداد این فاجعه خشکسالی و پس از آن بارش‌های سیل آسا است (شی، تانگ، لیو، کیم، و پن، ۲۰۱۹). در مطالعه‌ای در مرکز غرب فلوریدا با استفاده از *InSAR* در سال ۲۰۲۰ مشخص شد که فعالیت فروچاله‌ها در این منطقه یک تهدید جدی برای مردم است. افزایش نرخ رشد فروچاله‌ها در این ناحیه به سبب استفاده از آب‌های زیرزمینی و منابع آبریززمینی است. به این خاطر برای شناسایی فرونشست زمین که منجر به فروریختن زمین (فروچاله) می‌شود، از داده‌های تداخل‌سنجی راداری استفاده شده است. در این تحقیق از داده‌های جمع‌آوری شده تراسر-ایکس که در مدت ۱/۷ سال با قدرت تفکیک از ۰/۲۵ تا ۰/۶۰ متر و همچنین از تکنیک *PSI* با استفاده از *StaMPS*، استفاده شده است (رابینسون^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۰). در پژوهشی در سال ۲۰۲۱ در بازه زمانی ۲۰۱۹-۲۰۲۰ با استفاده از ۱۱ سری داده ماهواره *SENTINEL1A* و

¹Chang & Hanssen

²Avni

³Baer

⁴Castañeda, Gutiérrez, Manunta, & Galve

⁵Closson

⁶Jones & Blom

⁷Rucker, Panda, Meyers, & Lommler

⁸Silesia

⁹Preference selection index

¹ Malinowska 0

¹ Shi, Tang, Lu, Kim, & Peng 1

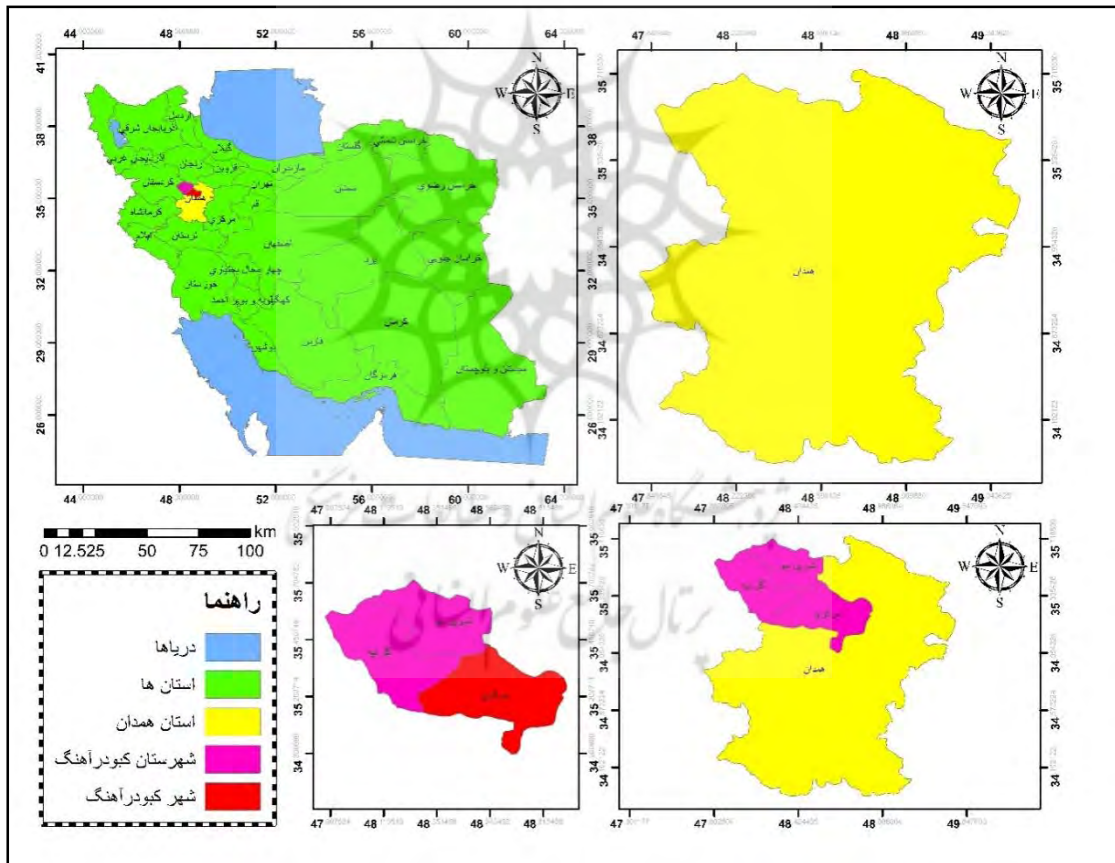
¹ Robinson 2

SENTINEL1B و با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای تغییر شکل سطح زمین در منطقه کریکالا ترکیه برای ارزیابی نواحی مستعد وقوع فروچاله استفاده شده است.

هدف از انجام این پژوهش میزان فرونشست اتفاق افتاده در دشت کبودرآهنگ مورد بررسی قرار گرفته است. دلیل انتخاب این بازه زمانی آخرین فروچاله اتفاق افتاده در دشت کبودرآهنگ در روز ۲۰۱۸/۰۹/۰۴ به عمق ۶۰ متر در نزدیکی کردآباد می باشد. در این پژوهش قرار است تغییرات یکسال اخیر اتفاق افتاده در دشت کبودرآهنگ و اطراف آن مورد بررسی قرار گیرد.

روش

شکل ۱ محدوده مطالعاتی، شهر کبودرآهنگ شهری در استان همدان است و مرکز شهرستان کبودرآهنگ است. این شهر از سه بخش به نام های؛ مرکزی (کبودرآهنگ)، گل تپه و شیرین سو و ۱۱ دهستان دیگر تشکیل شده است. موقعیت جغرافیایی شهر کبودرآهنگ (۳۵،۱۹۶۱ درجه شمالی و ۴۸،۷۲۹۴ درجه شرقی) می باشد.



شکل انقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

برای بررسی نرخ فرونشست از تصاویر ماهواره SENTINEL-1 استفاده شده است. سنجنده SENTINEL-1 شامل دو ماهواره SENTINEL1A&1B می‌باشد. تصویربرداری این سنجنده در باند C (فرکانس ۵/۴ هرتز) در چهار حالت EW^2 ، SM^1 ، IW^3 و WV^4 انجام می‌شود. در جدول ۱ مشخصات تصاویر استفاده شده نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات تصاویر مورد استفاد

شماره	تاریخ تصویربرداری	فرمت تصویربرداری	حالت تصویربرداری (مد)	گذر و قطبش تصویربرداری	پلاریزاسیون
۱	۲۰۱۷/۰۹/۱۵	SLC	IW	ISDV	VV
۲	۲۰۱۷/۱۲/۰۸	SLC	IW	ISDV	VV
۳	۲۰۱۸/۰۳/۰۲	SLC	IW	ISDV	VV
۴	۲۰۱۸/۰۶/۰۶	SLC	IW	ISDV	VV
۵	۲۰۱۸/۰۸/۰۵	SLC	IW	ISDV	VV
۶	۲۰۱۸/۰۹/۱۰	SLC	IW	ISDV	VV

در این تحقیق پس از تهیه تصاویر از روش تداخل‌سنجی راداری برای برآورد مقدار جابه‌جایی در منطقه استفاده شده است. جهت انجام تداخل‌سنجی از نرم‌افزار SNAP8.0 استفاده شده است. این نرم‌افزار جعبه‌ابزارهایی^۵ برای پردازش داده‌های راداری دارد. مراحل پیاده‌سازی و پردازش تصاویر راداری در نرم‌افزار SNAP در شکل ۲ نشان داده شده است. بدین منظور ابتدا داده‌های اخذ شده وارد نرم‌افزار می‌شوند. سپس عملیات اسپیلیت^۶ به منظور تصحیح اطلاعات مربوط به موقعیت ماهواره در زمان تصویربرداری و زمان حرکت سنجنده^۷ انجام می‌شود. به منظور انباشته کردن^۸ دو تصویر نسبت به یکدیگر عملیات ثبت هر دو تصویر^۹ به منظور افزایش تنوع طیفی^{۱۰} با استفاده از یک آزمون و برد ثابت استفاده می‌شود. پس از اجرای مراحل فوق تداخل‌نمای^{۱۱} حاصل از دو تصویر تشکیل می‌شود. تداخل‌نمای تشکیل شده شامل: مولفه فازی ϕ_{def} تغییر شکل‌های سطحی زمین به خاطر فرایندهای طبیعی یا فعالیت‌های انسانی، فاز ϕ_{topo} ناشی از توپوگرافی، فاز ϕ_{flat} ناشی از مسطح بودن زمین و مولفه فازی ϵ_{Error} مزاحم در تداخل‌نگار (فاز اتمسفری، رمپ‌های مداری و باقی مانده فاز مربوط به نویز) می‌باشند.

$$\phi_{int} = \phi_m - \phi_s = \phi_{def} + \phi_{topo} + \phi_{flat} + \epsilon_{Error}$$

¹Strip map

²Inerfrometric wide swath

³Extra wide swath

⁴Wave

⁵Toolbox

⁶Split

⁷Apply orbit file

⁸Stack

⁹Coregistration

¹⁰ Enhanced spectral diversity

¹¹ Interfrogam

از آنجایی که هدف این پژوهش برآورد مقدار جابه‌جایی می‌باشد، در طی پردازش‌های تداخل‌سنجی سایر منابع خطا باید حذف شد و فقط فاز جابه‌جایی باقی بماند. پس از تهیه تداخل‌نما، خطوط سیاه BURST در تصاویر مشاهده می‌شود به همین منظور عملیات TOPS DEBURST جهت یکپارچه‌سازی تداخل‌نما انجام می‌شود. برای حذف اثر توپوگرافی از عملگر TOPOGRAPHIC PHASE REMOVAL توسط SRTM:30M انجام می‌شود. سپس مرحله بازیابی فاز، جهت بالا بردن درستی این مرحله ابتدا نسبت سیگنال به نویز توسط اجرای فیلتر بر روی فاز تداخل‌نماها انجام می‌شود. از فیلتر گلدشتاین^۱ که توسط گلدشتاین و در سال ۱۹۹۸ طراحی شده، استفاده شد. بازیابی فاز در نرم‌افزار SNAP به منظور تبدیل فاز به جابه‌جایی عمودی قابل اجرا نمی‌باشد. لذا برای انجام آن از نرم‌افزار واسط SNAPHU استفاده می‌شود. پس از انجام اقدامات لازم برای بازیابی فاز در SNAPHU از هر تداخل‌نما خروجی گرفته می‌شود و مجدداً خروجی‌ها را به محیط نرم‌افزار وارد می‌کنیم. پس از آن فاز جابه‌جایی جهت تعیین هرگونه جابه‌جایی از منظر راداری به صورت یک اختلاف فاز میان دو تصویر قبل و بعد از تغییر شکل سطحی زمین بدست می‌آید و پس از آن زمین مرجع کردن و تعیین سیستم مختصات زمینی، روی خروجی انجام می‌شود.



شکل ۲ مراحل انجام تداخل‌سنجی راداری

¹Goldstein pase filtering

یافته‌ها

منابع آب و هیدرولوژی کبودرآهنگ، شامل منابع آب سطحی و منابع آب زیرزمینی می‌باشد. رودخانه قره‌آغاج از جمله منابع آب سطحی می‌باشد. این رودخانه از دامنه‌های غربی و جنوبی سوباشی در ۵۲ کیلومتری شمالغرب همدان سرچشمه می‌گیرد و در ادامه به سیمین‌رود ملحق می‌شود. طول این رودخانه ۴۵ کیلومتر و وسعت حوضه آبریز آن ۴۰۰ کیلومتر مربع است. تعداد چاه‌های مجاز و فعال براساس آخرین آمار و اطلاعات موجود در حفاظت و بهره‌برداری و با عنایت به نوع مصرف ارائه شده است. تعداد، تخلیه و درصد تخلیه چاه‌های مجاز و فعال اداره منابع آب شهرستان کبودرآهنگ براساس نوع مصرف در جدول ۲ نشان داده شده است (امیری و همکاران، ۱۳۹۸).

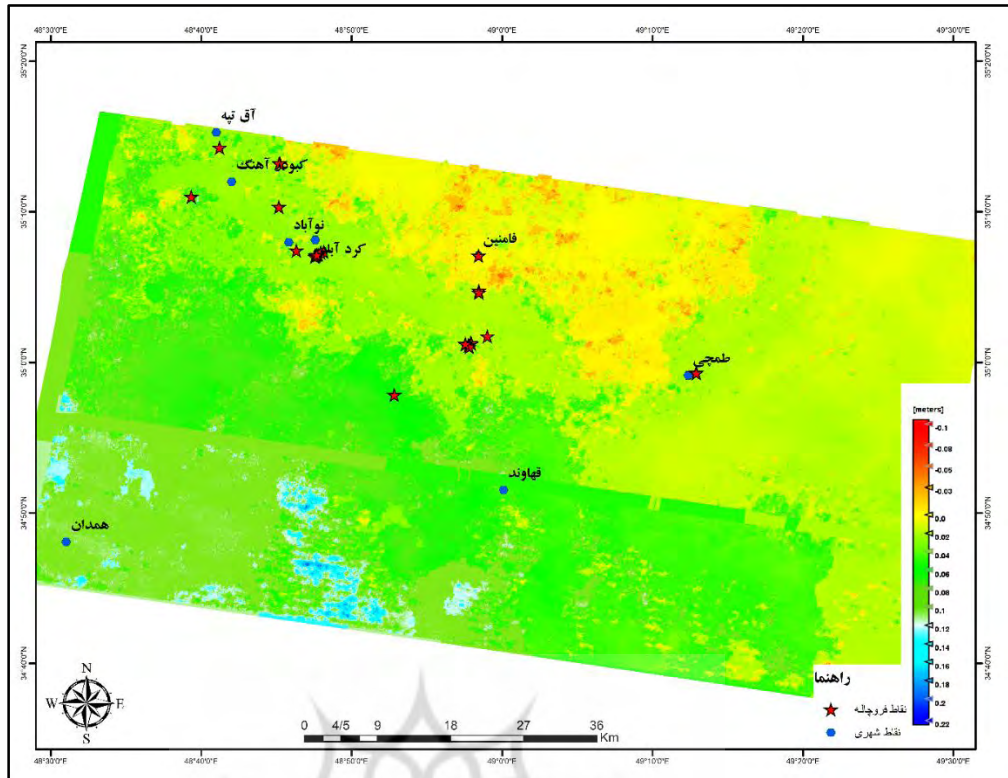
جدول ۲- تعداد؛ تخلیه و درصد تخلیه چاه‌های مجاز و فعال اداره منابع آب شهرستان کبودرآهنگ براساس نوع مصرف.

نوع مصرف	کشاورزی	صنعتی	دام و طیور	شرب اشخاص	شرب شهری	شرب روستایی	خدمات	مجموع
تعداد	۲۲۱۳	۱۰۴	۸۸	۴	۳۶	۱۶۹	۴۸	۲۶۶۲
تخلیه (۱۰۰۰ مترمکعب در سال)	۳۱۲۹۱۰	۲۳۵۷۲	۱۴۱۹	۴۵۱	۷۶۰۶	۱۴۳۷۰	۲۳۹۱	۳۶۲۷۱۹
درصد تخلیه	۸۶,۳	۶,۵	۰,۳۹	۰,۱۲	۲,۱	۴	۰,۶۶	۱۰۰

همان‌طور که اشاره شد، منابع آبی این منطقه شامل سفره‌های آب زیرزمینی و آب‌های سطحی (رودخانه‌ها) می‌باشد. توسعه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی دشت کبودرآهنگ در آذرماه سال ۱۳۷۲ به علت بروز افت مداوم در سطح آب، توسط وزارت نیرو براساس ماده ۴ قانون توزیع عادلانه آب ممنوع اعلام گردید. در این منطقه متأسفانه علاوه بر خشک شدن تدریجی سفره آب زیرزمینی که از حواشی دشت شروع گردیده، در سال‌های اخیر شاهد ایجاد فروچاله‌هایی با ابعاد خطرناک در منطقه هستیم که موجب تهدید و بروز خسارات مالی و حتی جانی می‌شود.

نتایج میزان جابه‌جایی دوره اول

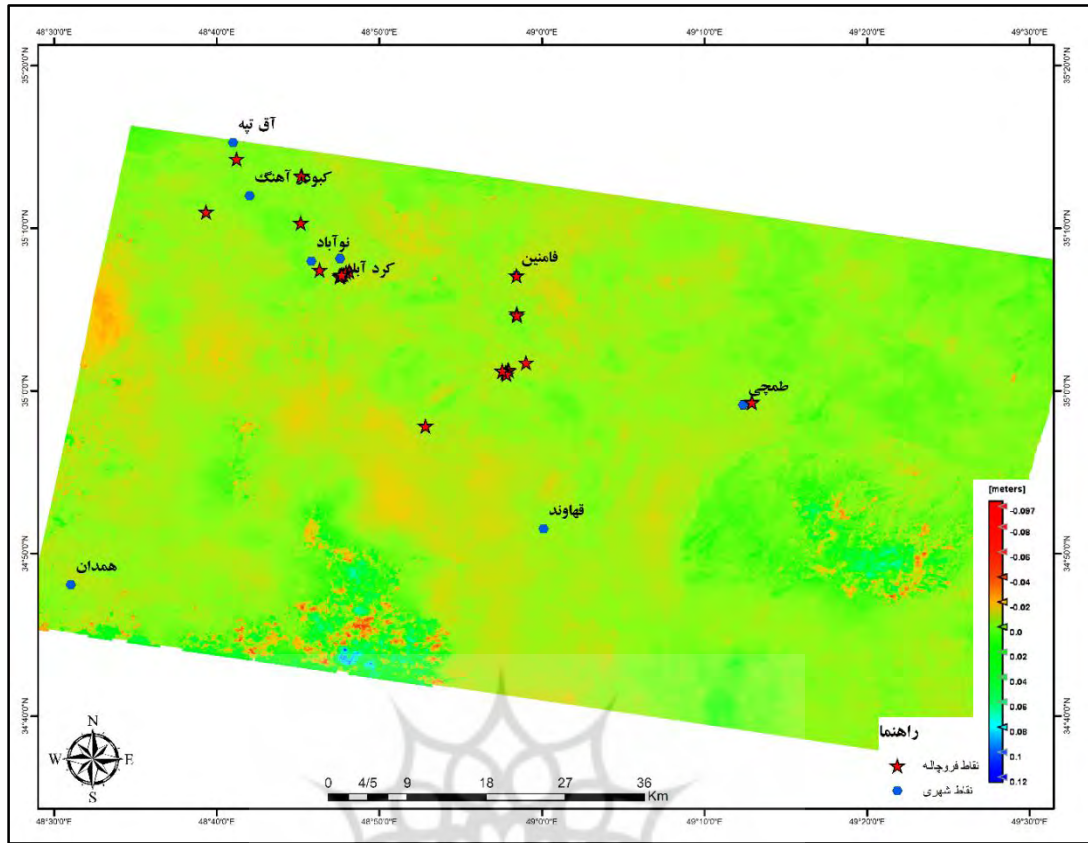
اولین نتیجه محاسبه میزان جابه‌جایی برای دوره ۸۵ روزه از تاریخ ۲۰۱۷/۰۹/۱۵ تا ۲۰۱۷/۱۲/۰۸ محاسبه گردید. طبق این بررسی میزان جابه‌جایی منفی یا به عبارتی فرونشست با رنگ زرد تا قرمز به میزان ۰ تا ۱ سانتی‌متر فرونشست را در منطقه نشان می‌دهد. اگر چه این میزان فرونشست ناچیز شمرده می‌شود ولی برای بازه ۸۵ روزه و محل فرونشست که بیش‌تر در شهرستان کبودرآهنگ و فامنین و مناطقی که بیش‌ترین میزان فروچاله تا به امروز در منطقه اتفاق افتاده است می‌تواند قابل توجه باشد.



شکل ۳ میزان جابه‌جایی عمودی دوره اول

نتایج میزان جابه‌جایی دوره دوم

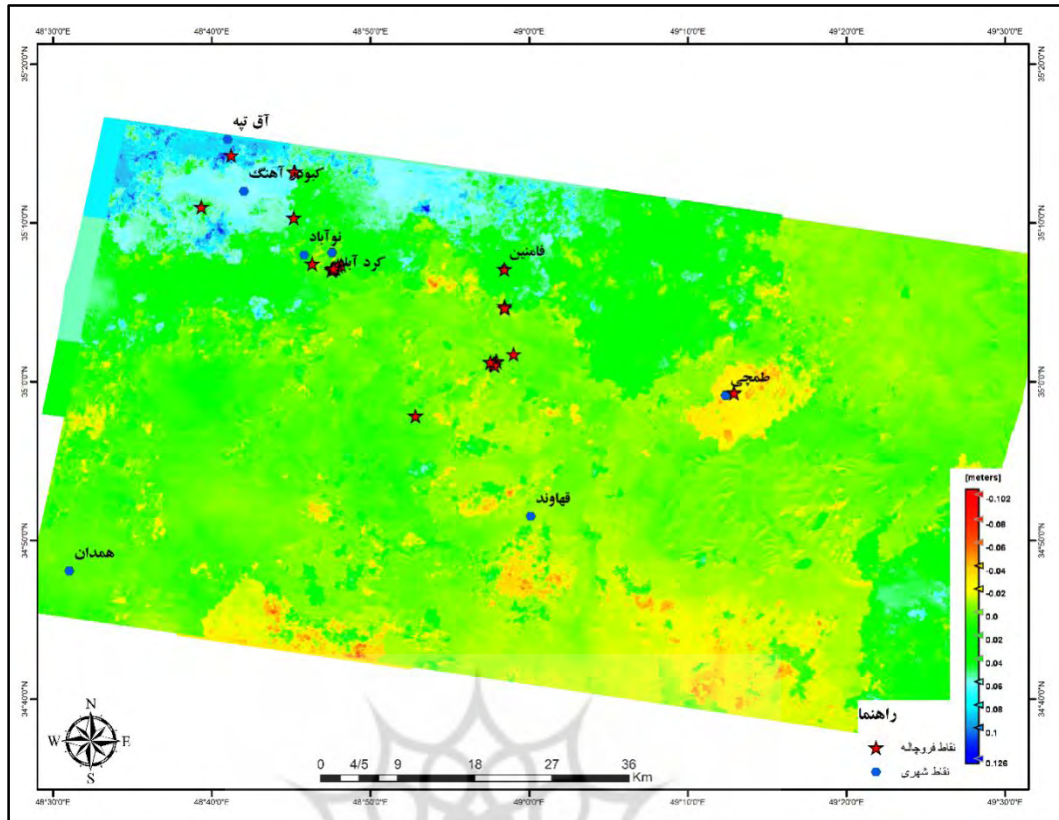
دومین نتیجه میزان محاسبه جابه‌جایی عمودی صورت گرفته در منطقه در بازه زمانی ۸۵ روزه از تاریخ ۲۰۱۷/۱۲/۰۸ تا ۲۰۱۸/۰۳/۰۲ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که میزان فرونشست صورت گرفته در منطقه مانند دوره قبل نزدیک به ۱ سانتی‌متر است که علاوه بر مناطق کیوردآهنگ و فامنین در بخش‌هایی از دشت قهاوند این فرونشست اتفاق افتاده است. طبق نتایج این دو تصویر در بازه ۶ ماهه اول سال مورد بررسی یک فرونشست تدریجی ثابتی در منطقه اتفاق افتاده است که در شکل ۴ این نتیجه قابل مشاهده است.



شکل ۴ میزان جابه‌جایی عمودی دوره دوم

نتایج میزان جابه‌جایی دوره سوم

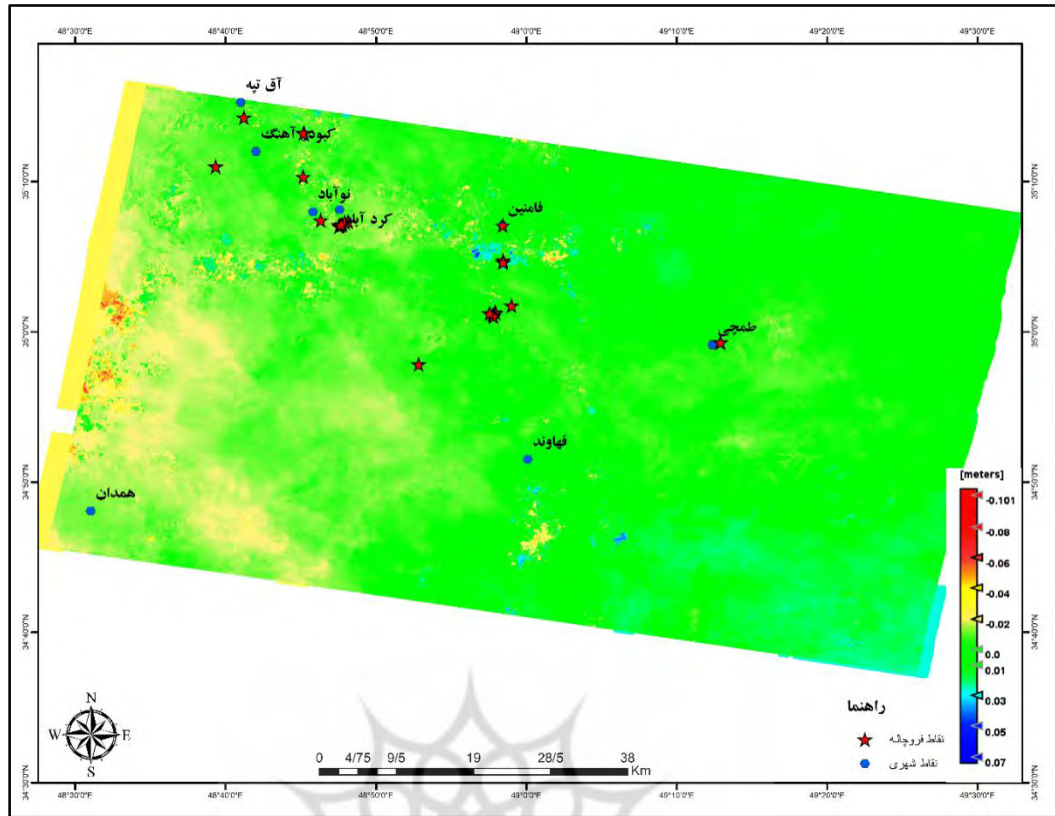
سومین نتیجه میزان محاسبه جابه‌جایی عمودی صورت گرفته در منطقه در بازه زمانی ۹۷ روزه از تاریخ ۲۰۱۸/۰۳/۰۲ تا ۲۰۱۸/۰۶/۰۶ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که میزان فرونشست اتفاق افتاده در محدوده مورد مطالعه مانند سری‌های قبل ۱ سانتی‌متر بوده است. اما این فرونشست مانند قبل که بیشتر در دشت کبودآهنگ اتفاق افتاده بود، در این دوره بیشتر در دشت فامنین و قهاوند اتفاق افتاده است. نتایج این کار را در شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۵ میزان جابه‌جایی عمودی دوره سوم

نتایج میزان جابه‌جایی دوره چهارم

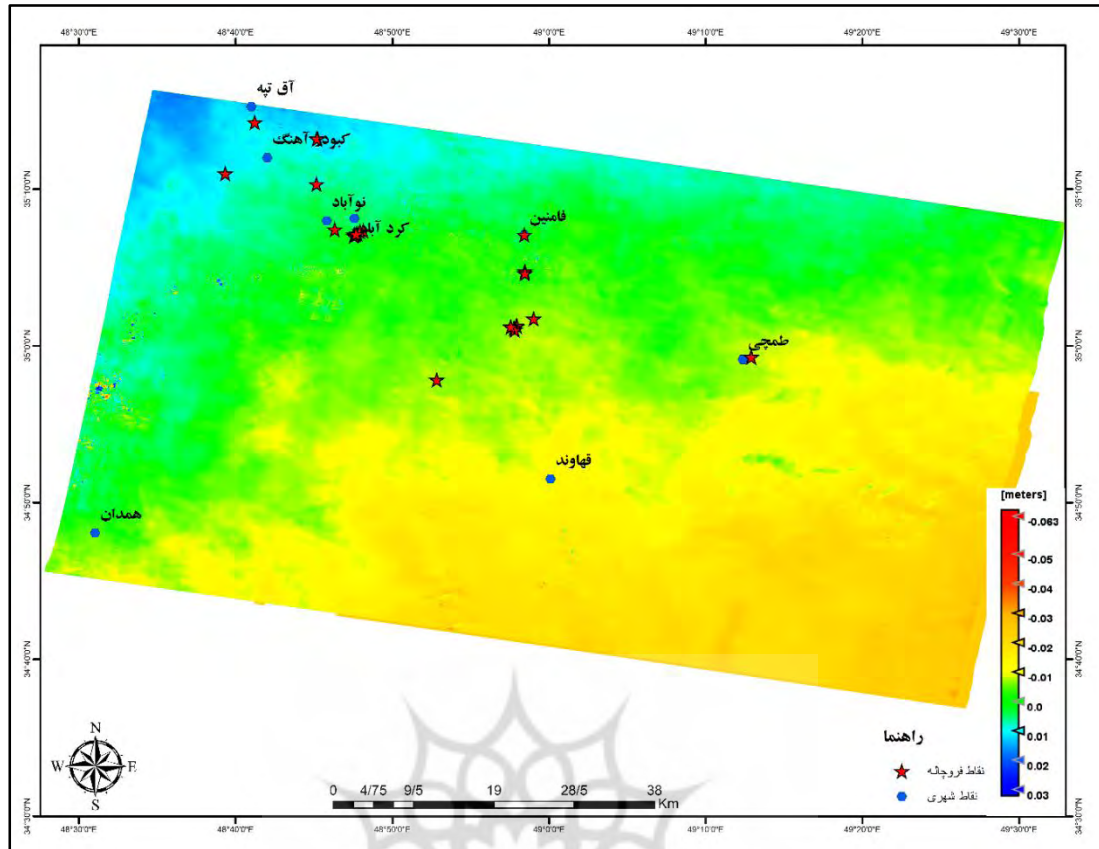
چهارمین نتیجه میزان محاسبه جابه‌جایی عمودی صورت گرفته در منطقه در بازه زمانی ۶۱ روزه از تاریخ ۲۰۱۸/۰۶/۰۶ تا ۲۰۱۸/۰۸/۰۵ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که میزان فرونشست اتفاق افتاده در محدوده مورد مطالعه نسبت به دوره‌های قبل به میزان قابل توجهی افزایش یافته است و فرونشستی تا حدود ۱۰ سانتی‌متر را نشان می‌دهد که محل این فرونشست‌ها به صورت بسیار جزئی در منطقه کبودرآهنگ و فامنین قابل مشاهده است. اما بیش‌ترین میزان این فرونشست در محدوده بین کبودرآهنگ و همدان مشخص شده است که در شکل ۶ قابل مشاهده است.



شکل ۶ میزان جابه‌جایی عمودی دوره چهارم

نتایج میزان جابه‌جایی دوره پنجم

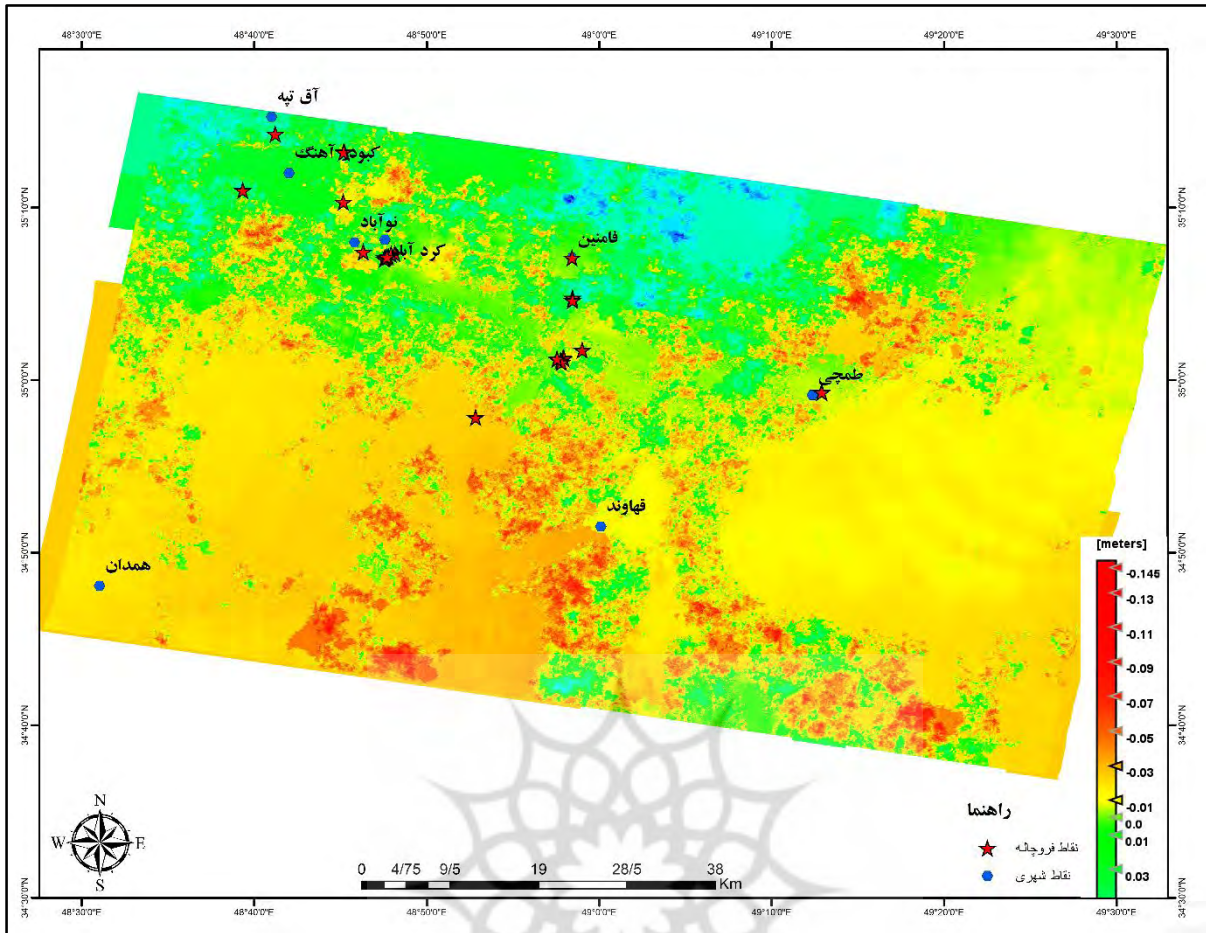
پنجمین نتیجه میزان محاسبه جابه‌جایی عمودی صورت گرفته در منطقه در بازه زمانی ۳۷ روزه از تاریخ ۲۰۱۸/۰۸/۰۵ تا ۲۰۱۸/۰۹/۱۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که میزان فرونشست صورت گرفته در این دوره بیش از ۶ میلی‌متر بوده است که این فرونشست بیشتر در دشت قهاوند اتفاق افتاده است. نتایج این بررسی را می‌توان در شکل ۷ مشاهده نمود.



شکل ۷ میزان جابه‌جایی عمودی دوره پنجم

نتایج میزان جابه‌جایی کل دوره

پس از بررسی بازه‌های تقریباً سه ماهه از منطقه مورد مطالعه با استفاده از تصویر دوره اول و دوره آخر به بازه زمانی ۳۶۱ روز یعنی تصاویر ۲۰۱۷/۰۹/۱۵ تا ۲۰۱۸/۰۹/۱۰ منطقه مورد مطالعه به طور کلی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج این بررسی در شکل ۸ قابل مشاهده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که در بازه یک ساله به میزان ۱۶/۵ سانتی‌متر محدوده مورد مطالعه فرونشست داشته است، که این فرونشست به طور جزئی بیش‌تر در مناطق کردآباد، نوآباد، کبودرآهنگ، فامنین و به طور کلی در دشت فامنین، کبودرآهنگ، قهاوند و اطراف همدان اتفاق افتاده است. که این نتایج می‌تواند از خبر وقوع خطر فروچاله‌ها در این مناطق را بدهد.



شکل ۸ میزان جابه جایی عمودی دوره یکساله

نتیجه گیری

در این پژوهش نرخ فرونشست دشت کبودرآهنگ در بازه زمانی سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ میلادی با استفاده از تصاویر راداری ماهواره Sentinel-1 بررسی شد. طبق خروجی نهایی عدد مثبت نشان برآمدگی و عدد منفی نشان فرورفتگی (نشست) می باشد. که نتایج نهایی در مجموع فرونشست حدود ۱۴/۵ سانتی متر در محدوده را نشان می دهد که بیشتر این فرونشست ها در اطراف مناطق شهری و نزدیک به مناطق مسکونی اتفاق افتاده است که این عامل می تواند خبر از وقوع فاجعه ای انسانی قریب به وقوع را در استان همدان به خصوص دشت کبودرآهنگ را بدهد. که در صورت در نظر نگرفتن تدبیر مناسب برای رفع این معطل خسارات جبران ناپذیری را می تواند به دنبال داشته باشد.

در حال حاضر فروچاله های زیادی در این منطقه مشاهده شده و سبب خسارهای مالی و جانی به ساکنین این دشت شده است ولی با پیشگیری و هشدار زود هنگام با استفاده از روش های نوین از جمله بررسی فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی

راداری و استفاده بهینه از منابع آبی می‌توان از وقوع این حادثه جلوگیری کرد و همچنین براساس مقدار نشست در این محدوده، نواحی پر خطر را شناسایی کرد و یا پیش از وقوع حادثه منطقه را از سکنه خالی و از وقوع خسارت‌های جانی جلوگیری کرد.

منابع

- ابراهیمی، عطرتین، قاسمی، افشان، و گنجائیان. (۲۰۲۰). پایش میزان فرونشست محدوده شهری پاکدشت با استفاده از روش تداخل سنجی راداری. *مجله جغرافیا و روابط انسانی*، ۸(۲)، ۴۱-۲۹.
- امیری، سیدهراسیه، و رضایی، یوسف، و حیدری‌مظفر، مرتضی و جیرانی، کهریا، ۱۳۹۸، "بررسی ارتباط بین عوامل هیدروژئولوژی و افت سطح آب زیرزمینی در وقوع فرونشست در دشت کیودرآهنگ با استفاده از تصاویر ماهواره-ای و GIS"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی عمران و توسعه همدان، همدان.
- رشیدترابی، ف، بینا، ک، ۱۳۹۳، "بررسی و اولویت‌بندی عوامل کاهش سطح آب زیرزمینی و ارائه راهکار: مطالعه موردی دشت مشهد"، *نهمین سمپوزیوم پیشرفت‌های علوم و تکنولوژی مشهد*.
- کرم، ا، ضیائیان، پ، و همدانی، ن، ا، ۱۳۹۲، "بررسی عوامل موثر در وقوع فروچاله‌های دشت ابرکوه و تهیه نقشه‌ی خطر نواحی مستعد بروز آن"، *مجله کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی*، ۱(۱)، صفحه ۱۷ تا ۳۴.
- مهشادینیا، ف، ۱۳۸۵، "مروری بر نشست منطقه‌ای زمین در ایران و تدوین بانک اطلاعات فرونشست زمین"، *دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران*، شماره ۲.
- Atzori, S., Baer, G., Antonioli, A., & Salvi, S. (2015). *InSAR-based modeling and analysis of sinkholes along the Dead Sea coastline. Geophysical Research Letters*, ۴۲(۲۰), ۸۳۸۳-۸۳۹۰.
- Avni, Y., Lensky, N., Dente, E., Shviro, M., Arav, R., Gavrieli, I., Filin, S. (2016). *Self-accelerated development of salt karst during flash floods along the Dead Sea Coast, Israel. Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 121(1), 17-38.
- Baer, G., Schattner, U., Wachs, D., Sandwell, D., Wdowinski, S., & Frydman, S. (2002). *The lowest place on Earth is subsiding—An InSAR (interferometric synthetic aperture radar) perspective. Geological Society of America Bulletin*, ۱۱۴(۱), ۱۲-۲۳.
- Bakon, M., Czikhardt, R., Papco, J., Barlak, J., Rovnak, M., Adamisin, P., & Perissin, D. (2020). *remotIO: A Sentinel-1 multi-temporal InSAR infrastructure monitoring service with automatic updates and data mining capabilities. Remote Sensing*, 12(11), 1892.
- Berardino, P., Costantini, M., Franceschetti, G., Iodice, A., Pietranera, L., & Rizzo, V. (2003). *Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy). Engineering Geology*, 68(1-۲), ۵۱-۳۱.

- Bovenga, F., Nutricato, R., Refice, A., & Wasowski, J. (2006). Application of multi-temporal differential interferometry to slope instability detection in urban/peri-urban areas. *Engineering Geology*, 88(3-4), 218-239 .
- Bozzano, F., Carabella, C., De Pari, P., Discenza, M. E., Fantucci, R., Mazzanti, P., . . . Sciarra, N. (2021). Geological and geomorphological analysis of a complex landslides system: The case of San Martino sulla Marruccina (Abruzzo, Central Italy). *Journal of Maps*, 16(2), 126-136 .
- Bozzano, F., Mazzanti, P., Perissin, D., Rocca, A., De Pari, P., & Discenza, M. E. (2017). Basin scale assessment of landslides geomorphological setting by advanced InSAR analysis. *Remote Sensing*, 9(3), 267 .
- Castañeda, C., Gutiérrez, F., Manunta, M., & Galve, J. P. (2009). DInSAR measurements of ground deformation by sinkholes, mining subsidence, and landslides, Ebro River, Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(11), ۱۵۶۲-۱۵۷۴ .
- Castaneda, C., Pourthie, N., & Souyris, J.-C. (2011). Dedicated SAR interferometric analysis to detect subtle deformation in evaporite areas around Zaragoza, NE Spain. *International Journal of remote sensing*, 32(7), 1861-1884 .
- Chang, L., & Hanssen, R. F. (2014). Detection of cavity migration and sinkhole risk using radar interferometric time series. *Remote Sensing of Environment*, 147, ۵۶-۶۴ .
- Closson, D., Karaki, N., Hansen, H., Derauw, D., Barbier, C., & Ozer, A. (2003). Space-borne radar interferometric mapping of precursory deformations of a dyke collapse, Dead Sea area, Jordan. *International Journal of remote sensing*, 24(4), ۸۴۳-۸۴۹ .
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-۲۰ .
- Galve, J. P., Castañeda, C., Gutiérrez, F., & Herrera, G. (2015). Assessing sinkhole activity in the EbroValley mantled evaporite karst using advanced DInSAR. *Geomorphology*, 229, 30-44 .
- Gongyu, L., & Wanfang, Z. (1999). Sinkholes in karst mining areas in China and some methods of prevention. *Engineering Geology*, 52(1-2), 45-50 .
- Gutiérrez, F., Galve, J. P., Lucha, P., Castañeda, C., Bonachea, J., & Guerrero, J. (2011). Integrating geomorphological mapping, trenching, InSAR and GPR for the identification and characterization of sinkholes: A review and application in the mantled evaporite karst of the Ebro Valley (NE Spain). *Geomorphology*, 134(1-۲), ۱۴۴-۱۵۶ .
- Hao, J., Wu, T., Wu, X., Hu, G., Zou, D., Zhu, X., . . . Ni, J. (2019). Investigation of a small landslide in the Qinghai-Tibet Plateau by InSAR and absolute deformation model. *Remote Sensing*, 11(18), 2۱۲۶ .

- Intriери, E., Gigli, G., Nocentini, M., Lombardi, L., Mugnai, F., Fidolini, F., & Casagli, N. (2015). Sinkhole monitoring and early warning: An experimental and successful GB-InSAR application. *Geomorphology*, 241, 304-314 .
- Jones, C. E., & Blom, R. G. (2014). Bayou Corne, Louisiana, sinkhole: Precursory deformation measured by radar interferometry. *Geology*, 42(2), 111-114 .
- Kang, Y., Zhao, C., Zhang, Q., Lu, Z., & Li, B. (2017). Application of InSAR techniques to an analysis of the Guanling landslide. *Remote Sensing*, 9(10), 1046 .
- Kim, J.-W., & Lu, Z. (2018). Association between localized geohazards in West Texas and human activities, recognized by Sentinel-1A/B satellite radar imagery. *Scientific Reports*, 8(1), 1-13 .
- Kim, J.-W., Lu, Z., & Degrandpre, K. (2016). Ongoing deformation of sinkholes in Wink, Texas, observed by time-series Sentinel-1A SAR interferometry (preliminary results). *Remote Sensing*, 8(4), 313 .
- Malinowska, A. A., Witkowski, W. T., Hejmanowski, R., Chang, L., van Leijen, F. J& ,Hanssen, R. F. (2019). Sinkhole occurrence monitoring over shallow abandoned coal mines with satellite-based persistent scatterer interferometry. *Engineering Geology*, 262, 105336 .
- Nof, R. N., Abelson, M., Raz, E., Magen, Y., Atzori, S., Salvi, S., & Baer, G. (2019). SAR interferometry for sinkhole early warning and susceptibility assessment along the Dead Sea, Israel. *Remote Sensing*, 11(1), 89 .
- Nof, R. N., Baer, G., Ziv, A., Raz, E., Atzori, S., & Salvi, S. (2013). Sinkhole precursors along the Dead Sea, Israel, revealed by SAR interferometry. *Geology*, 41(9), 1019-1022 .
- Omidvar, K. (2011). *Natural Hazards, Yazd: Yazd University Press.[In Persian]*.
- Paine, J. G., Buckley, S. M., Collins, E. W., & Wilson, C. R. (2012). Assessing collapse risk in evaporite sinkhole-prone areas using microgravimetry and radar interferometry. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 17(2), 75-87 .
- Robinson, T., Downs, C., Oliver-Cabrera, T., Zhang, B., Kruse, S., & Wdowinski, S. (2020). Relationships between Sinkhole-related features and activity and InSAR-detected Subsidence Points in West Central Florida .
- Rucker, M. L., Panda, B. B., Meyers, R. A., & Lommler, J. C. (2013). Using InSAR to detect subsidence at brine wells, sinkhole sites, and mines. *Carbonates and Evaporites*, 28(1), 141-147 .
- Shi, Y., Tang, Y., Lu, Z., Kim, J.-W., & Peng, J. (2019). Subsidence of sinkholes in Wink, Texas from 2007 to 2011 detected by time-series InSAR analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* .
- Veci, L. (2016). *Sentinel-1 Toolbox TOPS Interferometry Tutorial*. Array Systems Computing Inc.

- Waltham, A. (1989). *Ground subsidence: Blackie & Son Limited. First published* .
- Wasowski, J., & Bovenga, F. (2014). *Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry :Current issues and future perspectives. Engineering Geology, 174, 103-138* .
- Wilson, W. L., & Beck, B. F. (1988). *Hydrogeologic factors associated with recent doline development in the Orlando area, Florida, USA. IAHS-AISH publication, ۱۷۶, ۱۲۱۲-۱۲۱۷* .
- Zhao, J., Wu, J., Ding, X., & Wang, M. (2017). *Elevation extraction and deformation monitoring by multitemporal InSAR of Lupu Bridge in Shanghai. Remote Sensing, 9(9), 897* .

