

## ارزیابی نرخ فرورانش دشت همدان-بهار و ارتباط آن با پارامترهای محیطی

معصومه رجبی\* - استاد ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.  
شهرام روستائی - استاد ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.  
سیدمحمدرضا جوادی - دانش آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۴      تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

### چکیده

یکی از مخاطرات پیش‌روی دشت‌های کشور، مخاطره فرورانش است. قرارگیری دشت همدان-بهار در منطقه نیمه خشک سبب شده تا این دشت در معرض مخاطره فرورانش باشد. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به بررسی این مخاطره پرداخته شده است. در این تحقیق به منظور دستیابی به اهداف مورد نظر از روش‌های توصیفی-تحلیلی استفاده شده است. داده‌های تحقیق شامل تصاویر راداری سنتینل ۱ (۷۳ تصویر راداری در طی بازه زمانی ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴)، تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ (مربوط به تاریخ ۲۰۲۰/۰۶/۱۳) به منظور تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه، مدل رقمی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و همچنین اطلاعات مربوط به چاه‌های بی‌زومتری منطقه است. ابزارهای تحقیق نیز شامل ARCGIS، ENVI، GMT و expert choice می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، این دشت در طی دوره زمانی ۵ سال (از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴)، با ۲۸۱ میلی‌متر فرورانش مواجه شده است که بر اساس آن می‌توان گفت منطقه مورد مطالعه دارای میانگین ۵۶ میلی‌متر فرورانش سالانه است. همچنین نتایج پتانسیل‌سنجی مناطق مستعد وقوع فرورانش بیانگر این است که مناطق میانی محدوده مطالعاتی، شامل محدوده‌های شهری همدان، بهار، لالچین و صالح‌آباد به دلیل نوع کاربری، نوع لیتولوژی، شیب کم، قرار گرفتن در واحد دشت و مخروطه افکنه و همچنین افت زیاد منابع آب زیرزمینی در این مناطق، پتانسیل بالایی جهت وقوع و تشدید فرورانش در آینده دارد. با توجه به اینکه این مناطق در محاسبه فرورانش منطقه، دارای بالاترین میزان فرورانش بوده‌اند، بنابراین بین نتایج حاصله از تصاویر راداری و پهنه‌بندی، انطباق وجود دارد.

واژگان کلیدی: فرورانش، دشت همدان-بهار، تداخل سنجی راداری.

## مقدمه

فرونشست عبارت است از فروریزش و یا نشست سطح زمین که به علت‌های متفاوتی در مقیاس بزرگ روی می‌دهد. به طور معمول این اصطلاح به حرکت قائم رو به پایین سطح زمین که می‌تواند با بردار اندک افقی همراه باشد، گفته می‌شود (چن<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). فرونشست می‌تواند تحت تاثیر عوامل طبیعی و انسانی باشد (مارگاریتا<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۵: ۳۲). در میان عوامل موثر در وقوع فرونشست، افت آب‌های زیرزمینی در طی سال‌های اخیر بسیار مورد بحث بوده است و به عنوان دلیل اصلی آن در نظر گرفته شده است (یائو<sup>۳</sup>، ۲۰۱۹: ۲). در واقع، نیازهای روز افزون انسان به آب از یک سو و کمبود آن از سوی دیگر به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک جهان، او را متوجه توسعه بهره‌برداری هرچه بیش‌تر از منابع آب، بخصوص منابع آب زیرزمینی نموده است. با پیشرفت تکنولوژی، استحصال آب بیش‌تر به ویژه از طریق چاه روز به روز افزایش یافت که از جمله پیامدهای مهم آن افت سریع مخازن زیرزمینی بوده است (رکنی و همکاران، ۱۳۹۵: ۲۴). پدیده فرونشست بسیاری از نقاط دنیا از جمله ایران را تحت تاثیر قرار داده است و در طی سال‌های اخیر به عنوان یکی از مسائل و چالش‌های اساسی مطرح شده است. این پدیده در مناطق مختلف تحت تاثیر عوامل مختلفی توسعه یافته است. در فرونشست‌های ایران، افت آب‌های زیرزمینی به عنوان اصلی‌ترین عامل مطرح شده است، چرا که ارتباط مستقیمی بین فرونشست مناطق و میزان افت آب‌های زیرزمینی برقرار است. در واقع، حاکم بودن شرایط اقلیمی خشک در اغلب نواحی داخلی ایران و تمرکز بهره‌برداری‌های صنعتی، کشاورزی و مصارف آب شرب بر منابع آب زیرزمینی، زیرساخت مناسبی برای رویداد این پدیده فراهم آورده است (شریفی‌کیا، ۱۳۹۱: ۵۷). یکی از مناطقی که در معرض فرونشست قرار دارد، دشت همدان-بهار است. موقعیت جغرافیایی و اقلیمی این دشت سبب شده است تا از نظر آب و هوایی دارای شرایط نیمه خشک باشد و همین مسئله سبب شده است تا میزان ریزش‌های جوی این منطقه نسبت به مناطق غربی‌تر و شمالی بسیار کم‌تر باشد (شایان و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۴۰). با توجه به موارد مذکور، این منطقه با کمبود آب‌های سطحی مواجه است و به همین دلیل میزان بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در این منطقه بسیار بیش‌تر از میزان تغذیه آن‌هاست. روند برداشت بیش از حد از آب‌های زیرزمینی منطقه سبب شده است تا سطح آب‌های زیرزمینی این دشت در طی سال‌های اخیر با افت شدیدی مواجه شود که همین مسئله سبب شده است تا مخاطره فرونشست به عنوان مهم‌ترین مخاطره ژئومورفولوژی این منطقه محسوب شود. با توجه به اهمیت مسئله، در این پژوهش به بررسی وضعیت فرونشست در دشت همدان-بهار با استفاده از تداخل سنجی راداری و روش سری زمانی SBAS پرداخته شده است.

در مورد موضوع فرونشست با استفاده از روش تداخل سنجی راداری، تحقیقات مختلفی در سطح ایران و جهان صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به بوزانو<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۵) اشاره کرد که میزان فرونشست دشت آکه آلبو<sup>۵</sup> را در طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ حدود ۸۰ میلی‌متر برآورد کرده‌اند. ابیر<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۵) میزان فرونشست فلات نمک کوهات (در شمال پاکستان) را ۷ تا ۱۰ سانتی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. هو<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۶) میزان فرونشست در هانوی<sup>۸</sup> ویتنام را حدود ۴۰ میلی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. آیماتی<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۸) میزان فرونشست شهر ساحلی

۱. Chen

۲. Margarita

۳. Yao

۴. Bozzano

۵. Acque albule

۶. Abir

۷. Ho

۸. Hanoi

۹. Aimaiti

اورایاسو<sup>۱</sup> در ژاپن را در طی دوره زمانی ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۶ حدود ۲۷ میلی‌متر و در دوره زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ حدود ۳۰ میلی‌متر در سال و همچنین در دوره ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ حدود ۱۸ میلی‌متر برآورد کرده‌اند. نگوین هاو و تاکه‌واکا<sup>۲</sup> (۲۰۱۹) میزان فرونشست زمین در نام‌دینه<sup>۳</sup> را بین ۲۱- تا ۲/۵+ در سال محاسبه کرده‌اند. ژائو<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۹) میزان فرونشست در منطقه ساحلی شانگهای چین را ۳۰ میلی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. کریمی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از تصاویر راداری، میزان فرونشست منطقه ۱۸ تهران را در طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ بین ۱ تا ۲۵ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند. خرمی (۱۳۹۶) میزان فرونشست دشت مشهد را بررسی کرده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که شمال غرب و شمال شهر مشهد دارای نرخ فرونشست بسیار بالایی هستند که بیش‌ترین مقدار آن در شمال غرب مشهد و در حدود ۱۴ سانتی‌متر در سال است. محمدخان و همکاران (۱۳۹۸) فرونشست دشت قروه را ۲۱۶ میلی‌متر در طی دو سال برآورده کرده‌اند. مقصودی و همکاران (۱۳۹۸) فرونشست سالانه دشت‌های تهران و شهریار را ۱۵ سانتی‌متر در سال برآورد کرده است. با توجه به موارد مذکور، هدف از تحقیق حاضر ارزیابی میزان فرونشست منطقه با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و سری زمانی SBAS و همچنین پتانسیل سنجی مناطق مستعد وقوع فرونشست با استفاده از مدل تلفیقی منطق فازی و AHP است.

### منطقه مورد مطالعه

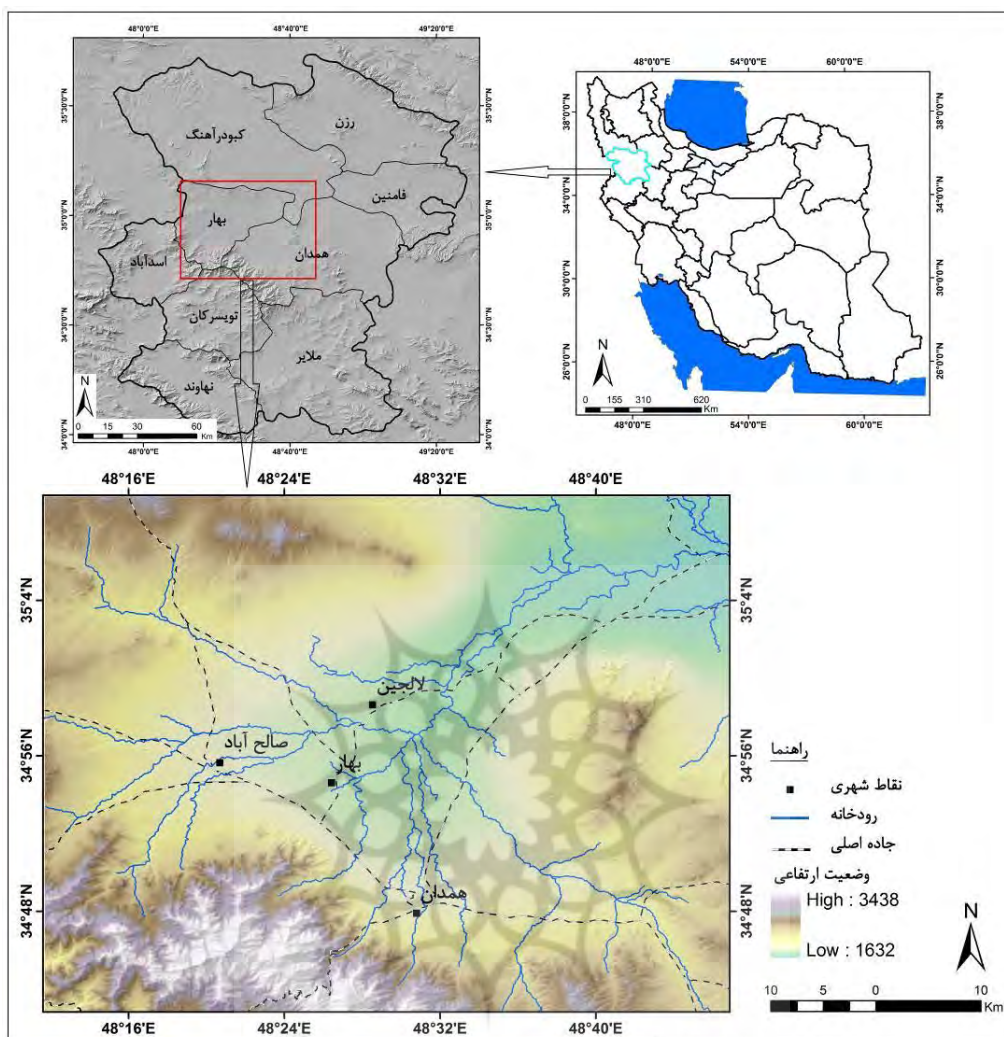
دشت همدان - بهار در بخش جنوبی حوضه آبریز قره‌چای قرار دارد. حوضه آبریز قره‌چای از نظر تقسیمات حوضه‌ای به عنوان یکی از زیرحوضه‌های دریاچه نمک محسوب می‌شود. مهم‌ترین سرشاخه‌های این حوضه در استان همدان شامل یلفان، آبشینه، صالح آباد، بهادربیک، تاسران، خمیگان، دق، قروه و شوند است. شاخه اصلی حوضه در مناطق مرکزی این حوضه، از غرب به سمت شرق در جریان است و پس از دریافت شاخه‌های فرعی اطراف، در جنوب فامنین به رودخانه شرار می‌پیوندد و در نهایت به سمت دریاچه نمک قم حرکت می‌کند (خدابخش و همکاران، ۱۳۹۲: ۷۲). دشت همدان - بهار به عنوان بخشی از حوضه آبریز قره‌چای، از نظر تقسیمات سیاسی در بین دو شهرستان همدان و بهار قرار دارد (شکل ۱). دشت همدان بهار از سمت جنوب به کوهستان الوند و از سمت شمال به دشت‌های کبودرآهنگ و فامنین منتهی می‌شود. از نظر اقلیمی این منطقه به دلیل نداشتن ارتفاعات قابل توجه و قرارگیری در واحد ایران مرکزی، دارای میانگین بارش ۲۵۰ میلی‌متری است و از نظر دمایی نیز دارای زمستان‌های سرد و خشک و تابستان‌های گرم است.

۱. Urayasu

۲. Nguyen Hao & Takewaka

۳. Nam Dinh

۴. Zhao



شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق به منظور دستیابی به اهداف مورد نظر از روش‌های توصیفی-تحلیلی استفاده شده است. داده‌های تحقیق شامل تصاویر راداری سنتینل ۱ (۷۳ تصاویر راداری در طی بازه زمانی ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴)، تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ (مربوط به تاریخ ۲۰۲۰/۰۶/۱۳) به منظور تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه)، مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر  $SRTM$ ، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و همچنین اطلاعات مربوط به چاه‌های پیژومتری منطقه است. ابزارهای تحقیق نیز شامل  $GMT$  (به منظور انجام روش تداخل سنجی راداری و سری زمانی  $SBAS$ )،  $ENVI$  (به منظور تهیه نقشه کاربری اراضی)،  $ARCGIS$  (به منظور اجرای مدل منطق فازی و  $AHP$ ) و  $expert choice$  (وزن دهی به لایه‌های اطلاعاتی) است. این تحقیق در ۲ مرحله کلی انجام شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

**مرحله اول (ارزیابی میزان فرونشست منطقه با استفاده از تصاویر راداری):** به منظور انجام این مرحله از روش تداخل سنجی راداری و سری زمانی  $SBAS$  استفاده شده است. تکنیک تداخل سنجی راداری روشی کاربردی جهت بررسی تغییرات سطح زمین است (بابایی و همکاران، ۱۳۹۶: ۵۶). این تکنیک بر پایه اندازه‌گیری‌های فاصله با طول موج الکترومغناطیس می‌باشد. اگر سنسور، یک پالس را به سمت شی انتقال دهد و پالس بازگشت را ذخیره کند، اختلاف زمان بین دو پالس فاصله بین سنسور و شی را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، تأخیر زمانی پالس بازگشتی، فاصله سنسور تا شی را اندازه‌گیری می‌کند و بر مبنای این اختلاف نقشه‌های اینترفروگرام تهیه می‌شود (نصیری خانقاه و شریفیان عطار،

۱۳۹۸: ۶۲). بعد از تولید تداخل نگارها و تصحیح آن‌ها نسبت به خطاهای موجود در تداخل‌سنجی، یک مجموعه از تداخل‌نگارها از یک منطقه حاصل می‌شود که در بازه‌های زمانی مختلف می‌باشند. عدم همبستگی زمانی و مکانی بین تصاویر سبب می‌شود تا تقریباً هر تداخل‌نگار شامل مناطق بزرگی باشد که در آن‌ها همبستگی پایین است و اندازه‌گیری انجام شده در این مناطق قابل اطمینان نیست و یا اصلاً قابل انجام نیست. این محدودیت‌ها سبب می‌شود تا روش تداخل‌سنجی، به تنهایی ابزاری کامل جهت نظارت و اندازه‌گیری اعوجاجات سطح زمین و تغییرات توپوگرافی نباشد. بنابراین از روش‌های سری زمانی از جمله SBAS به منظور رفع این مشکل استفاده می‌شود (هانسن<sup>۱</sup>، ۲۰۰۱). در این مرحله بر مبنای روش‌های مذکور، ابتدا ۷۳ تصاویر راداری سنتینل ۱ (حالت مداری صعودی، نوع IW، فرمت SLC، پولاریزاسیون VV) از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴ تهیه شده (جدول ۱) و پس از انجام پیش پردازش‌های لازم، نقشه‌های اینترفروگرام منطقه تولید شده و در نهایت با استفاده از روش سری زمانی، میزان فرونشست منطقه در طی دوره زمانی ۵ ساله محاسبه شده است.

جدول ۱: تاریخ تصاویر مورد استفاده

ردیف	تاریخ	ردیف	تاریخ	ردیف	تاریخ
۱	۲۰۱۵/۰۱/۱۶	۲۶	۲۰۱۶/۱۱/۱۸	۵۱	۲۰۱۸/۰۸/۰۴
۲	۲۰۱۵/۰۲/۰۹	۲۷	۲۰۱۶/۱۲/۱۲	۵۲	۲۰۱۸/۰۸/۲۸
۳	۲۰۱۵/۰۳/۰۵	۲۸	۲۰۱۷/۰۱/۰۵	۵۳	۲۰۱۸/۰۹/۲۱
۴	۲۰۱۵/۰۳/۲۹	۲۹	۲۰۱۷/۰۱/۲۹	۵۴	۲۰۱۸/۱۰/۱۵
۵	۲۰۱۵/۰۴/۲۲	۳۰	۲۰۱۷/۰۲/۲۲	۵۵	۲۰۱۸/۱۱/۰۸
۶	۲۰۱۵/۰۵/۱۶	۳۱	۲۰۱۷/۰۳/۱۸	۵۶	۲۰۱۸/۱۲/۰۲
۷	۲۰۱۵/۰۶/۰۹	۳۲	۲۰۱۷/۰۴/۱۱	۵۷	۲۰۱۸/۱۲/۲۶
۸	۲۰۱۵/۰۷/۰۳	۳۳	۲۰۱۷/۰۵/۰۵	۵۸	۲۰۱۹/۰۱/۱۹
۹	۲۰۱۵/۰۷/۲۷	۳۴	۲۰۱۷/۰۵/۲۹	۵۹	۲۰۱۹/۰۲/۱۲
۱۰	۲۰۱۵/۰۸/۲۰	۳۵	۲۰۱۷/۰۶/۲۲	۶۰	۲۰۱۹/۰۳/۰۸
۱۱	۲۰۱۵/۰۹/۱۳	۳۶	۲۰۱۷/۰۸/۰۹	۶۱	۲۰۱۹/۰۴/۰۱
۱۲	۲۰۱۵/۱۱/۲۴	۳۷	۲۰۱۷/۰۹/۰۲	۶۲	۲۰۱۹/۰۴/۲۵
۱۳	۲۰۱۵/۱۲/۱۸	۳۸	۲۰۱۷/۰۹/۲۶	۶۳	۲۰۱۹/۰۵/۱۹
۱۴	۲۰۱۶/۰۱/۱۱	۳۹	۲۰۱۷/۱۰/۲۰	۶۴	۲۰۱۹/۰۶/۱۲
۱۵	۲۰۱۶/۰۲/۰۴	۴۰	۲۰۱۷/۱۱/۱۳	۶۵	۲۰۱۹/۰۷/۰۶
۱۶	۲۰۱۶/۰۲/۲۸	۴۱	۲۰۱۷/۱۲/۰۷	۶۶	۲۰۱۹/۰۷/۳۰
۱۷	۲۰۱۶/۰۳/۲۳	۴۲	۲۰۱۷/۱۲/۳۱	۶۷	۲۰۱۹/۰۸/۲۳
۱۸	۲۰۱۶/۰۴/۱۶	۴۳	۲۰۱۸/۰۱/۲۴	۶۸	۲۰۱۹/۰۹/۱۶
۱۹	۲۰۱۶/۰۵/۱۰	۴۴	۲۰۱۸/۰۲/۱۷	۶۹	۲۰۱۹/۱۰/۱۰
۲۰	۲۰۱۶/۰۶/۰۳	۴۵	۲۰۱۸/۰۳/۱۳	۷۰	۲۰۱۹/۱۱/۰۳
۲۱	۲۰۱۶/۰۷/۲۱	۴۶	۲۰۱۸/۰۴/۰۶	۷۱	۲۰۱۹/۱۱/۲۷
۲۲	۲۰۱۶/۰۸/۱۴	۴۷	۲۰۱۸/۰۴/۳۰	۷۲	۲۰۱۹/۱۲/۲۱
۲۳	۲۰۱۶/۰۹/۰۷	۴۸	۲۰۱۸/۰۵/۲۴	۷۳	۲۰۲۰/۰۱/۱۴
۲۴	۲۰۱۶/۱۰/۰۱	۴۹	۲۰۱۸/۰۶/۱۷		
۲۵	۲۰۱۶/۱۰/۲۵	۵۰	۲۰۱۸/۰۷/۱۱		

**مرحله دوم (پتانسیل سنجی مناطق مستعد وقوع فرونشست):** در این مرحله به منظور پتانسیل سنجی مناطق مستعد وقوع فرونشست، از مدل منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و همچنین ۶ پارامتر شامل شیب، فاصله از رودخانه، نوع کاربری اراضی، نوع لیتولوژی، واحدهای ژئومورفولوژی و افت آب‌های زیرزمینی استفاده شده است. روش کار به این صورت است که ابتدا لایه‌های اطلاعاتی تهیه شده است و سپس بر مبنای پتانسیل فرونشست، لایه‌های اطلاعاتی فازی‌سازی شده است. پس از فازی‌سازی لایه‌های اطلاعاتی، با استفاده از نرم‌افزار expert choice به لایه‌های اطلاعاتی وزن داده شده است و سپس وزن بدست آمده بر روی لایه‌های اطلاعاتی اعمال شده است و در نهایت با ترکیب لایه‌های اطلاعاتی از طرق گامای فازی ۰/۷، نقشه مناطق مستعد وقوع فرونشست تهیه شده است. پس از تهیه نقشه نهایی، نتایج بدست آمده با نتایج حاصله از مراحل قبلی مقایسه و تحلیل شده است. در شکل ۲ چارت مراحل کار نشان داده شده است.



شکل ۲: چارت مراحل انجام کار

## بحث و نتایج

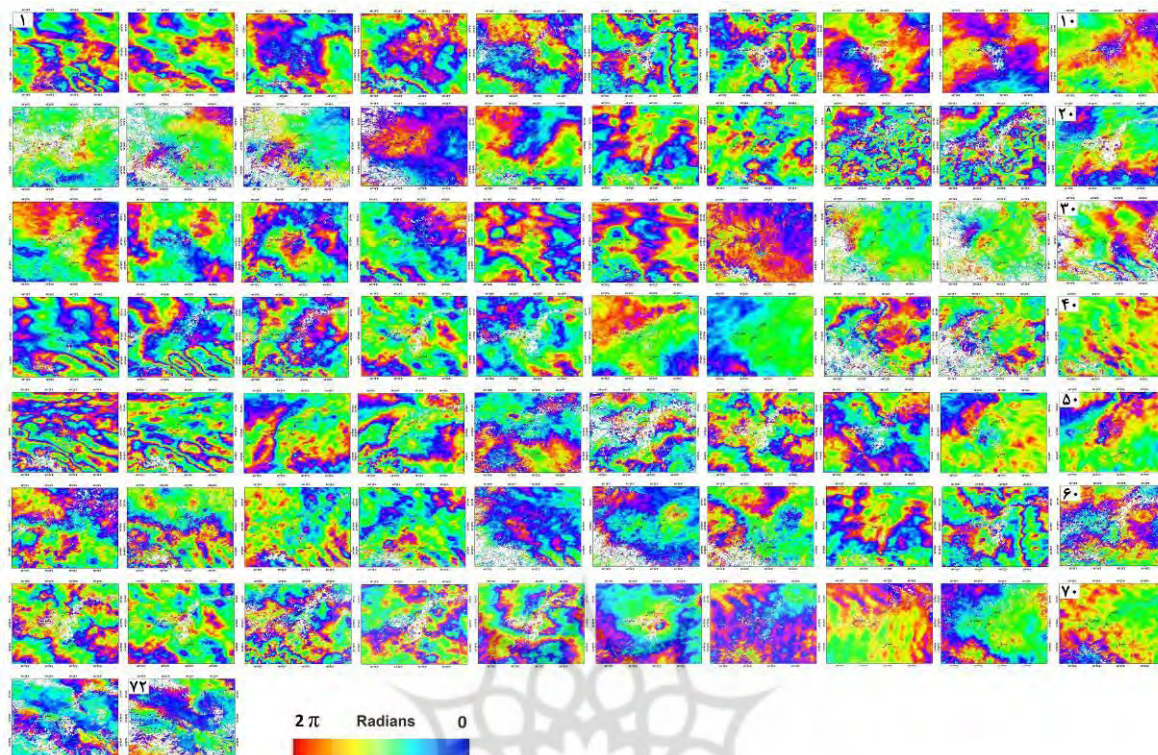
– **محاسبه میزان فرونشست منطقه:** در این تحقیق پس از تهیه تصاویر، ابتدا پیش پردازش‌های لازم بر روی تصاویر انجام شده است. پس از انجام پیش پردازش‌ها، بر مبنای بیس لاین زمانی تصاویر (جدول ۲)، زوج تصاویر مورد نظر جهت انجام تداخل سنجی راداری انتخاب شده است.

جدول ۲: زوج تصاویر انتخابی برای تشکیل اینترفروگرام

ردیف	زوج تصاویر	ردیف	زوج تصاویر
۱	۲۰۱۵/۰۲/۰۹ – ۲۰۱۵/۰۱/۱۶	۳۷	۲۰۱۷/۰۹/۲۶ – ۲۰۱۷/۰۹/۰۲
۲	۲۰۱۵/۰۲/۰۵ – ۲۰۱۵/۰۲/۰۹	۳۸	۲۰۱۷/۱۰/۲۰ – ۲۰۱۷/۰۹/۲۶
۳	۲۰۱۵/۰۳/۲۹ – ۲۰۱۵/۰۳/۰۵	۳۹	۲۰۱۷/۱۱/۱۳ – ۲۰۱۷/۱۰/۲۰
۴	۲۰۱۵/۰۴/۲۲ – ۲۰۱۵/۰۳/۲۹	۴۰	۲۰۱۷/۱۲/۰۷ – ۲۰۱۷/۱۱/۱۳
۵	۲۰۱۵/۰۵/۱۶ – ۲۰۱۵/۰۴/۲۲	۴۱	۲۰۱۷/۱۲/۳۱ – ۲۰۱۷/۱۲/۰۷
۶	۲۰۱۵/۰۶/۰۹ – ۲۰۱۵/۰۵/۱۶	۴۲	۲۰۱۸/۰۱/۲۴ – ۲۰۱۷/۱۲/۳۱

۲۰۱۸/۰۱/۲۴	-۲۰۱۸/۰۲/۱۷	۴۳	۲۰۱۵/۰۶/۰۹	-۲۰۱۵/۰۷/۰۳	۷
۲۰۱۸/۰۲/۱۷	-۲۰۱۸/۰۳/۱۳	۴۴	۲۰۱۵/۰۷/۰۳	-۲۰۱۵/۰۷/۲۷	۸
۲۰۱۸/۰۳/۱۳	-۲۰۱۸/۰۴/۰۶	۴۵	۲۰۱۵/۰۷/۲۷	-۲۰۱۵/۰۸/۲۰	۹
۲۰۱۸/۰۴/۰۶	-۲۰۱۸/۰۴/۳۰	۴۶	۲۰۱۵/۰۸/۲۰	-۲۰۱۵/۰۹/۱۳	۱۰
۲۰۱۸/۰۴/۳۰	-۲۰۱۸/۰۵/۲۴	۴۷	۲۰۱۵/۰۹/۱۳	-۲۰۱۵/۱۱/۲۴	۱۱
۲۰۱۸/۰۵/۲۴	-۲۰۱۸/۰۶/۱۷	۴۸	۲۰۱۵/۱۱/۲۴	-۲۰۱۵/۱۲/۱۸	۱۲
۲۰۱۸/۰۶/۱۷	-۲۰۱۸/۰۷/۱۱	۴۹	۲۰۱۵/۱۲/۱۸	-۲۰۱۶/۰۱/۱۱	۱۳
۲۰۱۸/۰۷/۱۱	-۲۰۱۸/۰۸/۰۴	۵۰	۲۰۱۶/۰۱/۱۱	-۲۰۱۶/۰۲/۰۴	۱۴
۲۰۱۸/۰۸/۰۴	-۲۰۱۸/۰۸/۲۸	۵۱	۲۰۱۶/۰۲/۰۴	-۲۰۱۶/۰۲/۲۸	۱۵
۲۰۱۸/۰۸/۲۸	-۲۰۱۸/۰۹/۲۱	۵۲	۲۰۱۶/۰۲/۲۸	-۲۰۱۶/۰۳/۲۳	۱۶
۲۰۱۸/۰۹/۲۱	-۲۰۱۸/۱۰/۱۵	۵۳	۲۰۱۶/۰۳/۲۳	-۲۰۱۶/۰۴/۱۶	۱۷
۲۰۱۸/۱۰/۱۵	-۲۰۱۸/۱۱/۰۸	۵۴	۲۰۱۶/۰۴/۱۶	-۲۰۱۶/۰۵/۱۰	۱۸
۲۰۱۸/۱۱/۰۸	-۲۰۱۸/۱۲/۰۲	۵۵	۲۰۱۶/۰۵/۱۰	-۲۰۱۶/۰۶/۰۳	۱۹
۲۰۱۸/۱۲/۰۲	-۲۰۱۸/۱۲/۲۶	۵۶	۲۰۱۶/۰۶/۰۳	-۲۰۱۶/۰۷/۲۱	۲۰
۲۰۱۸/۱۲/۲۶	-۲۰۱۹/۰۱/۱۹	۵۷	۲۰۱۶/۰۷/۲۱	-۲۰۱۶/۰۸/۱۴	۲۱
۲۰۱۹/۰۱/۱۹	-۲۰۱۹/۰۲/۱۲	۵۸	۲۰۱۶/۰۸/۱۴	-۲۰۱۶/۰۹/۰۷	۲۲
۲۰۱۹/۰۲/۱۲	-۲۰۱۹/۰۳/۰۸	۵۹	۲۰۱۶/۰۹/۰۷	-۲۰۱۶/۱۰/۰۱	۲۳
۲۰۱۹/۰۳/۰۸	-۲۰۱۹/۰۴/۰۱	۶۰	۲۰۱۶/۱۰/۰۱	-۲۰۱۶/۱۰/۲۵	۲۴
۲۰۱۹/۰۴/۰۱	-۲۰۱۹/۰۴/۲۵	۶۱	۲۰۱۶/۱۰/۲۵	-۲۰۱۶/۱۱/۱۸	۲۵
۲۰۱۹/۰۴/۲۵	-۲۰۱۹/۰۵/۱۹	۶۲	۲۰۱۶/۱۱/۱۸	-۲۰۱۶/۱۲/۱۲	۲۶
۲۰۱۹/۰۵/۱۹	-۲۰۱۹/۰۶/۱۲	۶۳	۲۰۱۶/۱۲/۱۲	-۲۰۱۷/۰۱/۰۵	۲۷
۲۰۱۹/۰۶/۱۲	-۲۰۱۹/۰۷/۰۶	۶۴	۲۰۱۷/۰۱/۰۵	-۲۰۱۷/۰۱/۲۹	۲۸
۲۰۱۹/۰۷/۰۶	-۲۰۱۹/۰۷/۳۰	۶۵	۲۰۱۷/۰۱/۲۹	-۲۰۱۷/۰۲/۲۲	۲۹
۲۰۱۹/۰۷/۳۰	-۲۰۱۹/۰۸/۲۳	۶۶	۲۰۱۷/۰۲/۲۲	-۲۰۱۷/۰۳/۱۸	۳۰
۲۰۱۹/۰۸/۲۳	-۲۰۱۹/۰۹/۱۶	۶۷	۲۰۱۷/۰۳/۱۸	-۲۰۱۷/۰۴/۱۱	۳۱
۲۰۱۹/۰۹/۱۶	-۲۰۱۹/۱۰/۱۰	۶۸	۲۰۱۷/۰۴/۱۱	-۲۰۱۷/۰۵/۰۵	۳۲
۲۰۱۹/۱۰/۱۰	-۲۰۱۹/۱۱/۰۳	۶۹	۲۰۱۷/۰۵/۰۵	-۲۰۱۷/۰۵/۲۹	۳۳
۲۰۱۹/۱۱/۰۳	-۲۰۱۹/۱۱/۲۷	۷۰	۲۰۱۷/۰۵/۲۹	-۲۰۱۷/۰۶/۲۲	۳۴
۲۰۱۹/۱۱/۲۷	-۲۰۱۹/۱۲/۲۱	۷۱	۲۰۱۷/۰۶/۲۲	-۲۰۱۷/۰۸/۰۹	۳۵
۲۰۱۹/۱۲/۲۱	-۲۰۲۰/۰۱/۱۴	۷۲	۲۰۱۷/۰۸/۰۹	-۲۰۱۷/۰۹/۰۲	۳۶

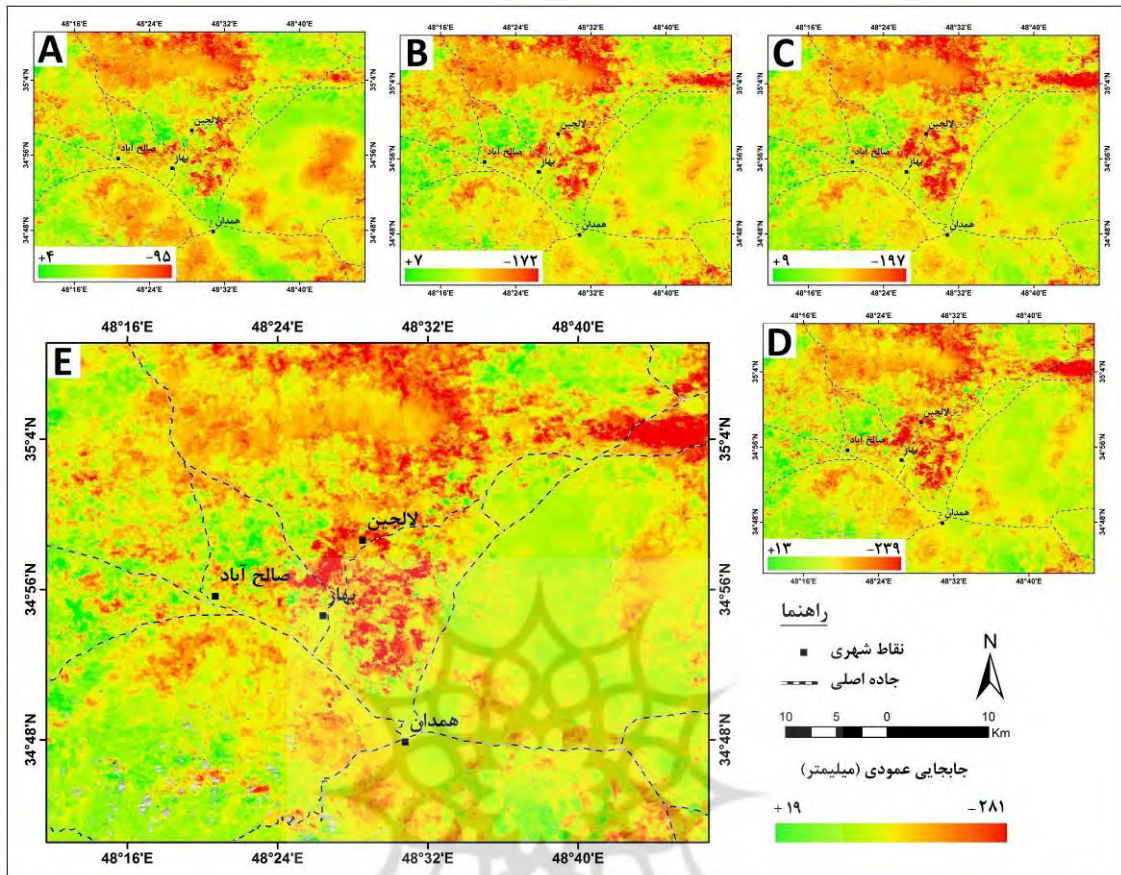
پس از انتخاب زوج تصاویر مورد نظر، از طریق نرم افزار GMT در سیستم عامل LINUX، نقشه های اینترفروگرام مورد نظر تهیه شده است (شکل ۳).



شکل ۳: نقشه‌های اینترفروگرام منطقه مورد مطالعه

پس از تهیه نقشه‌های اینترفروگرام، نقشه میزان فرونشست منطقه در طی دوره زمانی مورد مطالعه تهیه شده است (شکل ۴). بر اساس نتایج بدست آمده، محدوده مطالعاتی در طی دوره زمانی ۵ سال (از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴)، با ۲۸۱ میلی‌متر فرونشست مواجه شده است که بر اساس آن می‌توان گفت که منطقه مورد مطالعه دارای ۵۶ میلی‌متر فرونشست سالانه است. بررسی وضعیت سالانه فرونشست در منطقه مورد مطالعه بیانگر این است که در طی دوره زمانی اول یعنی از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۶/۰۱/۱۱ دارای ۹۵ میلی‌متر فرونشست بوده است که این میزان در دوره زمانی دوم یعنی از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ با ۵۷ میلی‌متر افزایش به ۱۵۲ میلی‌متر رسیده است. میزان فرونشست در دوره زمانی سوم یعنی از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۸/۰۱/۲۴ با ۵۵ میلی‌متر افزایش به ۱۹۷ رسیده است. در دوره چهارم نیز یعنی از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۹/۰۱/۱۹، منطقه مورد مطالعه ۴۲ میلی‌متر فرونشست داشته است و در مجموع میزان فرونشست منطقه به ۲۳۹ میلی‌متر افزایش یافته است. همچنین در دوره زمانی پنجم یعنی از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴ این منطقه ۴۲ میلی‌متر فرونشست مواجه شده است و در مجموع میزان فرونشست منطقه در طی دوره زمانی ۵ ساله به ۲۸۱ میلی‌متر افزایش یافته است (شکل ۵-۴۴). با توجه به موارد مذکور، حداکثر میزان فرونشست سالانه در منطقه با ۹۵ میلی‌متر مربوط به سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ بوده است و بعد از آن میزان فرونشست روند کاهشی داشته است و در نهایت در طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ و ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ به ۴۲ میلی‌متر در سال کاهش یافته است (شکل ۵).





شکل ۴: نقشه میزان فرونشست منطقه (A) از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۶/۰۱/۰۵ (B) ۲۰۱۶/۰۱/۱۱ تا ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ (C) ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۶/۰۱/۲۴ (D) و ۲۰۱۹/۰۱/۱۹ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴ (E)

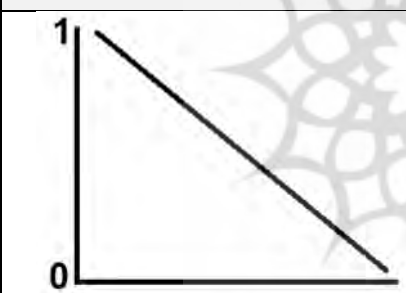
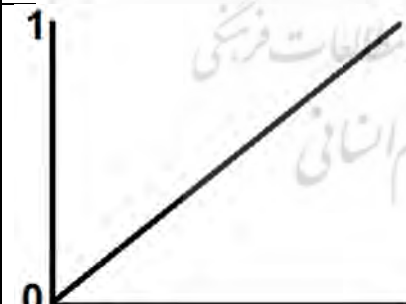
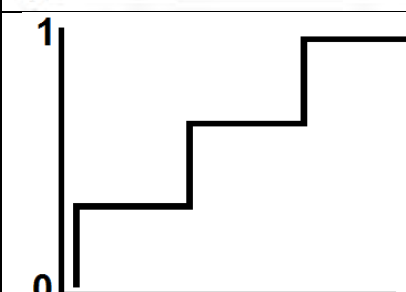


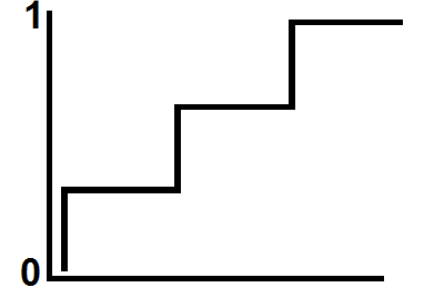
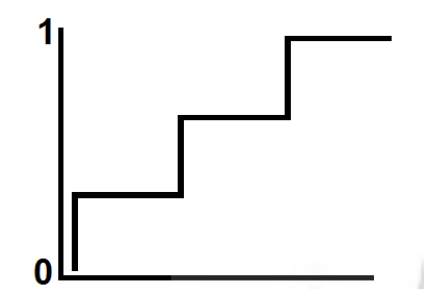
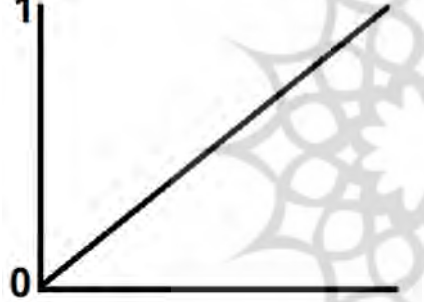
شکل ۵: نمودار میزان فرونشست سالانه در منطقه مورد مطالعه

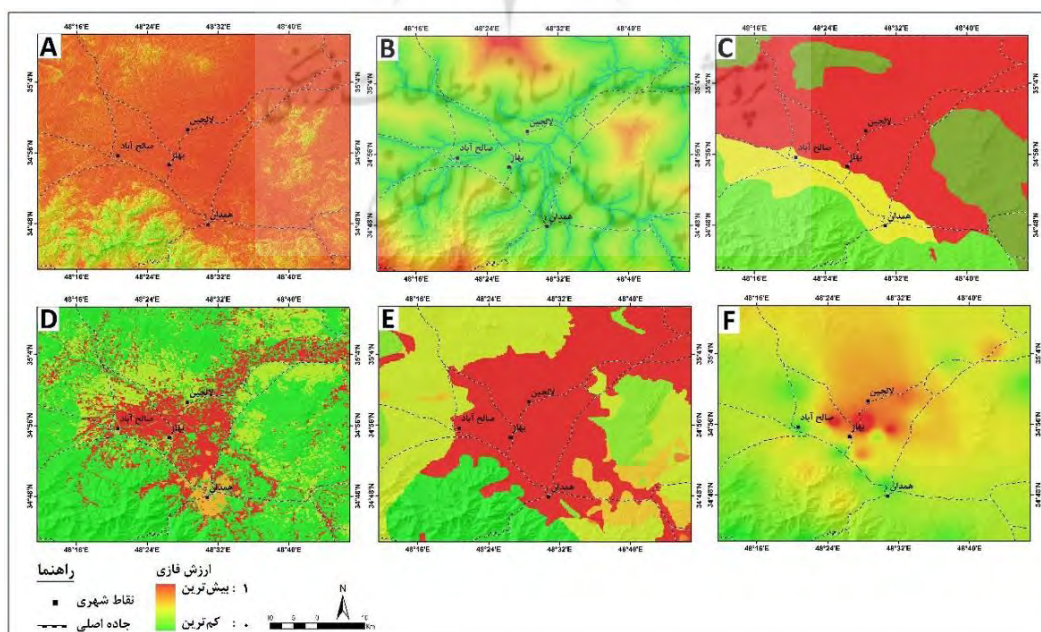
## پتانسیل سنجی مناطق مستعد وقوع فرونشست

در این تحقیق به منظور شناسایی مناطق مستعد وقوع فرونشست از ۶ پارامتر استفاده شده است. پارامترهای مد نظر شامل شیب منطقه، فاصله از رودخانه، نوع کاربری اراضی، نوع لیتولوژی، واحدهای ژئومورفولوژی و افت آب‌های زیرزمینی می‌باشد و بر مبنای این پارامترها مناطق مستعد فرونشست در محدوده شناسایی شده است. پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی، به منظور انجام پهنه‌بندی نهایی، لایه‌های تهیه شده فازی‌سازی شده است. فازی‌سازی هر لایه بر مبنای پتانسیلی که جهت وقوع فرونشست دارد، صورت گرفته است، به طوری که برای لایه شیب، به مناطق دارای شیب کم‌تر ارزش نزدیک به ۱ و به مناطق با شیب بیش‌تر ارزش نزدیک به صفر داده شده است. برای لایه رودخانه، به مناطق نزدیک به رودخانه ارزش نزدیک به صفر و به مناطق دورتر ارزش نزدیک به ۱ داده شده است. برای واحدهای ژئومورفولوژی، به واحدهای دشت و مخروطه‌افکنه ارزش نزدیک به ۱ و به واحدهای تپه ماهور و کوهستان ارزش نزدیک به صفر داده شده است. برای لایه کاربری اراضی، به کاربری‌های اراضی کشاورزی و سکونتگاهی ارزش نزدیک به ۱ و به کاربری مراتع ارزش نزدیک به صفر داده شده است. برای لایه لیتولوژی نیز به مناطق آبرفتی ارزش نزدیک به ۱ و به مناطق بازالتی و آندزیتی ارزش نزدیک به صفر داده شده است (جدول ۳ و شکل ۶).

جدول ۳: نحوه استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی

شکل	تابع عضویت	نحوه استانداردسازی	معیار
A		مناطق کم شیب پتانسیل فرونشست بالایی دارند.	شیب
B		مناطق دور از رودخانه پتانسیل فرونشست بالاتری دارند.	رودخانه
C		-دشت دارای ارزش ۰/۹ -مخروطه‌افکنه دارای ارزش ۰/۷ -تپه ماهور دارای ارزش ۰/۵ -کوهستان دارای ارزش ۰/۳	واحدهای ژئومورفولوژی

D		<p>کشاورزی آبی دارای ارزش ۰/۹                  مناطق شهری دارای ارزش ۰/۷                  کشاورزی دیم دارای ارزش ۰/۵                  مراتع دارای ارزش ۰/۳</p>	کاربری اراضی
E		<p>مواد آبرفتی دارای ارزش ۰/۹                  شیل و توف دارای ارزش ۰/۸                  شیل و ماسه سنگ دارای ارزش ۰/۷                  مارن، ژئیس و ماسه سنگ دارای ارزش ۰/۶                  کنگلومرا و ماسه سنگ دارای ارزش ۰/۵                  آهک دارای ارزش ۰/۴                  دیوریت و گابرو دارای ارزش ۰/۳                  آندزیت و بازالت دارای ارزش ۰/۲</p>	لیتولوژی
F		<p>مناطق دارای افت آب بیش تر، پتانسیل فرونشست بالاتری دارند.</p>	آب زیرزمینی



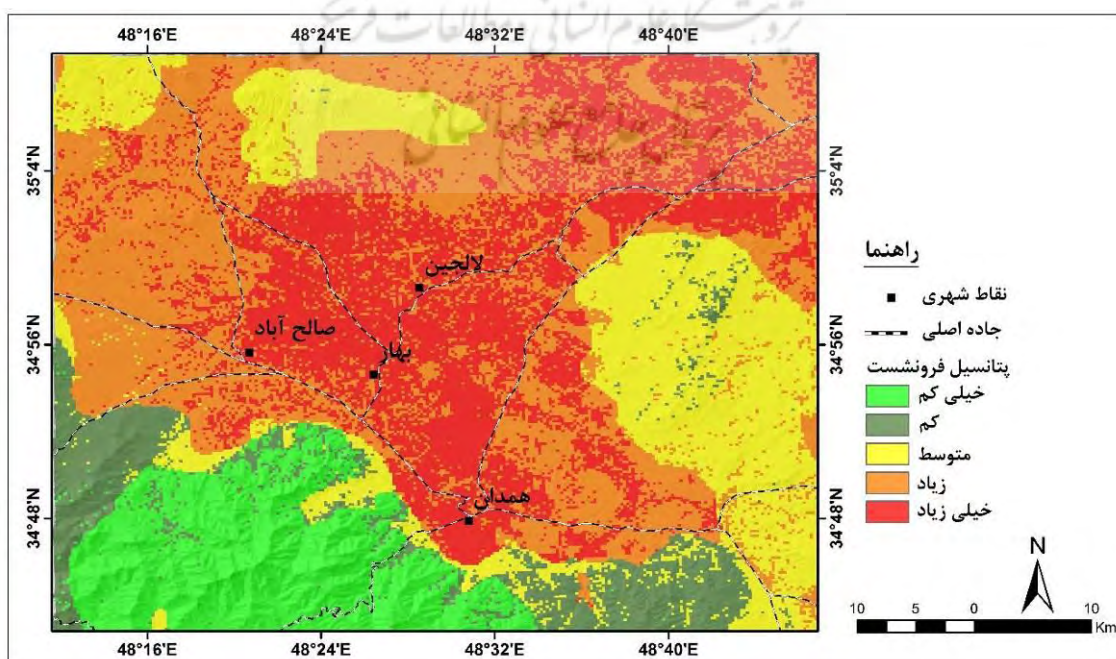
شکل ۶: نقشه استاندارد شده لایه‌های اطلاعاتی

**وزن‌دهی و ترکیب لایه‌های اطلاعاتی:** پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی، از مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به منظور وزن‌دهی به لایه‌ها استفاده شده است (جدول ۴). به منظور امتیازدهی به معیارها از طریق پرسش‌نامه و دیدگاه‌های کارشناسان امر استفاده شده است. برای انجام محاسبات از نرم‌افزار expert choice استفاده شده و پس از بدست آوردن وزن‌های نهایی هر کدام از معیارها، وزن بدست آمده در نرم‌افزار ARCGIS بر روی لایه‌ها اعمال شده است.

جدول ۴: وزن لایه‌های اطلاعاتی بر اساس مدل AHP

پارامتر	شیب	رودخانه	واحدهای ژئومورفولوژی	لیتولوژی	کاربری اراضی	آب زیرزمینی
وزن	۰/۱۷۶	۰/۱۰۷	۰/۱۵۹	۰/۱۴۷	۰/۱۷۹	۰/۲۳۲

پس از وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی، با استفاده از عمگر گامای فازی ۷، لایه‌های اطلاعاتی با هم ترکیب شده و در نهایت نقشه مناطق مستعد وقوع فرونشست تهیه شده است (شکل ۷). بر اساس نقشه تهیه شده، مناطق میانی محدوده مطالعاتی که شامل محدوده‌های شهری همدان، بهار، لالجین و صالح‌آباد است به دلیل نوع کاربری، نوع لیتولوژی، شیب کم، قرار گرفتن در واحد دشت و مخروطه افکنه و همچنین افت زیاد منابع آب زیرزمینی در این مناطق، پتانسیل بالایی جهت وقوع و تشدید فرونشست در آینده دارد. بررسی نتایج حاصله از طریق تصاویر راداری و همچنین پارامترهای مورد نظر بیانگر انطباق نتایج بدست آمده است. در واقع، نتایج حاصله از تصاویر راداری بیانگر این است که مناطق پایین دست شهر همدان و همچنین مناطق مجاور شهرهای بهار و صالح‌آباد، دارای بیش‌ترین میزان فرونشست بوده است، همچنین این مناطق در مدل منطق فازی-AHP به عنوان مناطق مستعد وقوع فرونشست مشخص شده است، بنابراین میزان فرونشست منطقه ارتباط معناداری با پارامترهای شیب، ارتفاع، کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از رودخانه و افت منابع آب زیرزمینی دارد.



شکل ۷: نقشه مناطق مستعد وقوع فرونشست در منطقه مورد مطالعه

## نتیجه گیری

قرارگیری دشت همدان-بهار در منطقه نیمه خشک و کمبود منابع آب سطحی سبب شده است تا این دشت در طی سال‌های اخیر با مخاطره فرونشست مواجه شود. اهمیت مسئله فرونشست سبب شده است تا در این مورد تحقیقات مختلفی صورت گیرد، در بیش‌تر تحقیقات صورت گرفته، محاسبه فرونشست یا بدون توجه پارامترها بوده است و یا اینکه فقط بر مبنای پارامترها بوده است، اما در این پژوهش ابتدا با استفاده از تصاویر راداری میزان فرونشست منطقه محاسبه شده است و در ادامه رابطه آن با پارامترهای مورد استفاده ارزیابی شده است. نتایج تحقیق بیانگر این است که دشت همدان-بهار پتانسیل زیادی جهت وقوع فرونشست دارد، به طوری که بر اساس نتایج بدست آمده این دشت در طی دوره زمانی ۵ ساله (از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴)، با ۲۸۱ میلی‌متر فرونشست مواجه شده است که بر اساس آن می‌توان گفت که منطقه مورد مطالعه دارای میانگین ۵۶ میلی‌متر فرونشست سالانه است. بررسی روند زمانی فرونشست در منطقه بیانگر این است که حداکثر میزان فرونشست سالانه در منطقه با ۹۵ میلی‌متر مربوط به سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ بوده است و بعد از آن میزان فرونشست روند کاهشی داشته است و در نهایت در طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ و ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ به ۴۲ میلی‌متر در سال کاهش یافته است. بررسی روند مکانی فرونشست نیز بیانگر این است که بیش‌ترین میزان فرونشست در مناطق پایین دست شهر همدان و مناطق مجاور شهرهای بهار و صالح آباد بوده است. همچنین نتایج پتانسیل‌سنجی مناطق مستعد وقوع فرونشست بیانگر این است که مناطق میانی محدوده مطالعاتی که شامل محدوده‌های شهری همدان، بهار، لالچین و صالح آباد است به دلیل نوع کاربری، نوع لیتولوژی، شیب کم، قرار گرفتن در واحد دشت و مخروطه افکنه و همچنین افت زیاد منابع آب زیرزمینی در این مناطق، پتانسیل بالایی جهت وقوع و تشدید فرونشست در آینده دارد. با توجه به اینکه این مناطق در محاسبه فرونشست منطقه، دارای بالاترین میزان فرونشست بوده‌اند، بنابراین بین نتایج حاصله از تصاویر راداری و پهنه‌بندی، انطباق وجود دارد.

## منابع

- بابایی، س؛ خزایی، ص؛ قاصرمبارکه، ف، ۱۳۹۶. پردازش سری زمانی تداخل سنجی تصاویر راداری-COSMO-SkyMed به منظور محاسبه نرخ فرونشست در محدوده سازه‌های زمینی و زیرزمینی در شهر تهران، نشریه علوم و فنون نقشه برداری، دوره ۷، شماره ۱، صص ۶۷-۵۵.
- خدابخش، س؛ محسنی، ح؛ حسام‌زاده، م؛ مهاجروطن، م؛ کرم‌الهی، ل، ۱۳۹۲. بررسی سرشاخه‌های باختری رودخانه قره‌چای براساس نوع رودخانه و رخساره‌های رسوبی، مجله رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۱، شماره ۱، صص ۸۶-۷۱.
- خرمی، م، ۱۳۹۶. تخمین فرونشست مشهد با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و ارزیابی آن با توجه به مشخصات ژئوتکنیکی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی، دانشکده مهندسی.
- رکنی، ج؛ حسین‌زاده، س؛ لشکری‌پور، غ؛ ولایتی، س، 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.
- شایان، س؛ یمانی، م؛ یادگاری، م، ۱۳۹۵. پهنه بندی فرونشست در حوضه آبریز قره‌چای، مجله هیدروژئومورفولوژی، دوره ۳، شماره ۹، صص ۱۵۸-۱۳۹.
- شریفی‌کیا، م، ۱۳۹۱. تعیین میزان فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق-بهرمان، مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا، دوره ۱۶، شماره ۳، صص ۷۷-۵۵.
- کریمی، م؛ قنبری، ع. ا؛ امیری، ش، ۱۳۹۲. سنجش خطرپذیری سکونتگاه‌های شهری از پدیده فرونشست زمین (مطالعه موردی: منطقه ۱۸ شهر تهران)، مجله برنامه‌ریزی فضایی (جغرافیا)، سال ۳، شماره ۱، صص ۵۶-۳۷.

- محمدخان، ش؛ گنجائیان، ح؛ گروسی، ل؛ زنگنه‌تبار، ز، ۱۳۹۸. ارزیابی تأثیر افت آب‌های زیرزمینی بر میزان فرونشست با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ (محدوده مورد مطالعه، دشت قره)، مجله سپهر، دوره ۲۸، شماره ۱۱۲، صص ۲۲۹-۲۱۹.
- مقصودی، ی؛ امانی، ر؛ احمدی، ح، ۱۳۹۸. بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل ۱ و تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی، مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال ۱۵، شماره ۱، صص ۲۹۹-۳۱۳.
- نصیری خانقاه، ع؛ شریفیان عطار، ر، ۱۳۹۸. کاربرد تداخل‌سنجی رادار در مطالعه فرونشست، انتشارات مهر جالینوس، ۲۹۴ صفحه.
- Abir, I. A., Khan, S.D., Ghulam, A., Tariq, S., Shah, M.T. (2015). Active tectonics of western Potwar Plateau–Salt Range, northern Pakistan from InSAR observations and seismic imaging. *Remote Sensing of Environment*, 168: 265-275.
- Aimaity, Y.; Yamazaki, F.; Liu, W. Multi-Sensor InSAR Analysis of Progressive Land Subsidence over the Coastal City of Urayasu, Japan. *Remote Sens.* 2018, 10, 1304.
- Bozzano, F., Esposito, C., Franchi, S., Mazzanti, P., Perissin, D., Rocca, A. (2015). Understanding the subsidence process of a quaternary plain by combining geological and hydrogeological modelling with satellite InSAR data: the acque albule plain case study. *Remote Sens. Environ.* 168, 219–238. doi: 10.1016/j.rse.2015.07.010.
- 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.
- Hanssen, R. F. 2001. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers.
- Ho, D. T. D., Tran, C. Q., Nguyen, A. D. and Le, T. T. (2016). Measuring ground subsidence in Hanoi city by radar interferometry. *Science and Technology Development Journal*, 19 (2): 122-129.
- 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.
- 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.
- 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.
- Zhao, Q., Ma. G., Wang. Q., Yang. T., Liu, M., Gao, W., Falabella, F., Mastro, P., Pepe, A. (2019). Generation of long-term InSAR ground displacement time-series through a novel multi-sensor data merging technique: The case study of the Shanghai coastal area, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.