



جغرافیا و روابط انسانی، بهار ۱۴۰۲، دوره ۵، شماره ۴، صص ۵۵۳-۵۴۲

تحلیل عوامل موثر در وقوع فرونشست دشت قهاوند

با استفاده از تصاویر راداری و ماهواره‌ای

صدیقه قربانی محمدآبادی^۱، رقیه نژادحسینی^۲، حمید گنجائیان^۳

۱. کارشناسی ارشد جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سمنان (Email:S.ghorbani90@gmail.com)

۲. دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران (Email:nejadhosseini@ut.ac.ir)

۳. دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران (Email:h.ganjaeian@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۳

چکیده

فرونشست مخاطره‌ای است که بسیاری از دشت‌های ایران را تهدید می‌کند. دشت قهاوند در استان همدان، از جمله دشت‌هایی است که به دلیل شرایط نامناسب هیدرواقليمی و نوع فعالیت‌های انسانی، در معرض این مخاطره قرار دارد. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به بررسی وضعیت فرونشست دشت قهاوند و عوامل مؤثر در وقوع آن پرداخته شده است. با توجه به موضوع و اهداف موردنظر، در این پژوهش از ۳۱ تصویر راداری ماهواره سنتینل ۱، تصویر ماهواره لندست ۸ و مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر به‌عنوان داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای تحقیق، نرم‌افزارهای ArcGIS و ENVI، GMT بوده است. این تحقیق در سه مرحله انجام شده است که در مرحله اول، به تهیه نقشه پوشش زمین و بررسی آن پرداخته شده است. در مرحله دوم، با استفاده از روش سری زمانی SBAS، به ارزیابی وضعیت فرونشست منطقه پرداخته شده و در مرحله سوم نیز به تحلیل عوامل مؤثر در وقوع فرونشست منطقه پرداخته شده است. بر اساس نتایج حاصله از این پژوهش، دشت قهاوند در طی دوره زمانی ۲ ساله (از تاریخ ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ تا ۲۰۱۹/۰۱/۱۹) بین ۱۵ تا ۷۸ میلی‌متر فرونشست داشته است. همچنین نتایج حاصله از این پژوهش نشان داده است که عامل اصلی فرونشست منطقه، افت شدید منابع آب زیرزمینی بر اثر توسعه اراضی کشاورزی آبی بوده است. در واقع، بیش‌ترین میزان فرونشست منطقه، منطبق بر اراضی کشاورزی آبی بوده است.

کلمات کلیدی: فرونشست، سنتینل ۱، SBAS، دشت قهاوند



فرونشست زمین به فروریزش یا نشست سطح زمین گفته می‌شود که به دلایل مختلف و در مقیاس‌های متفاوتی رخ می‌دهد (چن و همکاران^۱، ۲۰۱۶). فرونشست، متأثر از عوامل مختلف طبیعی و انسانی است و در طی سال‌های اخیر بسیاری از مناطق را در بر گرفته است (گنجائیان، ۱۳۹۹). بسیاری از فعالیت‌های انسانی از جمله روند تغییرات کاربری اراضی و توسعه ساخت‌وسازهای شهری، استخراج نفت، گاز و معادن و از همه مهم‌تر، استخراج بی‌رویه منابع آب زیرزمینی، سبب وقوع فرونشست شده‌اند (مارگاریتا^۲ و همکاران، ۲۰۰۵؛ یائو^۳، ۲۰۱۹). در واقع، در میان عوامل در وقوع فرونشست، افت آب‌های زیرزمینی در طی سال‌های اخیر بسیار مورد بحث بوده است و به‌عنوان دلیل اصلی آن در نظر گرفته شده است (فان^۴ و همکاران، ۲۰۱۵؛ رکنی و همکاران، ۱۳۹۵).

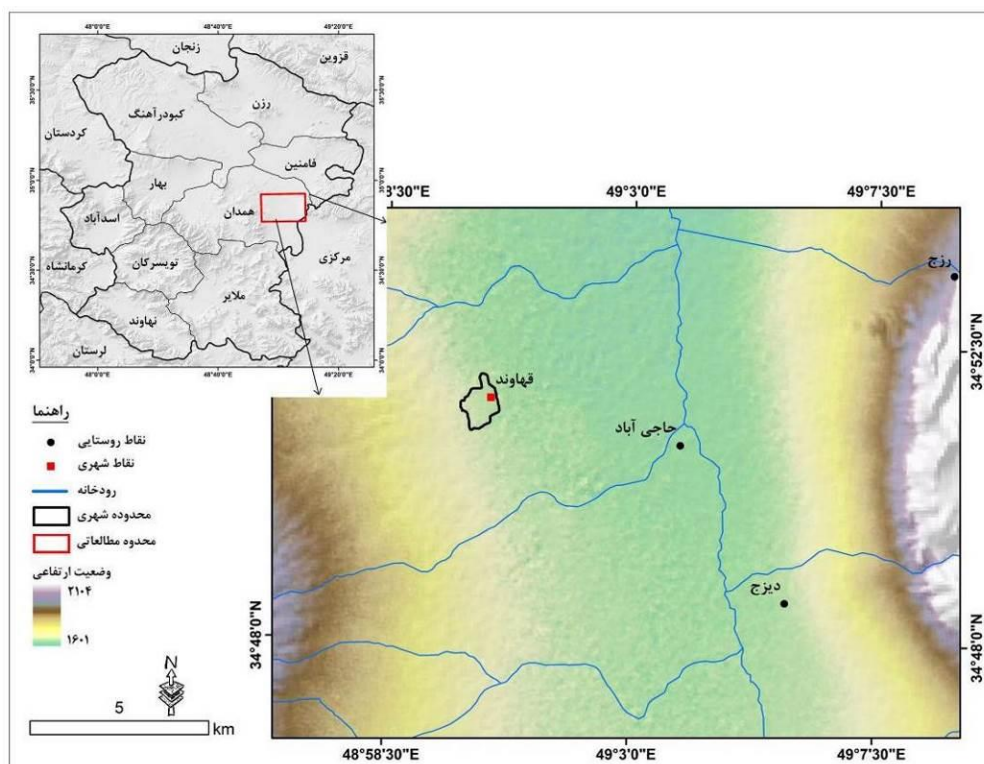
فرونشست در بسیاری از نقاط دنیا از جمله شهرهای پرجمعیت، سبب بروز خسارات زیادی شده است (نوبین‌ها و تاکه‌واکا^۵، ۲۰۱۹). به‌طوری‌که رخدادهای فرونشست در بیش از ۱۵۰ شهر مهم جهان گزارش شده است و مخاطره فرونشست به‌عنوان مخاطره پیش روی بسیاری از کشورها از جمله ایران مطرح شده است (لشکری‌پور^۶ و همکاران، ۲۰۱۴). در ایران فرونشست زمین، پیشینه سی و چند ساله دارد و برخلاف دوره‌های گذشته که تنها در استان‌های کرمان و یزد محسوس بود، هم‌اکنون در بسیاری از استان‌های کشور از جمله تهران، خراسان، اصفهان، فارس و همدان نیز به‌عنوان یک مخاطره جدی مطرح شده است (حقیقت‌مهر و همکاران، ۱۳۹۱). در واقع، فرونشست بسیاری از دشت‌های ایران از جمله دشت‌های استان همدان را در بر گرفته است. استان همدان به دلیل وضعیت هیدرواقليمی که دارد، با کمبود شدید منابع آب سطحی مواجه است و همین مسئله سبب بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی و وقوع مخاطره فرونشست شده است (جوادی، ۱۴۰۰). با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به ارزیابی وضعیت فرونشست دشت قهاوند در شرق استان همدان و عوامل مؤثر در وقوع آن پرداخته شده است.

در ارتباط با موضوع فرونشست، تحقیقات مختلفی در سطح ایران و جهان صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به جی^۷ و همکاران (۲۰۰۷) اشاره کرد که با استفاده از تصاویر راداری، به ارزیابی وضعیت فرونشست زمین در جنوب غربی سیدنی پرداختند.^۸ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از روش سری زمانی SBAS، به ارزیابی میزان فرونشست منطقه در شمال ایتالیا پرداختند. لیو^۹ و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱، به ارزیابی میزان فرونشست رخ داده در منطقه معدنی شمال چین پرداختند. جین^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۹) به تحلیل تأثیر توسعه اراضی کشاورزی آبی و بهره‌برداری بی‌رویه منابع آب زیرزمینی در وقوع مخاطره فرونشست در ایالات متحده آمریکا پرداختند. سیگنا و تاپته^{۱۱} (۲۰۲۱) با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱، به ارزیابی میزان جابجایی عمودی زمین در مکزیکوسیتی پرداختند. در ایران نیز صدیقی و گودرزی (۱۳۹۵) به تعیین فرونشست زمین در منطقه نظرآباد هشتگرد با استفاده از الگوریتم SBAS پرداختند. پورقاسمی و محسنی ساروی (۱۳۹۶) به مدل‌سازی مکانی حساسیت فرونشست زمین با استفاده از روش داده‌کاوی مدل جمعی تعمیم یافته پرداخته‌اند. بابایی و همکاران

1. Chen
2. Margarita
3. Yao
4. Fan
5. Nguyen Hao & Takewaka
6. Lashkaripour
7. Ge
8. Cianflone
9. Liu
10. Jeanne
11. Cigna & Tapete

(۱۳۹۶) به ارزیابی میزان فرونشست شهر تهران با استفاده از روش سری زمانی SBAS و PC پرداختند. صالحی متعهد و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی فرونشست زمین به کمک تلفیق روش تداخل سنجی راداری و اندازه‌گیری‌های میدانی و مطالعه دلایل و اثرات آن بر شهر مشهد پرداختند. رجبی و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از روش سری زمانی SBAS، به ارزیابی نرخ فرونشست دشت همدان-بهار و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع آن پرداختند.

منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه شامل دشت قهاوند در شرق استان همدان است. دشت قهاوند از نظر تقسیمات سیاسی در محدوده شهرستان همدان قرار دارد و مهم‌ترین مرکز سکونتگاهی آن، شهر قهاوند است (شکل ۱). دشت قهاوند، از نظر تقسیمات حوضه‌ای، در حوضه آبریز قره‌چای قرار دارد که از زیرحوضه‌های دریاچه نمک محسوب می‌شود. این دشت از نظر ژئومورفولوژی، دارای سطحی هموار و با اختلاف ارتفاع کمی است و از اطراف به واحد تپه‌ماهور منتهی می‌شود. همچنین این دشت از نظر اقلیمی در منطقه خشک و نیمه‌خشک واقع شده است.



شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از روش‌های توصیفی-تحلیلی استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده در تحقیق شامل تصاویر راداری سنتینل ۱، تصویر ماهواره لندست ۸ و مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM بوده است. نرم‌افزارهای مورد استفاده در تحقیق نیز شامل نرم‌افزارهای GMT (به‌منظور تهیه نقشه فرونشست با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و روس سری زمانی SBAS)، ENVI (به‌منظور تهیه نقشه کاربری اراضی) گوگل ارث (به‌منظور پایش منطقه) و ArcGIS (به‌منظور تهیه نقشه‌های نهایی) بوده است. روش کلی تحقیق به این صورت بوده است که ابتدا با استفاده از تصویر ماهواره لندست ۸، نقشه نوع پوشش زمین در منطقه تهیه شده و سپس با استفاده از تصاویر راداری، نقشه میزان فرونشست منطقه تهیه شده و در نهایت عوامل مؤثر در وقوع فرونشست منطقه، تحلیل شده است. در ادامه به تشریح مراحل تحقیق پرداخته شده است:

مرحله اول (تهیه نقشه پوشش زمین): در این تحقیق به‌منظور تهیه نقشه پوشش زمین در منطقه، از تصویر ماهواره لندست ۸ مربوط به تاریخ ۲۰۲۰/۰۶/۱۳ استفاده شده است. پس از تهیه تصویر مذکور، با استفاده از نرم‌افزار ENVI، ابتدا پیش‌پردازش‌های لازم شامل تصحیحات هندسی و رادیومتریک بر روی تصاویر انجام شده و سپس با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده حداکثر احتمال، نقشه پوشش زمین در محدوده مطالعاتی تهیه شده است.

مرحله دوم (تهیه نقشه فرونشست منطقه): در این تحقیق به‌منظور تهیه نقشه فرونشست منطقه، از تصاویر راداری سنتینل ۱ و روش سری زمانی SBAS استفاده شده است. روش انجام کار به این صورت بوده است که ابتدا تصاویر مورد نظر که شامل ۳۱ تصویر راداری ماهواره سنتینل ۱ می‌باشد، تهیه شده است. تصاویر تهیه شده دارای حالت مداری صعودی، نوع IW و فرمت SLC از تاریخ ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ تا ۲۰۱۹/۰۱/۱۹ می‌باشند (جدول ۱).

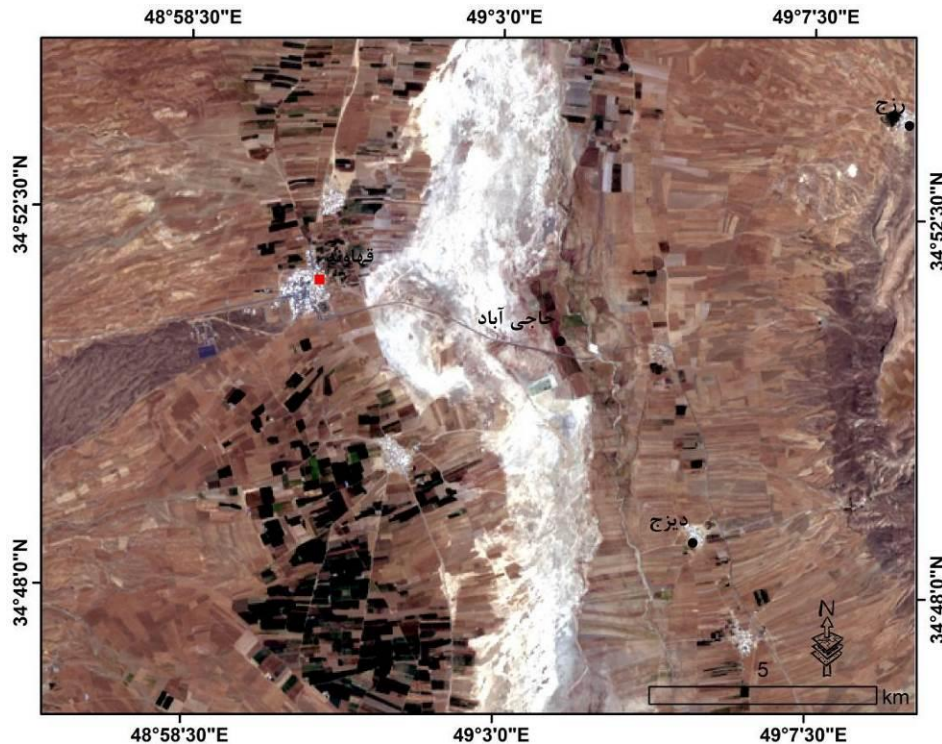
جدول ۱: تاریخ تصاویر مورد استفاده

ردیف	تاریخ	ردیف	تاریخ	ردیف	تاریخ
۱	۲۰۱۷/۰۱/۰۵	۱۲	۲۰۱۷/۱۰/۲۰	۲۲	۲۰۱۸/۰۶/۱۷
۲	۲۰۱۷/۰۱/۲۹	۱۳	۲۰۱۷/۱۱/۱۳	۲۳	۲۰۱۸/۰۷/۱۱
۳	۲۰۱۷/۰۲/۲۲	۱۴	۲۰۱۷/۱۲/۰۷	۲۴	۲۰۱۸/۰۸/۰۴
۴	۲۰۱۷/۰۳/۱۸	۱۵	۲۰۱۷/۱۲/۳۱	۲۵	۲۰۱۸/۰۸/۲۸
۵	۲۰۱۷/۰۴/۱۱	۱۶	۲۰۱۸/۰۱/۲۴	۲۶	۲۰۱۸/۰۹/۲۱
۶	۲۰۱۷/۰۵/۰۵	۱۷	۲۰۱۸/۰۲/۱۷	۲۷	۲۰۱۸/۱۰/۱۵
۷	۲۰۱۷/۰۵/۲۹	۱۸	۲۰۱۸/۰۳/۱۳	۲۸	۲۰۱۸/۱۱/۰۸
۸	۲۰۱۷/۰۶/۲۲	۱۹	۲۰۱۸/۰۴/۰۶	۲۹	۲۰۱۸/۱۲/۰۲
۹	۲۰۱۷/۰۸/۰۹	۲۰	۲۰۱۸/۰۴/۳۰	۳۰	۲۰۱۸/۱۲/۲۶
۱۰	۲۰۱۷/۰۹/۰۲	۲۱	۲۰۱۸/۰۵/۲۴	۳۱	۲۰۱۹/۰۱/۱۹
۱۱	۲۰۱۷/۰۹/۲۶				

مرحله سوم (تحلیل عوامل مؤثر در وقوع فرونشست): در این مرحله، بر مبنای نتایج حاصله از مراحل قبل، به تحلیل عوامل مؤثر در وقوع فرونشست منطقه پرداخته شده است.

بحث و نتایج

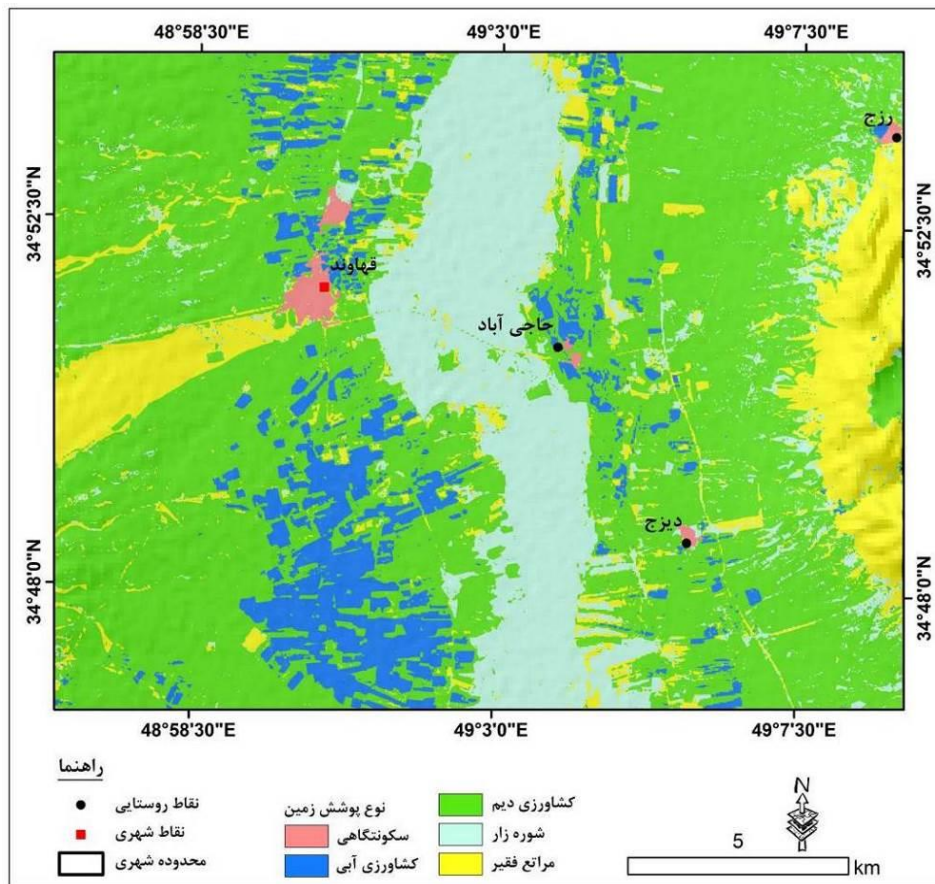
-بررسی وضعیت پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه: یکی از عوامل مهم در وقوع مخاطره فرونشست، نحوه استفاده انسان از زمین است. در این پژوهش با توجه به موضوع مورد مطالعه، ابتدا وضعیت پوشش زمین در منطقه بررسی شده است. به منظور بررسی وضعیت پوشش زمین، از تصاویر ماهواره لندست ۸ استفاده شده است. در شکل ۲ نقشه تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۲: نقشه تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه

پس از تهیه تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه، به منظور تهیه نقشه پوشش زمین منطقه، ابتدا پیش‌پردازش‌های لازم بر روی تصاویر انجام شده است. پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم، با استفاده از روش حداکثر احتمال، نقشه پوشش زمین منطقه تهیه شده است (شکل ۳). بر اساس نقشه تهیه شده، بخش زیادی از منطقه را اراضی کشاورزی آبی و دیم در بر گرفته است و همچنین بخش‌هایی از منطقه را مراتع فقیر و شورزارها شامل می‌شود. با توجه به اینکه محدوده مطالعاتی در منطقه خشک و نیمه‌خشک واقع شده است و با کمبود منابع آب سطحی مواجه است، بخش‌های میانی منطقه که شامل مناطق شرقی شهر قهاوند است را شورزارها در بر گرفته است که به نوعی به‌عنوان اراضی کویری استان همدان

شناخته می‌شوند. بر این اساس می‌توان گفت که محدوده مطالعاتی، تحت تأثیر شرایط هیدرواقليمی، دارای پوشش گیاهی ضعیفی است و همچنین با کمبود شدید منابع آب سطحی مواجه است.

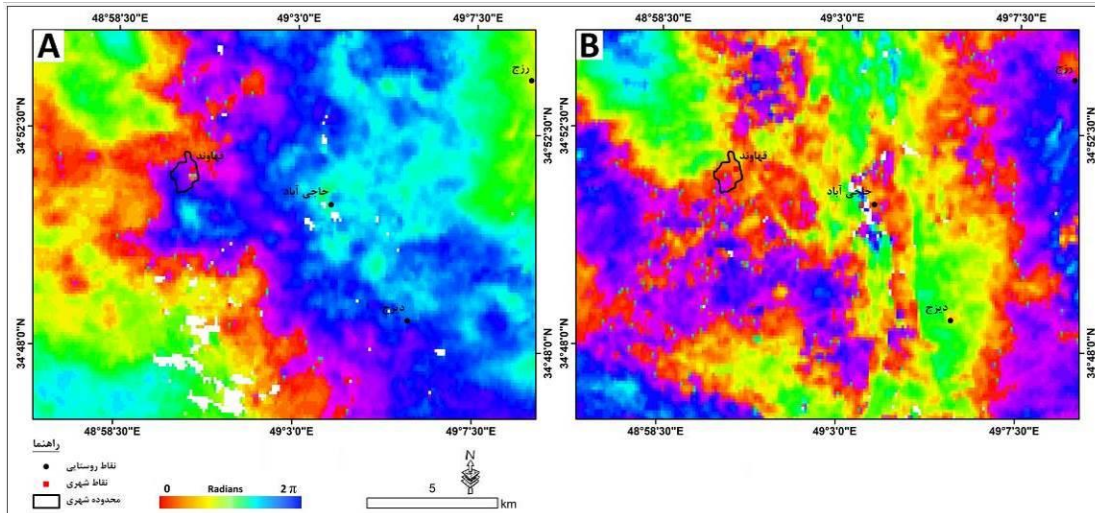


شکل ۳: نقشه پوشش زمین منطقه در تاریخ ۲۰۲۰/۰۶/۱۳

-ارزیابی وضعیت فرونشست منطقه مورد مطالعه: با توجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی وضعیت فرونشست منطقه بوده است، در این پژوهش با استفاده از تصاویر راداری و روش سری زمانی SBAS، میزان فرونشست منطقه از تاریخ ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ تا ۲۰۱۹/۰۱/۱۹ ارزیابی شده است. به منظور تهیه نقشه فرونشست، پس از تهیه تصاویر مورد نظر، ابتدا نقشه‌های اینترفروگرام منطقه تهیه شده است. به منظور تهیه نقشه‌های اینترفروگرام، ابتدا زوج تصاویر مورد نظر که بر اساس وضعیت زمانی تصاویر بوده، انتخاب شده است (جدول ۲). در واقع، ابتدا بر مبنای تاریخ تصاویر، جفت تصاویر مورد نظر انتخاب شده و پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم، نقشه‌های اینترفروگرام منطقه تهیه شده است. در شکل ۴ نمونه‌های از اینترفروگرام‌های تهیه شده نشان داده شده است.

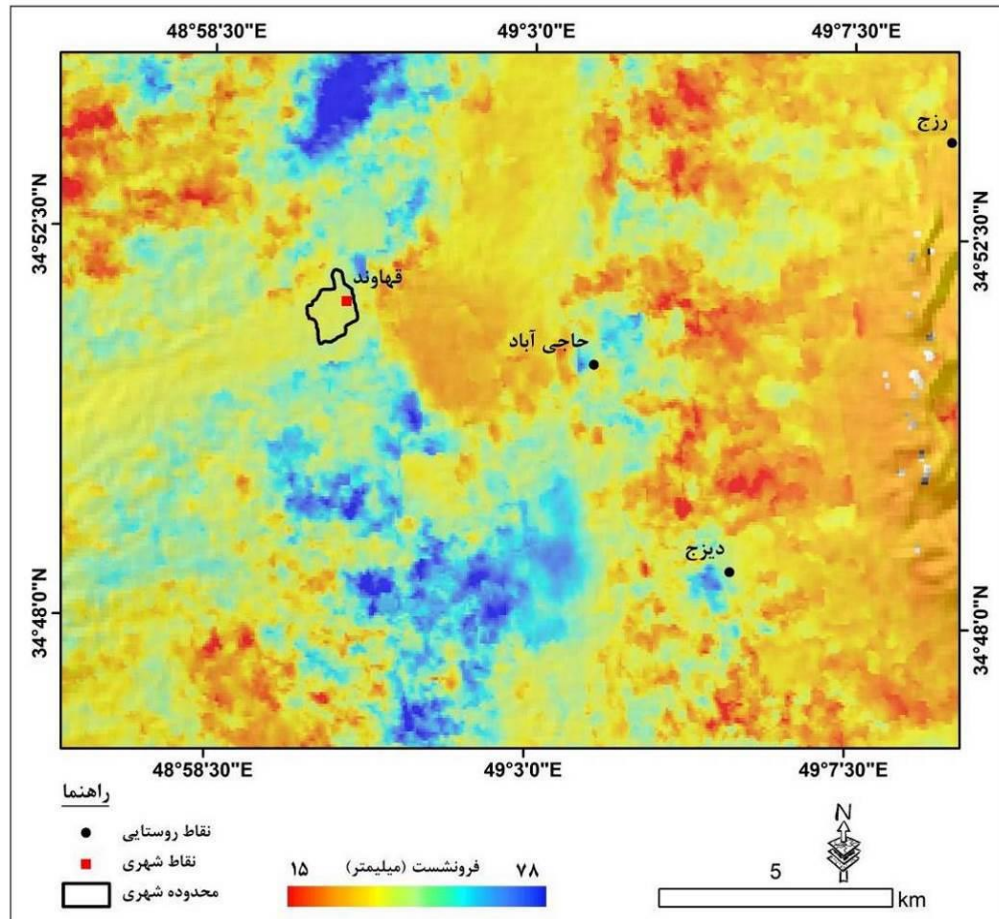
جدول ۲: زوج تصاویر مورد نظر جهت تهیه نقشه‌های اینترفروگرام

زوج تصاویر	ردیف	زوج تصاویر	ردیف
۲۰۱۸/۰۱/۲۴ - ۲۰۱۸/۰۲/۱۷	۱۶	۲۰۱۷/۰۱/۰۵ - ۲۰۱۷/۰۱/۲۹	۱
۲۰۱۸/۰۲/۱۷ - ۲۰۱۸/۰۳/۱۳	۱۷	۲۰۱۷/۰۱/۲۹ - ۲۰۱۷/۰۲/۲۲	۲
۲۰۱۸/۰۳/۱۳ - ۲۰۱۸/۰۴/۰۶	۱۸	۲۰۱۷/۰۲/۲۲ - ۲۰۱۷/۰۳/۱۸	۳
۲۰۱۸/۰۴/۰۶ - ۲۰۱۸/۰۴/۳۰	۱۹	۲۰۱۷/۰۳/۱۸ - ۲۰۱۷/۰۴/۱۱	۴
۲۰۱۸/۰۴/۳۰ - ۲۰۱۸/۰۵/۲۴	۲۰	۲۰۱۷/۰۴/۱۱ - ۲۰۱۷/۰۵/۰۵	۵
۲۰۱۸/۰۵/۲۴ - ۲۰۱۸/۰۶/۱۷	۲۱	۲۰۱۷/۰۵/۰۵ - ۲۰۱۷/۰۵/۲۹	۶
۲۰۱۸/۰۶/۱۷ - ۲۰۱۸/۰۷/۱۱	۲۲	۲۰۱۷/۰۵/۲۹ - ۲۰۱۷/۰۶/۲۲	۷
۲۰۱۸/۰۷/۱۱ - ۲۰۱۸/۰۸/۰۴	۲۳	۲۰۱۷/۰۶/۲۲ - ۲۰۱۷/۰۸/۰۹	۸
۲۰۱۸/۰۸/۰۴ - ۲۰۱۸/۰۸/۲۸	۲۴	۲۰۱۷/۰۸/۰۹ - ۲۰۱۷/۰۹/۰۲	۹
۲۰۱۸/۰۸/۲۸ - ۲۰۱۸/۰۹/۲۱	۲۵	۲۰۱۷/۰۹/۰۲ - ۲۰۱۷/۰۹/۲۶	۱۰
۲۰۱۸/۰۹/۲۱ - ۲۰۱۸/۱۰/۱۵	۲۶	۲۰۱۷/۰۹/۲۶ - ۲۰۱۷/۱۰/۲۰	۱۱
۲۰۱۸/۱۰/۱۵ - ۲۰۱۸/۱۱/۰۸	۲۷	۲۰۱۷/۱۰/۲۰ - ۲۰۱۷/۱۱/۱۳	۱۲
۲۰۱۸/۱۱/۰۸ - ۲۰۱۸/۱۲/۰۲	۲۸	۲۰۱۷/۱۱/۱۳ - ۲۰۱۷/۱۲/۰۷	۱۳
۲۰۱۸/۱۲/۰۲ - ۲۰۱۸/۱۲/۲۶	۲۹	۲۰۱۷/۱۲/۰۷ - ۲۰۱۷/۱۲/۳۱	۱۴
۲۰۱۸/۱۲/۲۶ - ۲۰۱۹/۰۱/۱۹	۳۰	۲۰۱۷/۱۲/۳۱ - ۲۰۱۸/۰۱/۲۴	۱۵



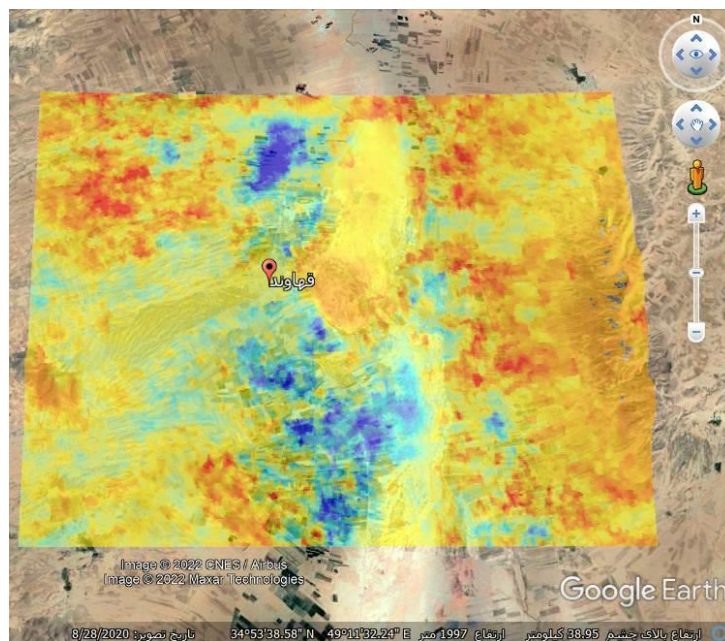
شکل ۴: نقشه‌های اینترفروگرام منطقه (A) ۲۰۱۸/۰۸/۰۴-۲۰۱۸/۰۷/۱۱ (B) ۲۰۱۸/۱۱/۰۸-۲۰۱۸/۱۲/۰۲

پس از تهیه نقشه‌های اینترفروگرام، با استفاده از روش سری زمانی SBAS، نقشه میزان جابجایی عمودی منطقه از تاریخ ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ تا ۲۰۱۹/۰۱/۱۹ تهیه شده است. بر اساس نقشه تهیه شده، منطقه مورد مطالعه در طی دوره زمانی ۲ ساله بین ۱۵ تا ۷۸ میلی‌متر فرونشست داشته است. بر این اساس، دشت قهاوند دارای فرونشست قابل توجهی است و ادامه این روند می‌تواند تهدیدی جدی برای منطقه باشد. بررسی وضعیت پراکنش مکانی فرونشست نشان داده است که بیش‌ترین میزان فرونشست منطبق بر بخش‌های شمالی و جنوبی شهر قهاوند بوده و کم‌ترین میزان فرونشست نیز منطبق بر تپه‌ماهورهای بخش شرقی و غربی منطقه بوده است.



شکل ۵: نقشه فرونشست منطقه از تاریخ ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ تا ۲۰۱۹/۰۱/۱۹

-تحلیل عوامل مؤثر در وقوع فرونشست منطقه: دشت قهاوند از نظر اقلیمی در منطقه خشک و نیمه‌خشک واقع شده است. این منطقه به دلیل میانگین بارش کم و همچنین کمبود شدید منابع آب سطحی، وابستگی زیادی به منابع آب زیرزمینی دارد. در واقع، منبع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه، منابع آب زیرزمینی است. این منطقه با وجود کمبود شدید منابع آب سطحی، دارای اراضی کشاورزی آبی قابل توجهی است که این مسئله سبب استفاده بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی در طی سال‌های اخیر شده است و همین مسئله زمینه را برای وقوع فرونشست در منطقه فراهم آورده است. در واقع، بر مبنای نتایج حاصله از تصاویر راداری، بیش‌ترین میزان فرونشست رخ داده، در مناطقی بوده است که نوع کاربری آن، کشاورزی آبی بوده است (شکل ۶). بر این اساس، عدم توجه به توان محیطی منطقه سبب افت سطح آب زیرزمینی در دشت قهاوند شده و این مسئله زمینه را برای فرونشست در این دشت فراهم آورده است.



شکل ۶: نقشه اورلی شده فرونشست منطقه بر تصویر گوگل ارث

نتیجه گیری

فرونشست مخاطره‌ای است که بخش‌های زیادی از کشور از جمله دشت‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک را در بر گرفته است. دشت قهاوند در شرق استان همدان از جمله دشت‌هایی است که به دلیل قرار گرفتن در منطقه اقلیمی خشک و نیمه‌خشک و همچنین به دلیل نداشتن منابع آب سطحی، در معرض مخاطره فرونشست قرار دارد. بر اساس نتایج حاصله از این پژوهش، دشت قهاوند در طی دوره زمانی ۲ ساله (از تاریخ ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ تا ۲۰۱۹/۰۱/۱۹) بین ۱۵ تا ۷۸ میلی‌متر فرونشست داشته است. در واقع، بخش‌هایی از این دشت، سالانه دارای ۴ سانتی‌متر فرونشست است که رقم قابل توجهی است و در بلندمدت می‌تواند با تخریب تأسیسات، بناها، اراضی کشاورزی و غیره همراه باشد. همچنین نتایج حاصله از این پژوهش نشان داده است که عامل اصلی فرونشست منطقه، افت شدید منابع آب زیرزمینی بر اثر توسعه اراضی کشاورزی آبی بوده است. در واقع، بیش‌ترین میزان فرونشست منطقه، منطبق بر اراضی کشاورزی آبی بوده است بنابراین می‌توان گفت که توسعه اراضی کشاورزی آبی و استفاده بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی، دلیل اصلی وقوع فرونشست منطقه بوده است.

۱. بابایی، سید سا سان؛ خزایی، صفا؛ قاصرمبارکه، فروزان (۱۳۹۶)، پردازش سری زمانی تداخل سنجی تصاویر راداری COSMO-SkyMed به منظور محاسبه نرخ فروزش است در محدوده سازه‌های زمینی و زیرزمینی در شهر تهران، نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره ۷، شماره ۱، صص ۶۷-۵۵
۲. پورقاسمی، حمیدرضا؛ محسنی ساروی، محسن (۱۳۹۶)، مدل‌سازی مکانی حساسیت فرونشست زمین با استفاده از روش داده‌کاوی مدل جمعی تعمیم‌یافته، مجله پژوهش‌های آبخیزداری، دوره ۳۰، شماره ۴، صص ۳۴-۲۰
۳. جوادی، سیدمحمد رضا (۱۴۰۰)، برآورد و تحلیل میزان فرونشست دشت همدان-بهار با استفاده از تصاویر راداری و سری زمانی SBAS، رساله دکتری، دانشگاه تبریز
۴. حقیقت‌مهر، پریسا؛ ولدان‌زوج، محمدجواد؛ تاجیک، رضا؛ جباری، سعید؛ صاحبی، محمود رضا؛ اسلامی، رضا؛ گنجیان، مصطفی؛ دهقانی، مریم (۱۳۹۱)، تحلیل سری زمانی فروزش‌دست هشتگرد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و سامانه موقعیت‌یابی جهانی، مجله علوم زمین، سال ۲۲، شماره ۸۵، صص ۱۱۴-۱۰۵
۵. رجبی، معصومه؛ روستایی، شهرام، جواد، سیدمحمد رضا (۱۴۰۰)، ارزیابی نرخ فروزش‌دست همدان-بهار و ارتباط آن با پارامترهای محیطی، مجله ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۰، شماره ۳، صص ۱۸۸-۱۷۵
۶. رکنی، جعفر؛ حسین‌زاده، سیدرضا؛ لشکری‌پور، غلامرضا؛ ولایتی، سعداله (۱۳۹۵)، بررسی فرونشست زمین، چشم‌اندازها و تحولات ژئومورفولوژی ناشی از آن در دشت‌های تراکمی (مطالعه موردی: ۱۳۹۵)، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، دوره ۶، شماره ۲۴، صص ۳۸-۲۱
۷. صالحی متعهد، فهیمه؛ حافظی مقدس، ناصر؛ لشکری‌پور، غلامرضا؛ دهقانی، مریم (۱۳۹۸)، ارزیابی فرونشست زمین به کمک تلفیق روش تداخل سنجی راداری و اندازه‌گیری‌های میدانی و مطالعه دلایل و اثرات آن بر شهر مشهد، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، سال ۱۳، شماره ۳، صص ۴۶۲-۴۳۵
۸. صدیقی، مرتضی؛ گودرزی، رامین (۱۳۹۵)، تعیین فرونشست زمین در منطقه نظرآباد هشتگرد با استفاده از الگوریتم SBAS، همایش ملی ژئوماتیک، سازمان نقشه‌برداری کشور، دوره ۲۳
۹. گنجائیان، حمید (۱۳۹۹)، مخاطرات ژئومورفولوژیک مناطق شهری، روش‌های مطالعه و راهکارهای کنترل آن، انتشارات انتخاب، ۱۴۴ صفحه
10. 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.
11. Cianflone, G., Tolomei, C., Brunori, C.A., Dominici, R., 2015. InSAR time series analysis of natural and anthropogenic coastal plain subsidence (Southern Italy). *Remote Sens*. 7, 16004–160023.
12. Cigna, F., Tapete, D., 2021. Present-day land subsidence rates, surface faulting hazard and risk in Mexico City with 2014–2020 Sentinel-1 IW InSAR. *Remote Sens Environ* 253:112161.
13. Fan, H.D., Gao, X.X., Yang, J.K., Deng, K.Z., Yu, Y., 2015. Monitoring mining subsidence using a combination of phase-stacking and offset-tracking methods. *Remote Sens* 7:9166–9183.
14. Ge, L.L., Chang, H.C., Rizos, C., 2007. Mine subsidence monitoring using multi-source satellite SAR images. *Photogramm Eng, Remote Sens*, 73:259–266.

15. Jeanne, P., Farr, T.G., Rutqvist, J., Vasco, D.W., 2019. Role of agricultural activity on land subsidence in the San Joaquin Valley, California. *J Hydrol* 569:462–469.
16. Lashkaripour, G. R., Ghafoori, M., Mossavi Maddah, S. M., 2014. An investigation on the mechanism of land subsidence in the northwest of mashhad city, NE Iran, *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, Volume (5), Number (3), pp 321-327.
17. Liu, X., Wang, Y.J., Yan, S.Y., 2018. Interferometric SAR time series analysis for ground subsidence of the abandoned mining area in north Peixian using Sentinel-1a TOPS data. *J Indian Soc, Remote Sens.*
18. Margarita, M., Georgi, F., Ilia, Y., Plamen, I., 2005. UNESCO- bas Project of Land Subsidence Research in the Region of the Sofia, Skopje and Tirana Cities, *Geoindicators*, PP: 31-33.
19. Nguyen Hao, Q., Takewaka, S., 2019. Detection of Land Subsidence in Nam Dinh Coast by Dinsar Analyses, *International Conference on Asian and Pacific Coasts*, pp 1287-1294.
20. Yao, G., Ke, C.Q., Zhang, J., Lu, Y., Zhao, J., 2019. Lee, H. Surface deformation monitoring of Shanghai based on ENVISAT ASAR and Sentinel-1A data. *Environ. Earth Sci*, 78, 225.