

ارزیابی میزان فرونشست در شهرهای غربی استان همدان با استفاده از تصاویر راداری

معصومه رجیبی^۱

شهرام روستایی^۲

سیدمحمد رضا جوادی^۳

چکیده

فرونشست زمین به حرکات قائم رو به پایین سطح زمین گفته می‌شود که میتواند با مخاطرات زیادی همراه باشد. یکی از اثرات مهم فرونشست، ایجاد مخاطره در نواحی سکونتگاهی و زیرساخت‌های مناطق شهری است، با توجه به اهمیت موضوع در این تحقیق به ارزیابی میزان فرونشست در شهرهای غربی استان همدان (همدان، بهار، صالح‌آباد و لالچین) پرداخته شده است. داده‌های تحقیق شامل تصاویر راداری ماهواره سنتینل ۱ (۷۳ تصویر راداری در طی بازه زمانی ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴)، اطلاعات چاه‌های پیژومتری منطقه (مربوط به سازمان آب و منطقه‌ای استان همدان) و مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM می‌باشد. مهم‌ترین ابزارهای تحقیق شامل نرم‌افزارهای ArcGIS و GMT می‌باشد.

این تحقیق در دو مرحله انجام شده است، در مرحله اول با استفاده از تصاویر راداری، نرخ فرونشست منطقه محاسبه شده است و در مرحله دوم با استفاده از اطلاعات مربوط به چاه‌های پیژومتری، نرخ افت سطح آب زیرزمینی و ارتباط آن با فرونشست منطقه ارزیابی شده است. نتایج تحقیق بیانگر این است که میانگین سالانه فرونشست در شهرهای همدان، بهار، صالح‌آباد و لالچین به ترتیب ۴۷، ۲۳، ۹ و ۶ میلی‌متر بوده است. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده، میانگین افت سالانه چاه‌های منطقه بین ۱۰۰ تا ۲۰۷۰ میلی‌متر بوده که بیش‌ترین میزان افت در مناطق میانی محدوده مطالعاتی رخ داده است و با توجه به اینکه در این منطقه، بیش‌ترین میزان فرونشست نیز رخ داده است، بین فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی رابطه معناداری (همبستگی ۰/۷) وجود دارد.

واژگان کلیدی: فرونشست، آب زیرزمینی، مناطق شهر، تداخل سنجی راداری

مقدمه

به طور معمول فرونشست زمین به حرکات قائم رو به پایین سطح زمین که می‌تواند با بردار اندک افقی همراه باشد، گفته می‌شود (آمیچی و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۵۸). فرونشست زمین مسئله‌ای جهانی و پدیده‌ای مورفولوژیکی است. این پدیده متأثر از فعالیت‌های انسانی و عوامل طبیعی است که ممکن است مبدل به مخاطره و تهدیدی برای انسان و دستاوردهای انسانی شود (صفاری و همکاران، ۱۳۹۵: ۸۳). پدیده فرونشست هرچند به صورت نامحسوس و تدریجی است، اما با مخاطرات زیادی همراه است که از جمله آن‌ها می‌توان به

^۱ . استاد گروه ژئومورفولوژی - دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی - دانشگاه تبریز (نویسنده مسئول)

Email : mrajabi@tabrizu.ac.ir - Tel: 09143134731

^۲ . استاد گروه ژئومورفولوژی - دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی - دانشگاه تبریز

^۳ . دانشجوی ژئومورفولوژی دکتری دانشگاه تبریز

ایجاد فروچاله‌ها، شکست و ترک ساختمان‌ها، کج شدگی تاسیسات مرتفع، آسیب دیدگی تاسیسات کشاورزی، شکستگی و انهدام پل‌ها و راه‌ها و شبکه معابر شهری اشاره کرد (شرفی‌کیا، ۱۳۹۱: ۵۶). بنابراین، این مسئله نواحی شهری را بیش‌تر تحت تاثیر قرار می‌دهد (هانین^۱ و همکاران، ۲۰۰۵: ۲؛ برونفمان^۲ و همکاران، ۲۰۱۹: ۱) که در صورت عدم توجه به آن می‌تواند با خسارات جانی و مالی زیادی همراه باشد. بر این اساس، نظارت بر میزان فرونشست زمین به منظور کاهش اثرات منفی و همچنین کنترل روند توسعه آن، بسیار حائز اهمیت خواهد بود و لازم است تا به طور مرتب روند فرونشست مناطق برآورد شود (یاستیکا^۳ و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۷۲۰). با توجه به اهمیت موضوع، در طی سال‌های اخیر مطالعات مختلفی در زمینه فرونشست صورت گرفته است و پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌های سنجش از دور سبب شده است تا پایش پدیده فرونشست برخلاف گذشته با دقت و سرعت بالاتری صورت گیرد. یکی از روش‌هایی که در طی سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته شده است، روش تداخل سنجی راداری است که دقت و سرعت بالایی در پردازش اطلاعات و پایش تغییرات سطح زمین دارد (اوپیت و همکاران، ۲۰۱۳: ۲۹۷۰)، بنابراین در این پژوهش از این روش برای پایش وضعیت فرونشست شهرهای واقع در دشت همدان - بهار استفاده شده است.

در مورد محاسبه فرونشست با استفاده از روش تداخل سنجی راداری تحقیقات مختلفی صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به متعق^۴ و همکاران (۲۰۰۷) اشاره کرد که میزان فرونشست سالانه زمین در دره‌شهر مشهد در طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ را بین ۲۸ تا ۳۰ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند. کانووا^۵ و همکاران (۲۰۱۲) میزان فرونشست شهرهای آگوستا، سیراکوسا، پریولو و ویلاسموندو را ۱۸، ۶ و ۵/۴ میلی‌متر در سال، هوانگ^۶ و همکاران (۲۰۱۶) حداکثر فرونشست سالانه در کالیفرنیا را ۱۸ سانتی‌متر در سال، نگوین هاو و تاکه‌واکا^۷ (۲۰۱۹) میزان فرونشست زمین در نام‌دینه^۸ را بین ۲۱- تا ۲/۵+ در سال و ژائو^۹ و همکاران (۲۰۱۹) میزان فرونشست در منطقه ساحلی شانگهای چین را ۳۰ میلی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. در ایران نیز روزبان و همکاران (۱۳۹۵) فرونشست زمین در دشت رفسنجان را حداکثر ۲۸ سانتی‌متری در سال، بابایی و همکاران (۱۳۹۶) میزان فرونشست در جنوب غربی شهر تهران را حدود ۶۱ میلی‌متر در سال، فخارزاده تربتی (۱۳۹۶) فرونشست دشت سبزوار را ۱۱/۷۷ سانتی‌متر در سال، صالحی متعهد و همکاران (۱۳۹۸) میزان فرونشست دشت مشهد را ۲۰ سانتی‌متر در سال و مقصودی و همکاران (۱۳۹۸) فرونشست سالانه دشت‌های تهران و شهریار را ۱۵ سانتی‌متر در سال برآورد کرده است. با توجه به مطالعات صورت گرفته، بخش زیادی از دشت‌های کشور خصوصاً دشت‌های مناطق خشک و نیمه خشک با مسئله فرونشست مواجه شده است. در این میان، دشت‌های غربی استان همدان نیز به دلیل قرار گرفتن در منطقه نیمه خشک، با این مخاطره مواجه هستند. در واقع، با توجه موقعیت جغرافیایی منطقه، این منطقه با کمبود آب‌های سطحی مواجه است و به همین دلیل میزان بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در این منطقه بسیار بیش‌تر از میزان تعدیه آن‌هاست. بنابراین روند برداشت بیش از حد از آب‌های زیرزمینی منطقه سبب شده است تا سطح آب‌های زیرزمینی این دشت‌ها در طی سال‌های اخیر با افت شدیدی مواجه باشد. افت سطح آب‌های زیرزمینی این دشت‌ها در طی چند سال اخیر نمود بیش‌تری داشته است، چرا که سبب ایجاد فروچاله‌ها و نشست‌های متعددی در دشت‌های استان همدان شده است که همین مسئله سبب شده است تا مخاطره فرونشست به عنوان مهم‌ترین مخاطره ژئومورفولوژی در دشت‌های استان همدان محسوب شود. با توجه به اینکه مخاطره فرونشست، اثرات منفی زیادی بر نواحی سکونتگاهی دارد، بنابراین در این پژوهش میزان فرونشست رخ داده در شهرهای واقع در غرب استان همدان ارزیابی شده است.

1 .Huanyin

2 .Bronfman

3 .Yastika

4 .Aobpaet

5 .Motagh

6 .Canova

7 .Hwang

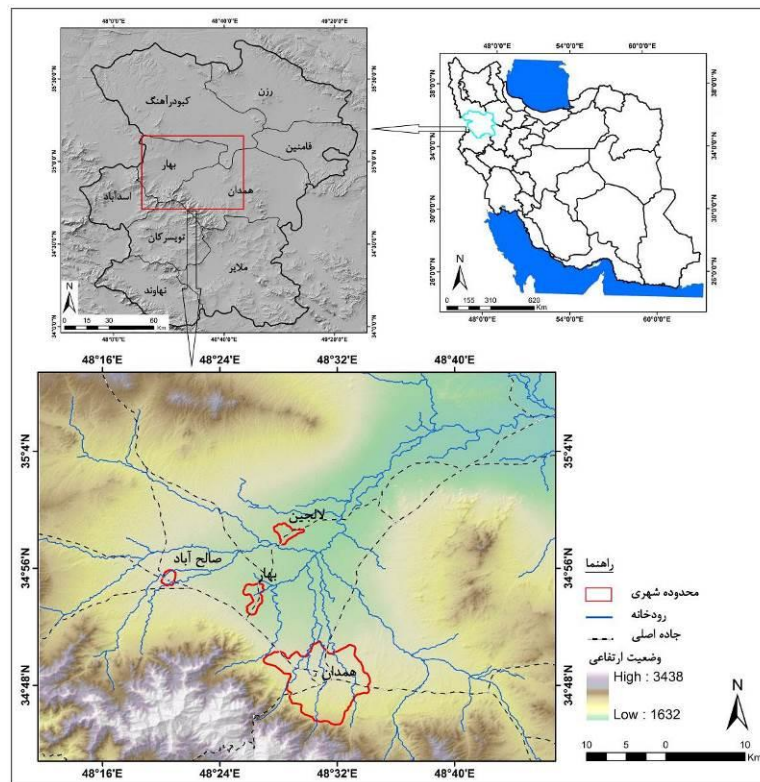
8 .Nguyen Hao & Takewaka

9 .Nam Dinh

1 .Zhao



منطقه مورد مطالعه: در این پژوهش شهرهای غربی استان همدان، واقع در دشت همدان-بهار به عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب شده است. دشت همدان-بهار از نظر تقسیمات سیاسی در استان همدان و در بین دو شهرستان همدان و بهار قرار دارد (شکل ۱). این دشت از نظر تقسیمات حوضه‌ای در بخش جنوبی حوضه آبریز قره‌چای واقع شده است. حوضه آبریز قره‌چای به عنوان یکی از زیرحوضه‌های دریاچه نمک محسوب می‌شود. مهم‌ترین سرشاخه‌های این حوضه در استان همدان شامل یلفان، آبشینه، صالح آباد، بهادر بیگ، تاسران، خمیگان، دمق، 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 از سمت جنوب به کوهستان الوند و از سمت شمال به دشت‌های کبودرآهنگ و فامنین منتهی می‌شود. این دشت از نظر وضعیت اقلیمی، جزء مناطق نیمه خشک محسوب می‌شود به طوری که میانگین دمای سالانه و مجموع بارش سالانه آن در طی دوره ۲۰ ساله (۱۳۷۸ تا ۱۳۹۸) به ترتیب ۱۲/۲ درجه سانتیگراد و ۳۱۳ میلی‌متر بوده است (سازمان هواشناسی استان همدان، ۱۳۹۹).



شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

در این تحقیق متناسب با اهداف مورد نظر از ۷۳ تصویر راداری سنتینل ۱ (استفاده از تصاویر سنتینل ۱ به دلیل پوشش کامل منطقه و قابلیت دسترسی به این تصاویر بوده است) در طی بازه زمانی ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴ (جدول ۱)، اطلاعات چاه‌های پیژومتری منطقه (مربوط به سازمان آب و منطقه‌ای استان همدان) و مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM به عنوان داده‌های تحقیق استفاده شده است. ابزارهای مهم تحقیق نیز شامل GMT (به منظور انجام روش تداخل سنجی راداری و سری زمانی SBAS) و ARCGIS (به منظور تهیه نقشه‌های مورد نظر) است. این تحقیق در ۲ مرحله کلی انجام شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

جدول ۱. مشخصات تصاویر مورد استفاده

پلاریزیشن	حالت مداری	نوع	تعداد تصویر	ماهواره
VV	نزولی	SLC	۷۳	سنتینل ۱

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 تداخل‌نگارها 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؛ 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 و پس از انجام پیش پردازش‌های لازم، بر مبنای بیس‌لاین زمانی، زوج تصاویر مورد نظر جهت تهیه نقشه‌های اینترفروگرام انتخاب شده است (جدول ۲). پیش از تهیه نقشه‌های اینترفروگرام، در نهایت با استفاده از روش سری زمانی، میزان فرونشست منطقه در طی بازه زمانی ۵ ساله محاسبه 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	۲۰۱۵/۰۳/۰۵ - 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
۷	۲۰۱۵/۰۷/۰۳ - ۲۰۱۵/۰۶/۰۹	۴۳	۲۰۱۸/۰۲/۱۷ - ۲۰۱۸/۰۱/۲۴
۸	۲۰۱۵/۰۷/۲۷ - ۲۰۱۵/۰۷/۰۳	۴۴	۲۰۱۸/۰۳/۱۳ - ۲۰۱۸/۰۲/۱۷
۹	۲۰۱۵/۰۸/۲۰ - ۲۰۱۵/۰۷/۲۷	۴۵	۲۰۱۸/۰۴/۰۶ - ۲۰۱۸/۰۳/۱۳
۱۰	۲۰۱۵/۰۹/۱۳ - ۲۰۱۵/۰۸/۲۰	۴۶	۲۰۱۸/۰۴/۳۰ - ۲۰۱۸/۰۴/۰۶
۱۱	۲۰۱۵/۱۱/۲۴ - ۲۰۱۵/۰۹/۱۳	۴۷	۲۰۱۸/۰۵/۲۴ - ۲۰۱۸/۰۴/۳۰
۱۲	۲۰۱۵/۱۲/۱۸ - ۲۰۱۵/۱۱/۲۴	۴۸	۲۰۱۸/۰۶/۱۷ - ۲۰۱۸/۰۵/۲۴
۱۳	۲۰۱۶/۰۱/۱۱ - ۲۰۱۵/۱۲/۱۸	۴۹	۲۰۱۸/۰۶/۱۷ - ۲۰۱۸/۰۶/۱۷

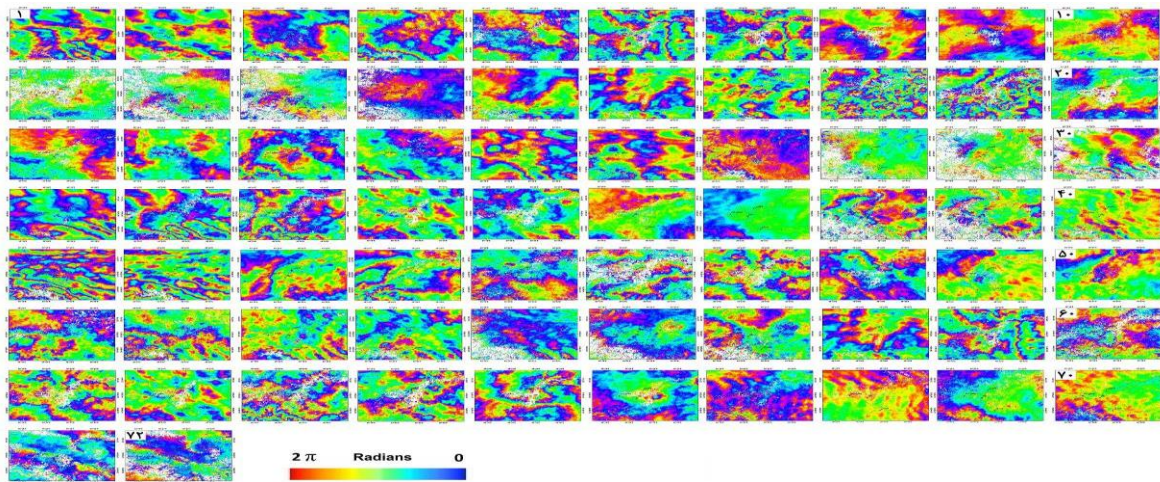


۲۰۱۸/۰۷/۱۱	-۲۰۱۸/۰۸/۰۴	۵۰	۲۰۱۶/۰۱/۱۱	-۲۰۱۶/۰۲/۰۴	۱۴
۲۰۱۸/۰۸/۰۴	-۲۰۱۸/۰۸/۲۸	۵۱	۲۰۱۶/۰۲/۰۴	-۲۰۱۶/۰۲/۲۸	۱۵
۲۰۱۸/۰۸/۲۸	-۲۰۱۸/۰۹/۲۱	۵۲	۲۰۱۶/۰۲/۲۸	-۲۰۱۶/۰۳/۲۳	۱۶
۲۰۱۸/۰۹/۲۱	-۲۰۱۸/۱۰/۱۵	۵۳	۲۰۱۶/۰۳/۲۳	-۲۰۱۶/۰۴/۱۶	۱۷
۲۰۱۸/۱۰/۱۵	-۲۰۱۸/۱۱/۰۸	۵۴	۲۰۱۶/۰۴/۱۶	-۲۰۱۶/۰۵/۱۰	۱۸
۲۰۱۸/۱۱/۰۸	-۲۰۱۸/۱۲/۰۲	۵۵	۲۰۱۶/۰۵/۱۰	-۲۰۱۶/۰۶/۰۳	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

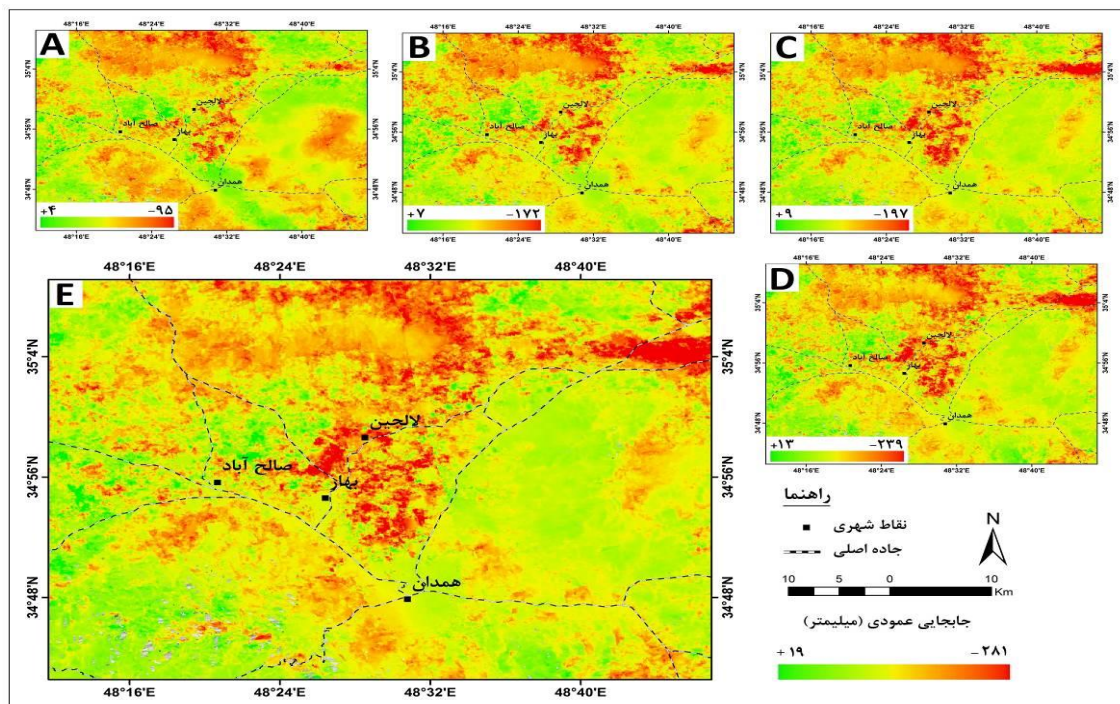
مرحله دوم (ارزیابی میزان افت سالانه آب زیرزمینی منطقه): در این مرحله به منظور ارزیابی میزان افت سالانه آب زیرزمینی منطقه، ابتدا اطلاعات مربوط به ۲۵ چاه پیژومتری (در این پژوهش از چاه‌های استفاده شده که اطلاعات مربوط به آن‌ها کامل و مربوط به دوره زمانی ۲۰ بوده است) واقع در محدوده مطالعاتی در بازه زمانی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵ تهیه شده است. پس از تهیه اطلاعات، ابتدا میانگین افت سالانه هر چاه محاسبه شده است، سپس با استفاده از روش درونیابی اسپلاین (Spline Interpolation)، نقشه افت سالانه آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه تهیه شده است. در ادامه به منظور ارزیابی رابطه بین فرونشست و افت منابع آب زیرزمینی، از روش همبستگی استفاده شده و به این صورت تاثیر افت منابع آب زیرزمینی بر فرونشست رخ داده ارزیابی شده است.

بحث و نتایج

محاسبه میزان فرونشست منطقه: در این تحقیق پس از تهیه تصاویر، ابتدا پیش پردازش‌های لازم بر روی تصاویر انجام شده است و پس از انتخاب زوج تصاویر مورد نظر، از طریق نرم‌افزار GMT در سیستم عامل LINUX، نقشه‌های اینترفروگرام مورد نظر تهیه شده است (شکل ۲). پس از تهیه نقشه‌های اینترفروگرام، با استفاده از روش سری زمانی SBAS نقشه میزان جابجایی عمودی منطقه در طی بازه زمانی ۵ ساله (از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴) تهیه شده است (شکل ۳). با توجه اینکه در این پژوهش میزان فرونشست شهرهای واقع در محدوده مد نظر است، در ادامه به تشریح فرونشست رخ داده در این شهرها پرداخته شده است.



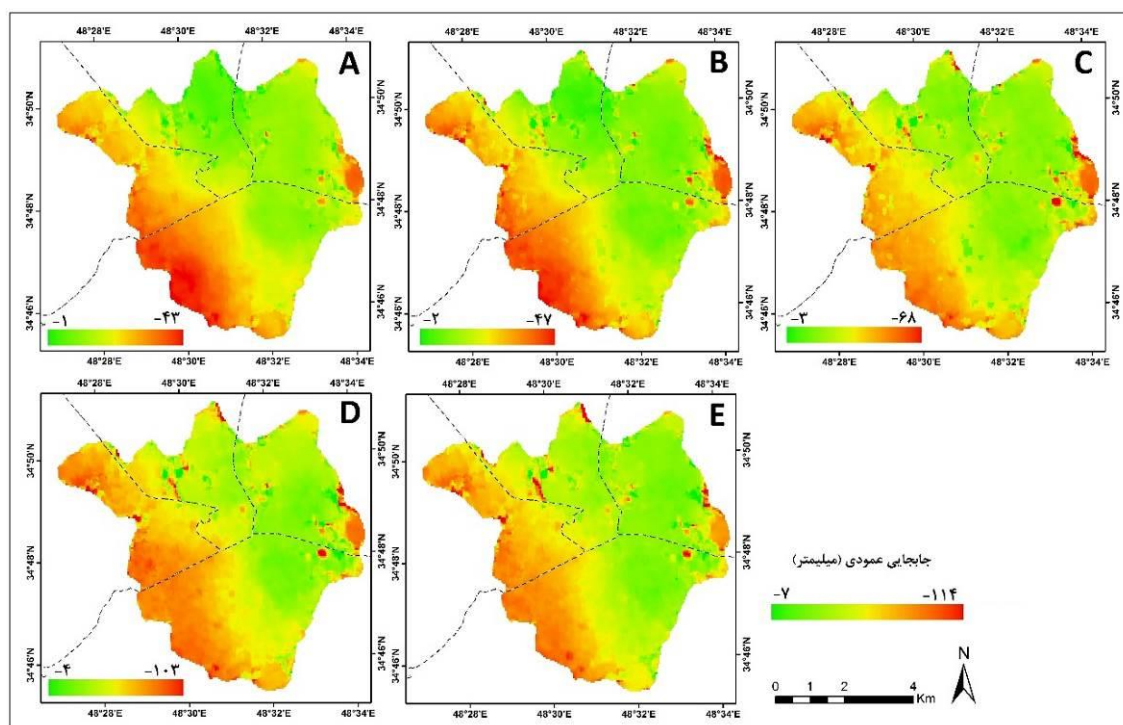
شکل ۲: نقشه های اینترفروگرام منطقه مورد مطالعه



شکل ۳: نقشه میزان فرونشست منطقه بر حسب میلی متر (A) از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۶/۰۱/۱۱ (B) ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۶/۰۱/۱۱ (C) ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۸/۰۱/۲۴ (D) ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۹/۰۱/۱۹ (E) ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴

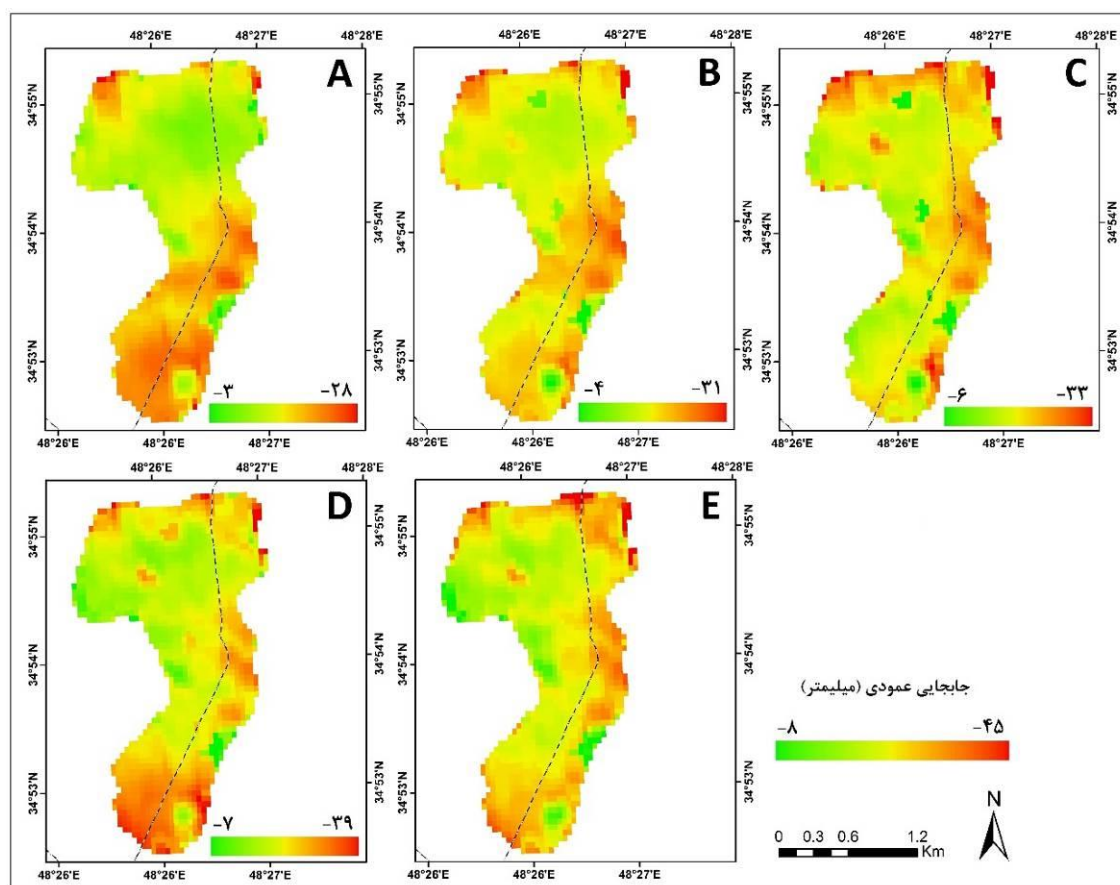
ارزیابی روند فرونشست در محدوده شهری همدان: نتایج بررسی وضعیت فرونشست در محدوده شهری همدان بیانگر این است که میزان فرونشست در مناطق مختلف شهر متفاوت است و یک روند مشخص ندارد. بر اساس نتایج بدست آمده، شهر همدان در بازه زمانی اول (از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۶/۰۱/۱۱)، بین ۱ تا ۴۳ میلی متر فرونشست داشت است. در بازه زمانی دوم (از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۷/۰۱/۰۵)، بین ۲ تا ۴۷ میلی متر فرونشست داشته است. در بازه زمانی سوم (از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۸/۰۱/۲۴) بین ۳ تا ۶۸ میلی متر فرونشست داشته است. در بازه چهارم (از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۹/۰۱/۱۹) بین ۴ تا ۱۰۳ میلی-

متر و در بازه زمانی پنجم نیز (از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴) بین ۷ تا ۱۱۴ میلی‌متر فرونشست داشته است (شکل ۴). با توجه به موارد مذکور می‌توان گفت که میانگین سالانه فرونشست در محدوده شهری همدان حدود ۲۳ میلی‌متر است. بررسی وضعیت مکانی فرونشست در محدوده شهری همدان بیانگر این است که بیش‌ترین میزان فرونشست مربوط به نواحی غربی، شرقی و جنوبی این شهر و کم‌ترین میزان آن نیز مربوط به مناطق مرکزی شهر است. با توجه به اینکه بیش‌تر ساخت و سازهای سال‌های اخیر شهر همدان در مناطق حاشیه‌ای بوده است، بنابراین می‌توان گفت که روند توسعه ساخت و سازها و فشار ناشی از وزن نیز از عوامل تاثیرگذار در این میزان فرونشست بوده است.



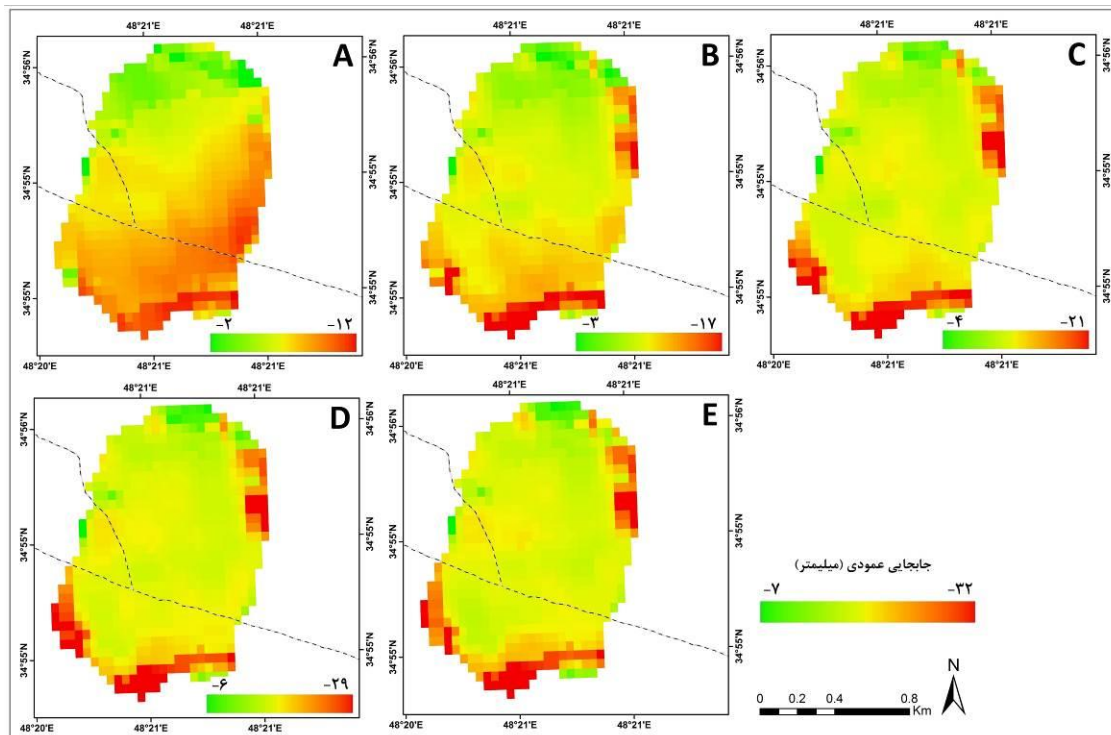
شکل ۴: نقشه میزان فرونشست محدوده شهری همدان بر حسب میلی‌متر (A) از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۶/۰۱/۱۱ (B) ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ (C) ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۹/۰۱/۱۹ (D) ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴ (E)

ارزیابی روند فرونشست در محدوده شهری بهار: نتایج بررسی وضعیت فرونشست شهر بهار بیانگر این است که این شهر نیز با فرونشست قابل توجهی مواجه شده است به طوری که در بازه زمانی اول، بین ۳ تا ۲۸ میلی‌متر فرونشست داشت است. در بازه زمانی دوم، بین ۴ تا ۳۱ میلی‌متر فرونشست داشته است. در بازه زمانی سوم بین ۶ تا ۳۳ میلی‌متر فرونشست داشته است. در بازه چهارم بین ۷ تا ۳۹ میلی‌متر و در بازه زمانی پنجم نیز بین ۸ تا ۴۵ میلی‌متر فرونشست داشته است (شکل ۵). با توجه به موارد مذکور، می‌توان گفت که میانگین سالانه فرونشست در این محدوده حدود ۹ میلی‌متر بوده است. نتایج بررسی وضعیت مکانی فرونشست نیز بیانگر این است که بیش‌ترین میزان فرونشست محدوده شهری بهار، در مناطق جنوبی این شهر بوده است. با توجه به اینکه، مناطق جنوبی شهر بهار با افت منابع آب زیرزمینی مواجه شده و همچنین با روند توسعه نواحی سکونتگاهی مواجه شده است، بنابراین می‌توان فرونشست رخ داده را به عوامل مذکور نسبت داد.



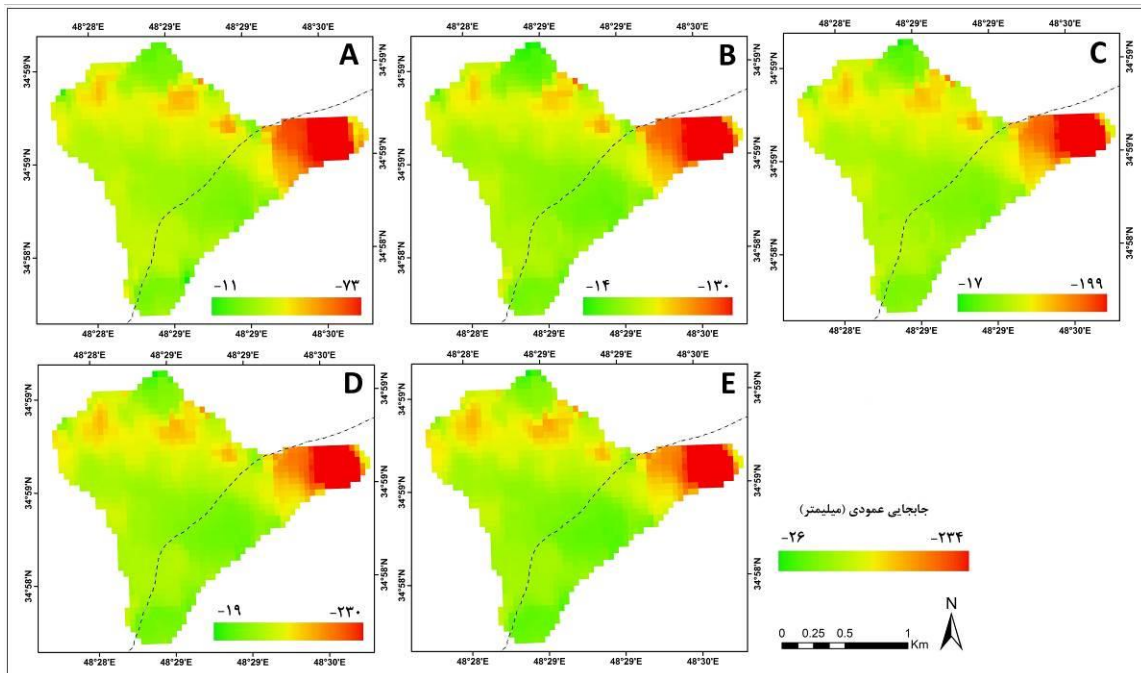
شکل ۵: نقشه میزان فرونشست محدوده شهری صالح آباد بهار بر حسب میلی‌متر (A) از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۶/۰۱/۱۱ (B) تا ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۶/۰۱/۱۹ (C) تا ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ (D) تا ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۸/۰۱/۲۴ (E) و ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴

ارزیابی روند فرونشست در محدوده شهری صالح‌آباد: نتایج بررسی وضعیت فرونشست شهر صالح‌آباد بیانگر این است که این شهر با فرونشست کم‌تری مواجه شده است به طوری که میانگین سالانه فرونشست در محدوده این شهر حدود ۶ میلی‌متر بوده است. بر اساس نتایج بدست آمده، در بازه زمانی اول، بین ۲ تا ۱۲ میلی‌متر فرونشست داشت است. در بازه زمانی دوم، بین ۳ تا ۱۷ میلی‌متر فرونشست داشته است. در بازه زمانی سوم بین ۴ تا ۲۱ میلی‌متر فرونشست داشته است. در بازه چهارم بین ۶ تا ۲۹ میلی‌متر و در بازه زمانی پنجم نیز بین ۷ تا ۳۲ میلی‌متر فرونشست داشته است (شکل ۶). بر اساس نقشه فرونشست منطقه، بیش‌ترین میزان فرونشست رخ داده در محدوده شهری صالح‌آباد، مربوط به مناطق جنوبی این شهر بوده است. با توجه به اینکه، میزان افت منابع آب زیرزمینی در محدوده شهر صالح‌آباد، کم‌تر از سایر شهرها بوده است، بنابراین فرونشست رخ داده در این منطقه نیز کم‌تر بوده است. بر این اساس می‌توان گفت که شهر صالح‌آباد نسبت به سایر شهرها کم‌تر در معرض مخاطره فرونشست قرار دارد و فرونشست رخ داده علاوه بر افت کم آب‌های زیرزمینی در این منطقه، ناشی از عوامل انسانی از جمله توسعه ساخت و سازها بوده است.



شکل ۶: نقشه میزان فرونشست محدوده شهری صالح‌آباد بر حسب میلی‌متر (A) از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۶/۰۱/۱۱ (B) تا ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ (C) تا ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۸/۰۱/۲۴ (D) تا ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۹/۰۱/۱۹ (E) و ۲۰۲۰/۰۱/۱۴ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴

ارزیابی روند فرونشست در محدوده شهری لالجین: قرارگرفتن شهر لالجین در مناطق مرکزی دشت همدان-بهار سبب شده است تا این شهر نسبت به سایر شهرها، دارای فرونشست بیش‌تری باشد، به طوری که میانگین سالانه فرونشست در این شهر حدود ۴۷ میلی‌متر بوده است. بر اساس نتایج بدست آمده، در بازه زمانی اول، بین ۱۱ تا ۷۳ میلی‌متر فرونشست داشت است. در بازه زمانی دوم، بین ۱۴ تا ۱۳۰ میلی‌متر فرونشست داشته است. در بازه زمانی سوم بین ۱۷ تا ۱۹۹ میلی‌متر فرونشست داشته است. در بازه چهارم بین ۱۹ تا ۲۳۰ میلی‌متر و در بازه زمانی پنجم نیز بین ۲۶ تا ۲۳۴ میلی‌متر فرونشست داشته است (شکل ۷). بر اساس نقشه فرونشست منطقه، بیش‌ترین میزان فرونشست رخ داده در مناطق شرقی این شهر بوده است. با توجه به اینکه شهر لالجین در مناطق با افت بالای منابع آب زیرزمینی قرار دارد، بنابراین عامل اصلی فرونشست رخ داده در این شهر نیز افت منابع آب زیرزمینی بوده است، همچنین با توجه به اینکه در طی سال‌های اخیر، مناطق شرقی شهر لالجین با توسعه فیزیکی نواحی انسان ساخت مواجه شده است، بنابراین میتوان گفت که ساخت و سازها نیز نقش تشدید کننده در فرونشست رخ داده داشته‌اند.

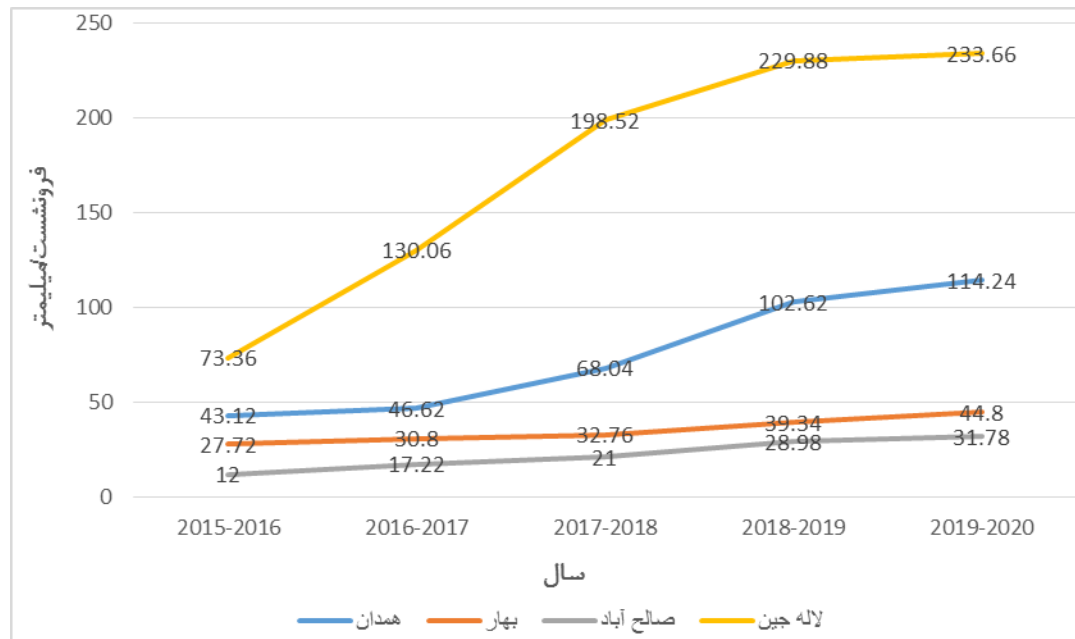


شکل ۷: نقشه میزان فرونشست محدوده شهری لالچین بر حسب میلی‌متر (A) از تاریخ ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ (B) ۲۰۱۶/۰۱/۱۱ تا ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ (C) ۲۰۱۷/۰۱/۰۵ تا ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ (D) ۲۰۱۸/۰۱/۲۴ تا ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ (E) ۲۰۱۹/۰۱/۱۹ تا ۲۰۱۵/۰۱/۱۶ و ۲۰۲۰/۰۱/۱۴ تا ۲۰۱۵/۰۱/۱۶

در جدول ۳ و شکل ۸ روند زمانی فرونشست در شهرهای مورد مطالعه نشان داده شده است که بر اساس آن، شهر لالچین دارای بیشترین میزان فرونشست و شهر صالح‌آباد دارای کمترین میزان فرونشست بوده است. با توجه به ارزیابی‌های صورت گرفته، عامل اصلی فرونشست رخ داده، افت منابع آب زیرزمینی بوده است که این مسئله توسط ساخت و سازهای صورت گرفته تشدید شده است.

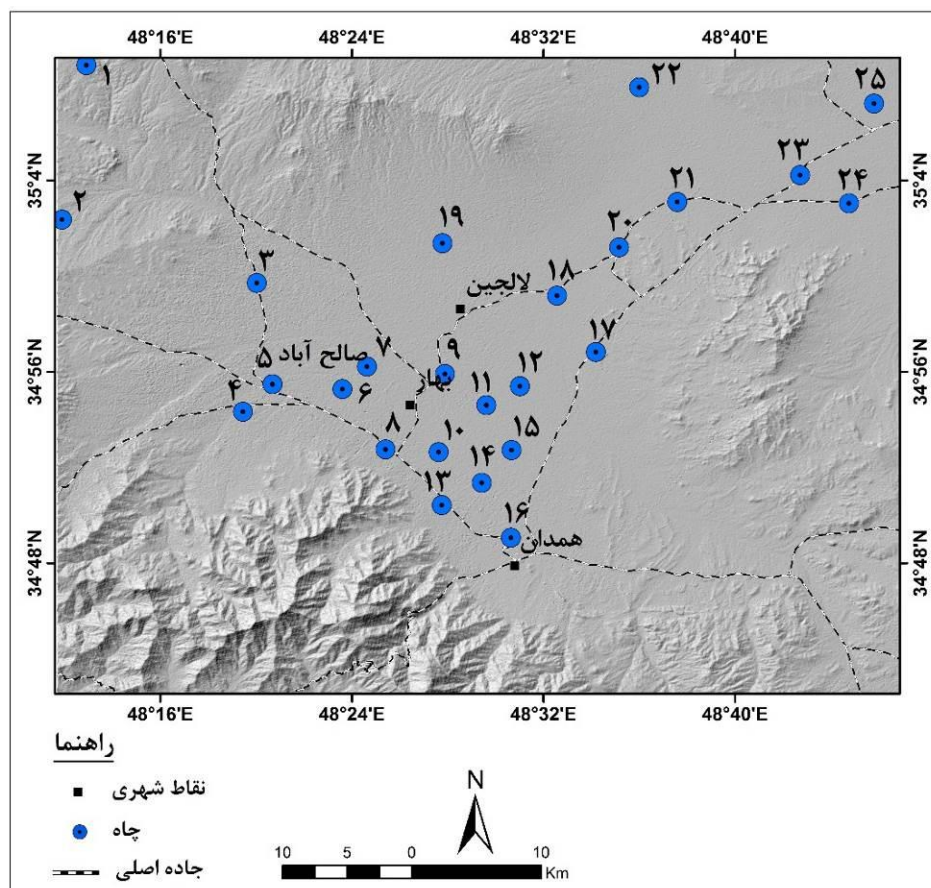
جدول ۳: روند سالانه فرونشست در شهرهای مورد مطالعه

شهر	دوره زمانی	حداقل	حداکثر
همدان	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۶/۰۱/۱۱	-۱	-۴۳
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۷/۰۱/۰۵	-۲	-۴۷
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۸/۰۱/۲۴	-۳	-۶۸
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۹/۰۱/۱۹	-۴	-۱۰۳
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴	-۷	-۱۱۴
بهار	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۶/۰۱/۱۱	-۳	-۲۸
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۷/۰۱/۰۵	-۴	-۳۱
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۸/۰۱/۲۴	-۶	-۳۳
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۹/۰۱/۱۹	-۷	-۳۹
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴	-۸	-۴۵
صالح‌آباد	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۶/۰۱/۱۱	-۲	-۱۲
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۷/۰۱/۰۵	-۳	-۱۷
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۸/۰۱/۲۴	-۴	-۲۱
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۹/۰۱/۱۹	-۶	-۲۹
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴	-۷	-۳۲
لالچین	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۶/۰۱/۱۱	-۱۱	-۷۳
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۷/۰۱/۰۵	-۱۴	-۱۳۰
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۸/۰۱/۲۴	-۱۷	-۱۹۹
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۹/۰۱/۱۹	-۱۹	-۲۳۰
	۲۰۱۵/۰۱/۱۶ تا ۲۰۲۰/۰۱/۱۴	-۲۶	-۲۳۴



شکل ۸: نمودار روند سالانه فرونشست در شهرهای مورد مطالعه

بررسی وضعیت افت سطح آب‌های زیرزمینی منطقه: در طی سال‌های اخیر، روند افزایشی جمعیت و بهره‌برداری‌های گسترده، تاثیر زیادی در افت منابع آب زیرزمینی داشته است (اصغری مقدم ۱۳۹۶: ۵۸؛ جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۴۷). دشت همدان-بهار با توجه به وضعیت ژئومورفولوژی که دارد، تحت تاثیر کاربری اراضی کشاورزی قرار دارد. در واقع، شیب مناسب و نبود موانع محدود کننده سبب شده است تا اراضی کشاورزی آبی در این دشت با توسعه زیادی همراه باشد. همچنین با توجه به اینکه دشت همدان-بهار از نظر اقلیمی در منطقه نیمه خشک قرار دارد و با کمبود منابع آب سطحی مواجه است، بنابراین میزان وابستگی به منابع آب زیرزمینی و برداشت از آن‌ها بسیار زیاد خواهد بود، که همین مسئله سبب افت منابع آب زیرزمینی در منطقه شده است. با توجه به اینکه یکی از عوامل موثر در ایجاد فرونشست، افت سطح آب‌های زیرزمینی است، در این پژوهش از اطلاعات مربوط به ۲۵ چاه پیزومتری (بازه‌های آماری چاه‌ها مربوط به سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵) واقع در محدوده مطالعاتی استفاده شده است (شکل ۹). بررسی وضعیت میزان افت سطح آب در چاه‌های مورد مطالعه بیانگر این است که این چاه‌ها با افت سطح آب زیادی مواجه شده‌اند، به طوری میانگین افت سالانه چاه‌ها بین ۱۰۰ تا ۲۰۷۰ میلی‌متر محاسبه شده است (جدول ۴). بر اساس نتایج بدست آمده، در بین چاه‌های مورد مطالعه چاه شماره ۹ با میانگین افت سالانه ۲۰۷۰، دارای بالاترین افت است و بعد از آن نیز چاه‌های شماره ۷ و ۱۲ به ترتیب با ۱۷۲۰ و ۱۶۲۰ میلی‌متر، دارای بالاترین میانگین افت سالانه هستند.



شکل ۹: موقعیت چاه‌های مورد بررسی (منبع: سازمان آب و منطقه‌ای استان همدان)

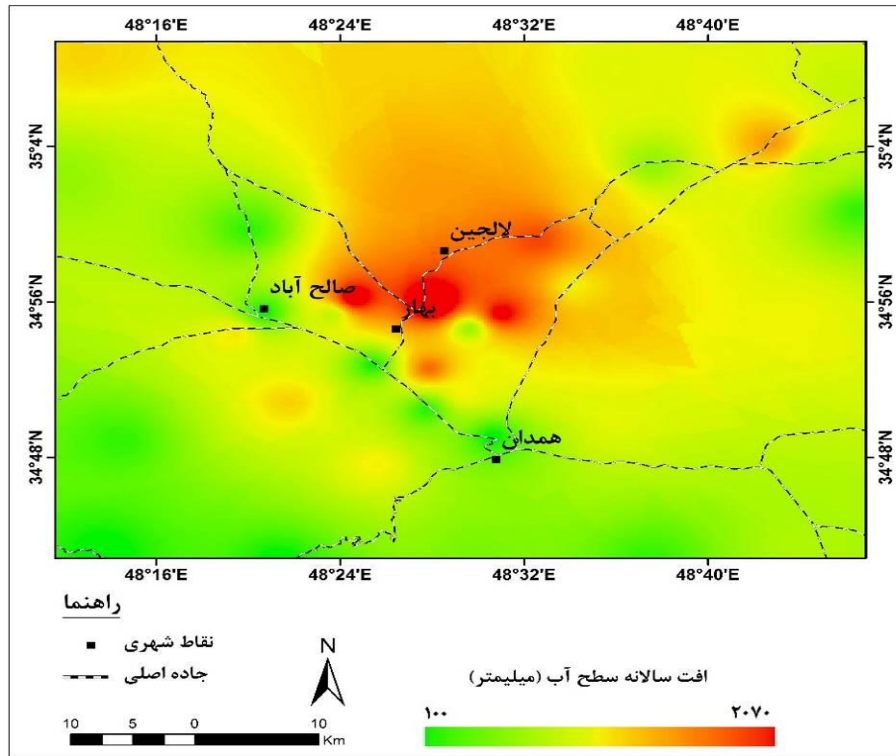
جدول ۴: میانگین افت سالانه چاه‌های مورد مطالعه بر حسب میلی‌متر (منبع: سازمان آب و منطقه‌ای استان همدان)

شماره چاه	میانگین افت سالانه	شماره چاه	میانگین افت سالانه	شماره چاه	میانگین افت سالانه
۱	۹۰۰	۱۰	۱۲۷۰	۱۹	۱۱۰۰
۲	۴۰۰	۱۱	۴۵۰	۲۰	۹۰۰
۳	۲۰۰	۱۲	۱۶۲۰	۲۱	۴۰۰
۴	۲۰۰	۱۳	۱۰۰	۲۲	۷۰۰
۵	۱۰۰	۱۴	۷۸۰	۲۳	۱۱۰۰
۶	۵۸۰	۱۵	۷۵۰	۲۴	۵۳۰
۷	۱۷۲۰	۱۶	۱۰۰	۲۵	۵۹۰
۸	۱۰۰	۱۷	۸۰۰	-	-
۹	۲۰۷۰	۱۸	۱۴۰۰	-	-

با توجه به نتایج حاصله از محاسبه افت سطح آب در چاه‌های مورد مطالعه، در این پژوهش با استفاده از روش درونیابی اسپلاین (Spline Interpolation)، نقشه افت سالانه آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه تهیه شده است (شکل ۱۰) که بر اساس آن مناطق میانی محدوده مطالعاتی دارای بالاترین میانگین افت سالانه سطح آب زیرزمینی هستند. بررسی وضعیت فرونشست منطقه و همچنین وضعیت افت سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه بیانگر این است که مناطق دارای افت سطح آب زیرزمینی، با فرونشست نیز مواجه شده‌اند. با توجه به اهمیت موضوع و همچنین به دلیل بررسی رابطه بین افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست، در این بخش



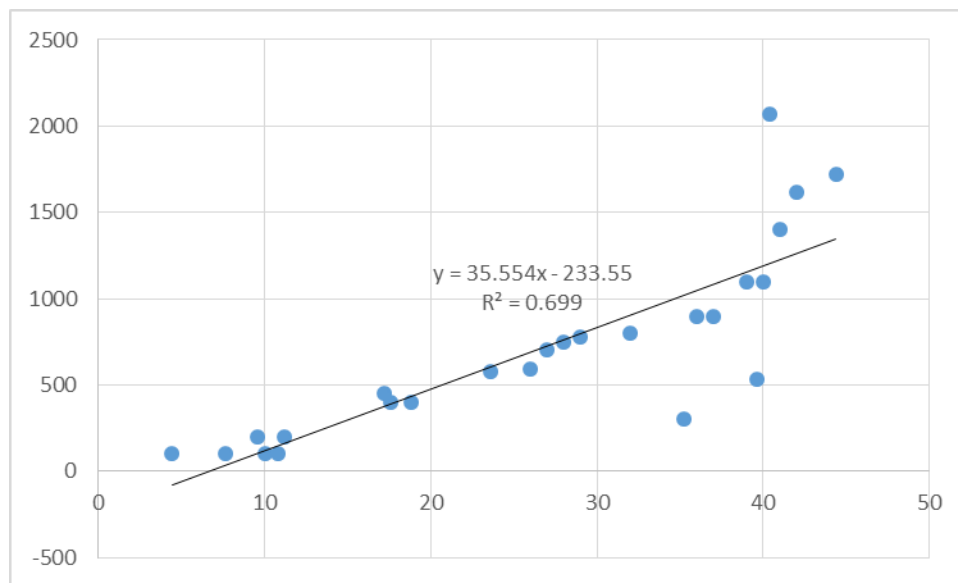
همبستگی بین میانگین سالانه افت سطح آب زیرزمینی و میزان فرونشست (میزان فرونشست در نقطه‌ای که چاه وجود دارد محاسبه شده است) ارزیابی شده است (جدول ۵) که نتایج حاصله بیانگر این است که ضریب همبستگی بین آن‌ها حدود ۰/۷ می‌باشد (شکل ۱۱). نتیجه همبستگی بیانگر رابطه معنادار بین میزان افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست منطقه است که بر این اساس می‌توان گفت، عامل اصلی در پدیده فرونشست منطقه، افت سطح آب‌های زیرزمینی است.



شکل ۱۰: نقشه درون‌یابی میانگین سالانه افت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

جدول ۵: بررسی رابطه بین میزان فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مورد مطالعه

میانگین سالانه فرونشست	میزان فرونشست در بازه ۵ ساله	میانگین افت سالانه سطح آب	شماره چاه	میانگین سالانه فرونشست	میزان فرونشست در بازه ۵ ساله	میانگین افت سالانه سطح آب	شماره چاه
۲۴/۴	۱۲۲	۷۸۰	۱۴	۲۴/۴	۱۲۲	۹۰۰	۱
۴۰/۸	۲۰۴	۷۵۰	۱۵	۱۸/۸	۹۴	۴۰۰	۲
۴/۴	۲۲	۱۰۰	۱۶	۹/۶	۴۸	۲۰۰	۳
۲۶	۱۳۰	۸۰۰	۱۷	۱۱/۲	۵۶	۲۰۰	۴
۳۹/۲	۱۹۶	۱۴۰۰	۱۸	۷/۶	۳۸	۱۰۰	۵
۳۸	۱۹۰	۱۱۰۰	۱۹	۲۳/۶	۱۱۸	۵۸۰	۶
۳۷/۶	۱۳۸	۹۰۰	۲۰	۴۴/۴	۲۲۲	۱۷۲۰	۷
۱۷/۶	۸۸	۴۰۰	۲۱	۱۰	۵۰	۱۰۰	۸
۳۵/۲	۱۷۶	۷۰۰	۲۲	۴۰/۴	۲۰۲	۲۰۷۰	۹
۴۲/۴	۲۱۲	۱۱۰۰	۲۳	۳۵/۲	۱۷۶	۱۲۷۰	۱۰
۳۹/۶	۱۹۸	۵۳۰	۲۴	۱۷/۲	۸۶	۴۵۰	۱۱
۴۰/۴	۲۰۲	۵۹۰	۲۵	۴۲	۲۱۰	۱۶۲۰	۱۲
-	-	-	-	۱۰/۸	۵۴	۱۰۰	۱۳



شکل ۱۱: نمودار همبستگی بین میزان فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از ارزیابی میزان فرونشست منطقه بیانگر این است که دشت همدان-بهار مانند بسیاری از دشت‌های ایران از جمله دشت یزد (آمیغ پی و همکاران، ۱۳۸۸)، دشت نوق-بهرمان (شریفی‌کیا، ۱۳۹۱) و دشت کرج-شهریار (صفاری و همکاران، ۱۳۹۵) با فرونشست قابل توجهی مواجه شده است، به طوری که ماکزیمم فرونشست این دشت در طی دوره زمانی ۵ ساله ۲۸۱ میلی‌متر بوده است. فرونشست رخ داده در این دشت، شهرهای واقع در منطقه را نیز دربرگرفته است. بر اساس نتایج بدست آمده، بیش‌ترین میزان فرونشست در محدوده شهری لالچین رخ داده است، به طوری که این محدوده در طی بازه زمانی ۵ ساله (۲۰۱۵/۰۱/۱۶) تا (۲۰۲۰/۰۱/۱۴) بین ۲۶ تا ۲۳۴ میلی‌متر فرونشست داشته است، بر این اساس میانگین سالانه فرونشست در این محدوده حدود ۴۷ میلی‌متر بوده است. محدوده‌های شهری همدان، بهار و صالح آباد نیز در طی بازه زمانی ۵ ساله به ترتیب ۷ تا ۱۱۴ میلی‌متر (میانگین سالانه ۲۳ میلی‌متر)، ۸ تا ۴۵ میلی‌متر (میانگین سالانه ۹ میلی‌متر) و ۷ تا ۳۲ میلی‌متر (میانگین سالانه ۶ میلی‌متر) فرونشست داشته است. همچنین در این پژوهش وضعیت افت منابع آب زیرزمینی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. نتایج حاصله بیانگر این است که میانگین افت سالانه چاه‌های منطقه بین ۱۰۰ تا ۲۰۷۰ میلی‌متر بوده که بیش‌ترین میزان افت در مناطق میانی محدوده مطالعاتی رخ داده است و با توجه به اینکه در این منطقه، بیش‌ترین میزان فرونشست نیز رخ داده است، بین فرونشست زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی رابطه معناداری (همبستگی ۰/۷) وجود دارد. در واقع، بررسی وضعیت فرونشست شهرها در ارتباط با افت منابع آب زیرزمینی بیانگر این است که شهر لالچین به دلیل قرار گرفتن در مناطق میانی محدوده و بالا بودن نرخ سالانه افت آب زیرزمینی، دارای بیش‌ترین میزان فرونشست بوده است. همچنین نتایج ارزیابی‌ها نشان داده است که علاوه بر افت منابع آب زیرزمینی، ساخت و سازها نیز در افزایش میزان فرونشست نقش داشته‌اند، به طوری که شهر همدان نسبت به شهر بهار با افت آب زیرزمینی کم‌تری مواجه شده است، اما فرونشست بیش‌تری داشته است. با توجه به اینکه بیش‌ترین میزان فرونشست رخ داده در مناطق غربی، جنوبی و شرقی محدوده شهری همدان بوده است و این مناطق در طی سال‌های اخیر با توسعه فیزیکی زیادی مواجه شده است، بنابراین می‌توان گفت که علاوه بر افت آب زیرزمینی، توسعه ساخت و سازها نیز نقش مهمی در میزان فرونشست این شهر داشته است.



منابع

- اصغری مقدم، اصغر؛ قره‌خانی، مریم؛ ندیری، عطالله؛ کرد، مهدی؛ فیجانی، الهام (۱۳۹۶)، ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت اردبیل با استفاده از روش‌های SINTACS، DRATIC و SI، *نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی*، دوره ۲۱، شماره ۶۱، صص ۷۴-۵۷
- آمیغ‌پی، معصومه؛ عربی، سیاوش؛ طالبی، علی (۱۳۸۸)، بررسی فرورفتگی یزد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و ترازابی دقیق، *مجله علوم زمین*، سال ۲۰، شماره ۷۷، صص ۱۶۴-۱۵۷
- بابایی، سیدسازان؛ خزایی، صفا؛ قاصدمبارکه، فروزان (۱۳۹۶)، پردازش سری زمانی تداخل سنجی تصاویر راداری COSMO-SkyMed به منظور محاسبه نرخ فرورفتگی در محدوده سازه‌های زمینی و زیرزمینی در شهر تهران، *نشریه علوم و فنون نقشه برداری*، بازه ۷، شماره ۱، صص ۶۷-۵۵
- جعفرزاده، جعفر؛ رستم‌زاده، هاشم؛ نیک‌جو، محمدرضا؛ اسدی، اسماعیل (۱۳۹۶)، ارزیابی پتانسیل منابع آب دشت اردبیل با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای فازی (FANP) در محیط در محیط GIS، *نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی*، دوره ۲۱، شماره ۶۱، صص ۱۶۴-۱۴۵
- خدابخش، سعید؛ محسنی، حسن؛ حسام‌زاده، مژگان؛ مهاجروطن، ملیحه؛ کرم‌الهی، لیلا (۱۳۹۲)، بررسی سرشاخه‌های باختری رودخانه قره‌چای براساس نوع رودخانه و رخساره‌های رسوبی، *مجله رسوب‌شناسی کاربردی*، بازه ۱، شماره ۱، صص ۷۱-۸۶
- روزبان، علی؛ اسماعیلی، علی؛ معتق، مهدی (۱۳۹۵)، بررسی فرورفتگی زمین با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (DInSAR) و با به کارگیری تصاویر سنجنده SENTINEL، *دومین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی*، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
- سازمان هواشناسی استان همدان (۱۳۹۹)، گزارش بررسی وضعیت عناصر اقلیمی دشت همدان-بهار
- شریفی کیا، محمد (۱۳۹۱)، تعیین میزان فرورفتگی زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق-بهرمان، *مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، بازه ۱۶، شماره ۳، صص ۷۷-۵۵
- صالحی متعهد، فهیمه؛ حافظی مقدس، ناصر؛ لشکری پور، غلامرضا؛ دهقانی، مریم (۱۳۹۸)، ارزیابی فرورفتگی 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 ۴۶۳-۴۳۵
- صفاری، امیر؛ جعفری، فرهاد (۱۳۹۵)، سنجش مقدار و پهنه‌بندی خطر فرورفتگی زمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت کرج - شهریار)، *فصلنامه علمی - پژوهشی و بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران*، سال ۴، شماره ۴۸، صص ۱۷۵-۱۸۸
- فخارزاده تربتی، امیررضا (۱۳۹۶)، بررسی و ارزیابی فرورفتگی دشت سبزواری با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری InSAR و مقایسه آن با داده‌های GPS، *پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، دانشکده فنی و مهندسی*
- مقصودی، یاسر؛ امانی، رضا؛ احمدی، حسن (۱۳۹۸)، بررسی رفتار فرورفتگی زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل ۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی، *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، سال ۱۵، شماره ۱، صص ۲۹۹-۳۱۳
- نصیری خانقاه، علیرضا؛ شریفیان عطار، رضا (۱۳۹۸)، *کاربرد تداخل سنجی رادار در مطالعه فرورفتگی*، انتشارات مهر جالینوس، ۲۹۴ صفحه.

- Aobpaet, A., Miguel, C. C., Andrew, H & Itthi, T. (2013). InSAR timeseries analysis of land subsidence in Bangkok, Thailand, *Int. J. Remote Sens.*, 34, 2969-2982.
- Bronfman, N. C., Cisternas, P. C., Repetto, P .B & Castañeda, J. V. (2019). Natural disaster preparedness in a multi-hazard environment: Characterizing the sociodemographic profile of those better (worse) prepared, *PLoS One*, v.14(4); PMC6481794.
- Canova, F., Tolomei, C., Salvi, S., Toscani, G., & Seno, S. (2012). Land subsidence along the ionian coast of SE Sicily (Italy), detection and analysis via Small Baseline Subset (SBAS) multitemporal differential SAR interferometry. *Earth Surf. Process. Landforms* 37, 273–286. doi: 10.1002/esp.2238.
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Dordrecht. Kluwer Academic Publishers.
- Huanyin, Y., Hanssen, R & Leijen, F. (2005). *Marinkovicand, Land Subsidence Monitoring in City Area by Time Series Interferometric SAR Data*, National Natural Science Foundation of China (40301032), KGW Project Report.
- Hwang, C., Yang, Y., Kao, R., Han, J., Hung, W.C., Cheng, S & Li, F. (2016). Time-varying land subsidence detected by radar altimetry: California, Taiwan and north China, *Scientific Reports* | 6:28160 | DOI: 10.1038/srep28160.
- Motagh, M. (2007). Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International*, 168(2): p. 518-526.
- 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.
- Yastika, P.E., Shimizu, N & Abidin, H. Z. (2019). Monitoring of long-term land subsidence from 2003 to 2017 in coastal area of Semarang, Indonesia by SBAS DInSAR analyses using Envisat-ASAR, ALOS-PALSAR, and Sentinel-1A SAR data. *Adv. Space Res.*, 63, 1719–1736.
- 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*.