

ارزیابی و تحلیل فرونشست در دشت هشتگرد

اکبر رستمی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان.
مژگان انتظاری* - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان.
رضا ذاکری‌نژاد - استادیار جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۲ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶

چکیده

یکی از پیامدهای فاجعه‌بار افزایش کسری آبخوان‌ها، پدیده فرونشست زمین است که طی سال‌های اخیر در بسیاری از دشت‌های ایران روندی افزایشی داشته است و به‌طور نگران‌کننده‌ای در حال گسترش است. مشابه بسیاری از مناطق ایران، دشت‌های جنوبی البرز با فرونشست سریع زمین مواجه شده‌اند که می‌تواند ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی باشد. در این پژوهش سعی شده میزان فرونشست در محدوده شهری هشتگرد ارزیابی گردد. روش اصلی تحقیق، روش تداخل‌سنجی راداری و سری زمانی SBAS است. پس از تهیه نقشه میزان افت سالانه آب زیرزمینی منطقه، میزان فرونشست در مناطق مختلف اندازه‌گیری و ارتباط آن با وضعیت کاربری اراضی و پیش‌روی نواحی سکونتگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه همبستگی بین نرخ فرونشست با میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی منطقه مورد ارزیابی قرار گرفته است و نهایتاً با استفاده از مدل تلفیقی منطق فازی و AHP به شناسایی مناطق مستعد وقوع فرونشست پرداخته شده است. نبود موانع ژئومورفولوژیکی در هشتگرد باعث شده است که توسعه سکونتگاهی و کشاورزی در این منطقه با محدودیت زیادی روبه‌رو نباشد. لذا در بازه زمانی ۳۰ ساله تغییرات عمده‌ای در کاربری اراضی منطقه به وجود آمده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که مناطق دارای افت سطح آب زیرزمینی، با فرونشست نیز مواجه شده‌اند به طوری که محدوده هشتگرد در بازه زمانی پنج‌ساله ما بین ۱۸ تا ۳۲۰ میلی‌متر فرونشست داشته است. مجموعه این شرایط به‌روشنی نشان می‌دهد که این منطقه نیازمند برنامه‌ریزی‌ها و رویکردهای نوین مدیریتی در ارتباط با منابع آب دارد؛ زیرا هر تصمیم نادرستی ممکن است پیامدهای متعددی داشته باشد و اگر این مسئله نادیده گرفته شود، به‌راحتی از کنترل خارج خواهد شد.

واژگان کلیدی: مخاطره فرونشست، تصاویر راداری، تداخل‌سنجی راداری، هشتگرد-نظرآباد.

مقدمه

فرونشست زمین یک مخاطره زمین‌شناختی است که در ارتباط با فعالیت‌های انسانی و تغییرات محیطی رخ می‌دهد (دیو، و همکاران ۲۰۱۹؛ جیو^۲ و همکاران، ۲۰۱۵). این مخاطره در ۶۰ کشور و بیش از ۱۵۰ شهر جهان رخ داده است و به یک معضل زمین‌شناسی-زیست محیطی جهانی تبدیل شده است (دوان^۳ و همکاران، ۲۰۲۲). مشابه بسیاری از مناطق ایران، دشت‌های جنوبی رشته‌کوه البرز با فرونشست سریع زمین در ارتباط با برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی روبه‌رو است (رنجبر و همکار، ۱۴۰۱؛ رضایی شهبابی و همکاران، ۱۴۰۱)؛ علاوه بر این رشد شتابان شهرنشینی، افزایش بارهای دینامیکی و استاتیکی و توسعه فضاهای زیرزمینی نیز بر وقوع فرونشست زمین به میزان مختلف تأثیرگذار بوده است (رنجبر و همکار ۱۳۸۷؛ اسدی و همکاران، ۱۴۰۰). این پدیده ایمنی زیرساخت‌های شهری را به شدت تهدید می‌کند و خطر آب‌گرفتگی معابر شهری را افزایش می‌دهد و در مناطق ساحلی افزایش سطح آب دریاها را تشدید می‌کند و حتی بر امنیت منطقه‌ای تأثیر می‌گذارد (لیو^۴ و همکاران، ۲۰۲۰، سیریواردنه^۵ و همکاران، ۲۰۲۱). فرونشست زمین معمولاً منجر به آسیب به سیستم آبخوان‌ها، کاهش کیفیت آب و تخریب سازه‌های زیرسطحی و سطحی مانند تونل‌های زیرزمینی، ساختمان‌ها، جاده‌ها، راه‌آهن و خطوط لوله می‌شود از این رو پایش و تجزیه و تحلیل فرونشست به منظور شناسایی خطرات بالقوه و حفظ توسعه پایدار منطقه‌ای امری حیاتی محسوب می‌شود. عمده تحقیقات در مورد فرونشست زمین بر دو جنبه متمرکز شده است: پایش فرونشست زمین و پیش‌بینی آن. پایش فرونشست زمین با استفاده از تکنیک‌های مختلفی مانند رادار دیافراگم مصنوعی تداخل‌سنجی (ارکینسن^۶ و همکاران، ۲۰۱۷؛ محمد، ۲۰۱۹) ترازیابی دقیق (کاربلا^۷ و همکاران، ۲۰۱۳)، سیستم‌های مکان‌یابی جغرافیایی GPS (تندامنسوب^۸ و همکاران، ۲۰۱۹) انجام می‌گیرد. در غالب موارد، از روش تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان روشی قابل اطمینان برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت بسیار بالا، پوشش وسیع و قدرت تفکیک مکانی بالا استفاده می‌شود.

نقش استخراج آب‌های زیرزمینی در افزایش تنش‌های مؤثر اضافی و کاهش فضاهای خالی لایه‌های خاک از دهه ۱۹۴۰ آشکار شده است (ترزگی^۹، ۱۹۴۳). از حدود سال ۱۹۶۵، یونسکو اولین برنامه جهانی خود را برای بررسی چرخه‌های آب‌شناختی آغاز نمود که در سال‌های بعد مطالعه فرونشست‌ها به یکی از موضوع‌های اصلی آن تبدیل شد (یونسکو، ۱۹۷۰). در اوایل سال ۱۹۷۵ گروه ارزیابی فرونشست در پاریس شکل گرفت که اساس کار آن بررسی ارتباط این پدیده با آب‌های زیرزمینی بود (یورگنسن^{۱۰}، ۱۹۷۵). از آن تاریخ تا به امروز بررسی‌های بیشتری در این زمینه در کشورهای پیشرفته به‌ویژه در ایالات متحده و ژاپن انجام شده است که نتیجه آن کنترل شدید مصرف آب و تغییر در الگوی مصرف و توقف فرونشست‌ها در بسیاری از موارد بوده است (ساتو^{۱۱}، ۲۰۰۶). تکنیک استفاده از رادار برای پایش فرونشست‌ها از حدود سال ۱۹۸۱ در کشورهای توسعه‌یافته آغاز شد (هانسن، ۲۰۲۰) و تاکنون تحقیقات زیادی در ارتباط با پایش و ارزیابی خطر فرونشست صورت گرفته است. (شکل ۱)

¹. Du

². Guo

³. Duan

⁴. Lyu

⁵. Siriwardana

⁶. Eriksen

⁷. Karila

⁸. Tangdamrongsub

⁹. Terzaghi

¹⁰. Jorgensen

¹¹. Sato

جدول ۱. مطالعات انجام شده در ارتباط با موضوع پژوهش

نویسندگان	سال	منطقه (کشور)	روش تحقیق	نتایج
وی کی دانگ ^۱ و همکاران	۲۰۱۴	هانوی ویتنام	تکنیک تداخل سنجی راداری	افزایش هم‌زمان نرخ فرونشست با افزایش استفاده از آب‌های زیرزمینی
راسپینیو ^۲ و همکاران	۲۰۱۴	دلتای تسالین یونان	مدل‌سازی ژئوتکنیک و تداخل سنجی	نرخ فرونشست سالانه ۴/۵ سانتی متری
قاضی فرد و همکاران	۲۰۱۶	دشت کاشان	تکنیک تداخل سنجی راداری با ASAR	بیشترین میزان فرونشست در محدوده مطالعاتی حدود ۳/۵ سانتی‌متر در سال است
مالیک ^۳ و همکاران	۲۰۲۲	شهر دهلی	تکنیک تداخل سنجی راداری	میزان ۲۰ سانتی‌متر فرونشست در سال و همبستگی مثبتی با کاهش آب زیرزمینی
خان و همکاران ^۴	۲۰۲۲	اسلام‌آباد پاکستان	تکنیک تداخل سنجی راداری	۵ سانتی‌متر فرونشست در سال
عباس‌نژاد	۱۳۷۷	دشت رفسنجان	تحلیل افت سطح آب زیرزمینی و مطالعات میدانی	هر ۱۰ متر افت سطح آب زیرزمینی برابر با ۴۱ سانتیمتر نشست سطح زمین
یمانی و همکاران	۱۳۸۸	قره‌بلاغ فسا	ارتباط فرونشست زمین و افت آب زیرزمینی با تداخل سنجی راداری	هرساله در ازای هر ۲۶۰ سانتیمتر پایین رفتن سطح آب زیرزمینی ۱۱/۸ سانتیمتر سطح ارضی دشت قره‌بلاغ فرونشست می‌کند
شریفی کیا	۱۳۹۱	دشت نوق - بهرمان	مقایسه میزان فرونشست با ارقام تغییرات تراز آبی مستخرج از چاه‌های پیژومتر	در این دشت هر ۳/۲ سانتی‌متر افت تراز آبی قادر است فرونشستی به میزان ۱ سانتی‌متر ایجاد کند
آتشی و همکاران	۱۳۹۶	منطقه ۱۹ شهری تهران	تکنیک تداخل سنج راداری و از طریق سنجنده TerraSAR-X	فرونشست به میزان ۵ سانتی‌متر در دوره زمانی ۶ ماهه
نصری زارع و همکار	۱۴۰۱	مروری	تحلیلی-توصیفی	بیشترین تحقیقات علمی در زمینه فرونشست مربوط به کشورهای آمریکا و چین است.
عمادالدین و همکاران	۱۴۰۲	دشت فسا	تکنیک تداخل سنج راداری	در طول دوره آماری در منطقه مورد مطالعه ۲۴ سانتی‌متر فرونشست اتفاق افتاده است

با توجه به مصرف بی‌رویه آب و داده‌های پراکنده مربوط به افت سطح آب زیرزمینی در کشور، تشخیص اینکه فرونشست‌ها و پیامدهای حاصل از آن به پدیده‌ای مشکل‌ساز در کشور تبدیل گشته، کار دشواری نیست. بررسی‌های موردی در بخش‌های مختلف کشور نیز نمایانگر این امر می‌باشد (امیری و همکاران، ۱۴۰۲). در سال‌های اخیر ترک‌های بسیاری در زمین‌های کشاورزی و ساختمان‌های مسکونی، خیابان‌ها و زیرساخت‌های منطقه مطالعاتی نمایان شده است؛ به‌گونه‌ای که در بخش کشاورزی منطقه سبب تخریب و از بین رفتن بخشی از زمین‌ها شده و در بخش مسکونی سبب نشست‌های پیاپی در ساختمان‌ها گردیده و خسارت‌های جبران‌ناپذیری را ایجاد کرده است (مهرنور و همکاران، ۱۴۰۱). ترک‌ها در سطح خیابان‌ها هزینه‌های بهسازی را در سطح شهر چندین برابر نموده؛ و افزایش میزان سیلاب‌ها با خشک شدن قنات‌ها و تبدیل مسیر قنات‌ها به جدول‌های هدایت آب که زمانی به‌عنوان یک عامل مثبت در جلوگیری از سیلاب بوده؛ امروزه به یک خطر

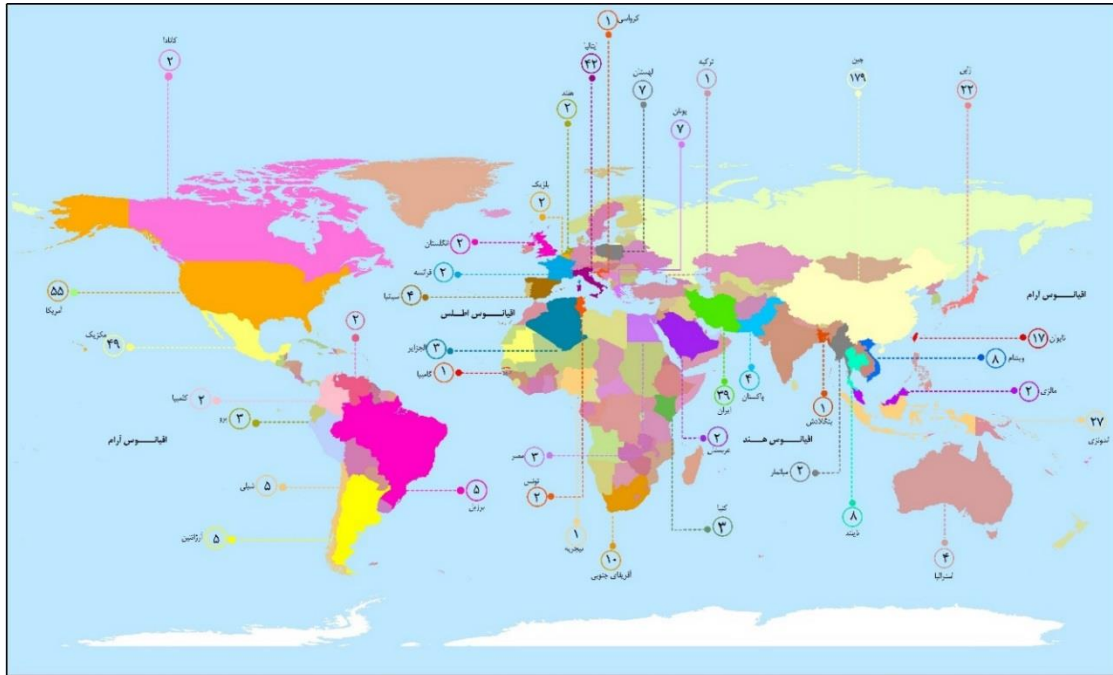
¹.Dang

².Raspinia

³. Malik

⁴. Khan

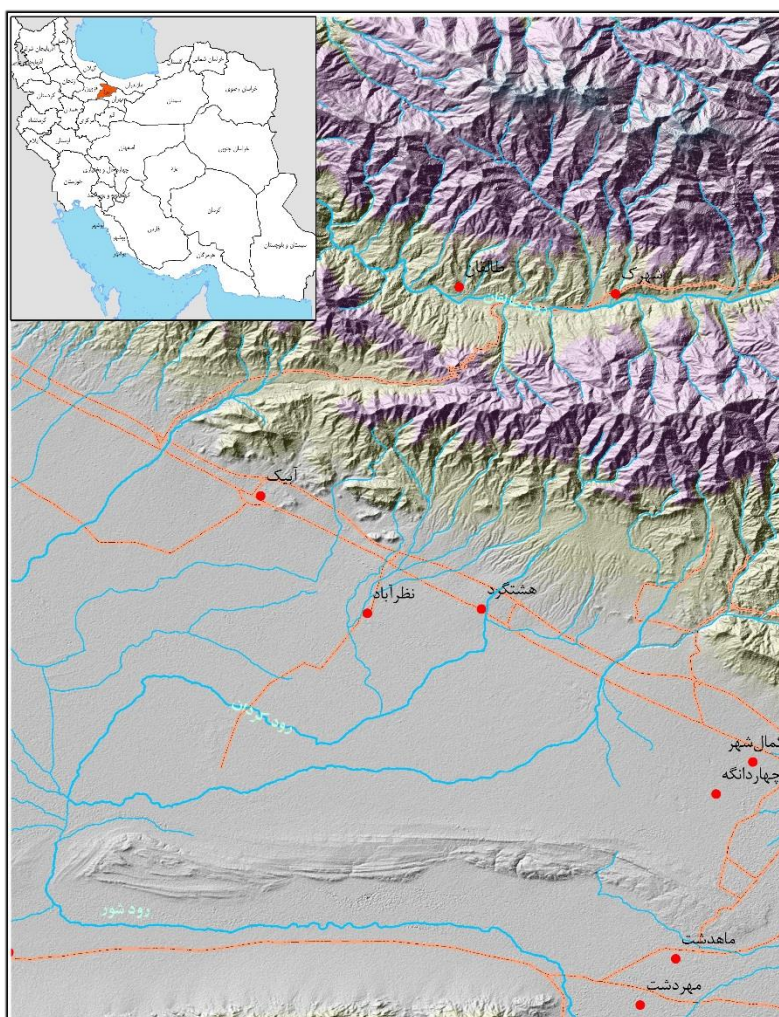
جبران ناپذیر در سطح مناطق شهری محدوده موردنظر تبدیل شده است (شهبازی و همکاران، ۱۳۹۹). این امر لزوم پرداختن و بررسی این مخاطره را در منطقه مورد مطالعه بیش از پیش ضروری جلوه می‌دهد. هدف اصلی تحقیق، ارزیابی میزان فرونشست منطقه با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و سری زمانی SBAS است.



شکل ۱. توزیع فضایی تعداد مطالعات فرونشست در سطح جهانی (۲۰۲۰-۱۹۵۳)

روش تحقیق

جمعیت شهر هشتگرد ۶۰ هزار نفر می‌باشد و این شهر با هدف سرریز جمعیت تهران و کرج و سیاست‌های تمرکززدایی جمعیت از پایتخت، بنا و از سال ۱۳۸۷ با شروع ساخت پروژه مسکن مهر وارد مرحله جدیدی از انبوه‌سازی شد. محدوده شهری هشتگرد از دیدگاه ژئومورفولوژیک بر روی واحدهای دشت و مخروط افکنه‌های قدیمی واقع شده است و بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی دمارتن، اقلیم منطقه نیمه‌خشک می‌باشد (سازمان هواشناسی استان البرز، ۱۳۹۹). شهرهای هشتگرد، نظرآباد، کوهسار و شهر جدید مهم‌ترین مناطق تمرکز جمعیتی دشت را تشکیل می‌دهند. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر Allos، تصاویر راداری سنتینل ۱، تصاویر ماهواره‌ای لندست، داده‌های اقلیمی دما، بارش، نوع خاک و همچنین اطلاعات مربوط به منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. از ابزارهای ArcGIS (به‌منظور تهیه نقشه‌های مورد نظر)، SNAP Desktop (به‌منظور تهیه نقشه فرونشست زمین بر اساس سری زمانی SBAS و ENVI جهت تهیه نقشه کاربری اراضی استفاده شده است.



شکل ۲. نقشه منطقه مورد مطالعه

روش تداخل‌سنجی با مقایسه فازهای دو تصویر راداری که از یک منطقه در دو زمان مختلف اخذ شده‌اند، قادر به تعیین تغییرات سطح زمین در آن بازه زمانی می‌باشد، در یک تداخل‌نگاشت اطلاعات اختلاف‌فاز دو تصویر که گویای اختلاف فاصله عارضه تا سنجنده در دو زمان تصویربرداری است، وجود دارد. اما با توجه به اینکه هر تداخل‌نگار شامل منطقه بزرگی با همبستگی پایین است، بنابراین نتایج آن قابل‌اعتماد نیست به همین دلیل روش تداخل‌سنجی راداری به‌تنهایی نمی‌تواند تغییرات صورت گرفته را نشان داد. در این راستا برای حل مشکل، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است که یکی از آن‌ها روش سری زمانی SBAS است (لیو و همکاران^۱، ۲۰۲۲). در این روش تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می‌گیرند که مؤلفه قائم خط مبنای آن‌ها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنا باشد، همچنین خط مبنا زمانی آن‌ها نیز هم‌زمان کمینه باشد. به این ترتیب، فقط تداخل‌نگارهایی تشکیل می‌شوند که کیفیت مناسبی داشته باشند. پس از تشکیل این تداخل‌نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از روش کم‌ترین مربعات، مقدار جابجایی هر پیکسل تخمین

^۱. Zainuri

زده می‌شود (زینوری^۱، ۲۰۲۲) در این تحقیق تجزیه و تحلیل اطلاعات در چند مرحله انجام شده که در ادامه به تشریح مراحل پرداخته شده است.

مرحله اول: در مرحله اول با استفاده از اطلاعات مربوط به وضعیت افت سطح آب چاه‌های حوضه مورد مطالعه، میزان تغییرات سطح ایستابی چاه‌ها محاسبه شده و سپس نقشه وضعیت افت سطح آب زیرزمینی در حوضه مورد مطالعه تهیه شده است. پس از محاسبه میزان افت سالانه هر چاه، با استفاده از روش درونیابی Spline و از طریق نرم‌افزار Arc GIS نقشه افت سالانه آب زیرزمینی منطقه تهیه شده است. پس از تهیه نقشه میزان افت سالانه آب زیرزمینی منطقه، میزان فرونشست در مناطق مختلف اندازه‌گیری و ارتباط آن با وضعیت کاربری اراضی و پیش روی نواحی سکونتگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مرحله دوم: در این مرحله با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ مربوط به دوره زمانی ۵ ساله (ژانویه ۲۰۱۷ تا ژانویه ۲۰۲۲) و با استفاده روش سری زمانی SBAS، میزان فرونشست حوضه مورد مطالعه محاسبه شده است. در این مرحله تصاویر موردنظر که دارای فواصل ۲۴ روزه هستند، تهیه شده و پس از تهیه تصاویر، به منظور پردازش تصاویر از سیستم عامل لینوکس و نرم‌افزار SNAP استفاده شده است. در این نرم‌افزار فرایند تهیه نقشه میزان فرونشست منطقه در ۳ مرحله انجام می‌شود (دلگادو^۲ و همکاران، ۲۰۱۹). در مرحله اول پیش‌پردازش‌های لازم بر روی تصاویر انجام شده است و جدول بیس لاین زمانی و مکانی تصاویر تهیه شده است. در مرحله دوم با توجه به بیس لاین زمانی تصاویر، جفت تصاویر موردنظر جهت تهیه اینترفروگرام انتخاب شده است. در واقع در این مرحله تصاویری که از نظر زمانی به هم نزدیک هستند به عنوان جفت تصاویر موردنظر برای تشکیل اینترفروگرام انتخاب شده‌اند، همچنین در این مرحله با استفاده از کدهای مربوطه، خطاها و نویزهای موجود بر روی تصاویر از جمله خطای توپوگرافی و اتمسفری رفع شده است و در نهایت در پایان نقشه‌های اینترفروگرام و اینترفروگرام فیلتر شده و جابه‌جایی عمودی جفت تصاویر تهیه شده است. در مرحله سوم نیز با استفاده روش سری زمانی SBAS نقشه میزان فرونشست منطقه در طی دوره زمانی مورد مطالعه تهیه شده است.

جدول ۲. مشخصات تصاویر مورد استفاده

ردیف	ماهواره	تاریخ	Beam	نوع تصویر	حالت مداری	Polarization
۱	سنتینل ۱	۲۰۱۷/۰۱/۱۶	IW	SLC	صعودی	VV
۲	سنتینل ۱	۲۰۱۹/۰۲/۰۹	IW	SLC	صعودی	VV
۳	سنتینل ۱	۲۰۲۰/۰۳/۰۵	IW	SLC	صعودی	VV
۴	سنتینل ۱	۲۰۲۱/۰۳/۲۹	IW	SLC	صعودی	VV
۵	سنتینل ۱	۲۰۲۲/۰۴/۲۲	IW	SLC	صعودی	VV

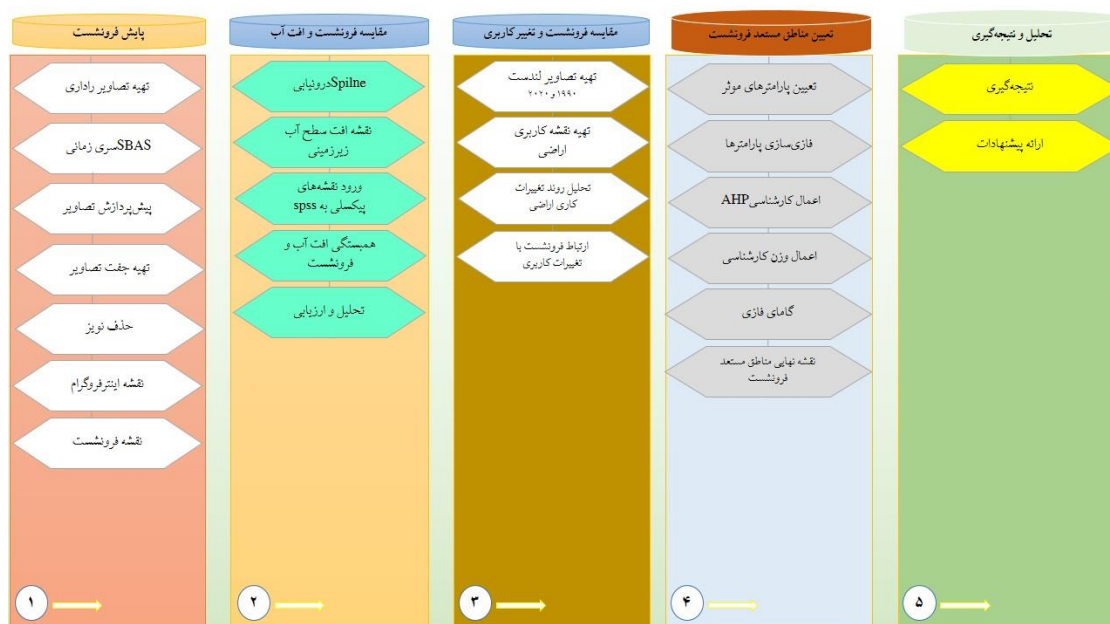
مرحله سوم: در این مرحله همبستگی بین میزان فرونشست با وضعیت افت سطح آب‌های زیرزمینی منطقه و همچنین سایر پارامترهای ژئومورفولوژی مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. به این منظور نقشه درونیابی مربوط به افت سطح آب‌های زیرزمینی منطقه، به صورت پیکسلی وارد نرم‌افزار SPSS شده و سپس نقشه فرونشست نیز به همان صورت وارد نرم‌افزار SPSS شده و به این صورت میزان رابطه بین میزان فرونشست و افت آب زیرزمینی هر پیکسل با هم ارزیابی شده

^۲. Lyu et al

^۱. Delgado

است. با توجه به اینکه یکی از عوامل مؤثر در ایجاد فرونشست، افت سطح آب‌های زیرزمینی است، در این پژوهش از اطلاعات مربوط به ۲۵ چاه پیزومتری واقع در محدوده مطالعاتی استفاده شده است. لازم به ذکر است که دوره‌های آماری چاه‌ها مربوط به سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵ می‌باشد.

مرحله چهارم: در این مرحله با استفاده از مدل تلفیقی منطق فازی و AHP به شناسایی مناطق مستعد وقوع فرونشست پرداخته شده است. برای انجام این کار، ابتدا پارامترهای موردنظر شامل لیتولوژی، ارتفاع، شیب، میزان افت آب زیرزمینی، نزدیکی به رودخانه و واحدهای توپوگرافی انتخاب شده است. انتخاب پارامترها بر اساس تحقیقات پیشین و مطالعات کتابخانه‌ای و همچنین نظر کارشناسان مربوطه بوده است، پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی موردنظر، لایه‌ها بر اساس پتانسیل وقوع فرونشست، فازی سازی شده‌اند (ملکی و همکار، ۱۳۹۵). پس از فازی سازی لایه‌ها، لایه‌ها بر اساس کارشناسان (۳ متخصص ژئومورفولوژی) و مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) وزن دهی شده است و وزن به‌دست‌آمده بر روی لایه‌ها اعمال شده است و در نهایت لایه‌های اطلاعات با استفاده از عملگر گامای فازی با هم ترکیب شده و نقشه نهایی مناطق مستعد وقوع فرونشست تهیه شده است. در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده با نتیجه به‌دست‌آمده از طریق سری زمانی SBAS مقایسه شده است و به این ترتیب رابطه بین آن‌ها ارزیابی شده است. (شکل ۳)

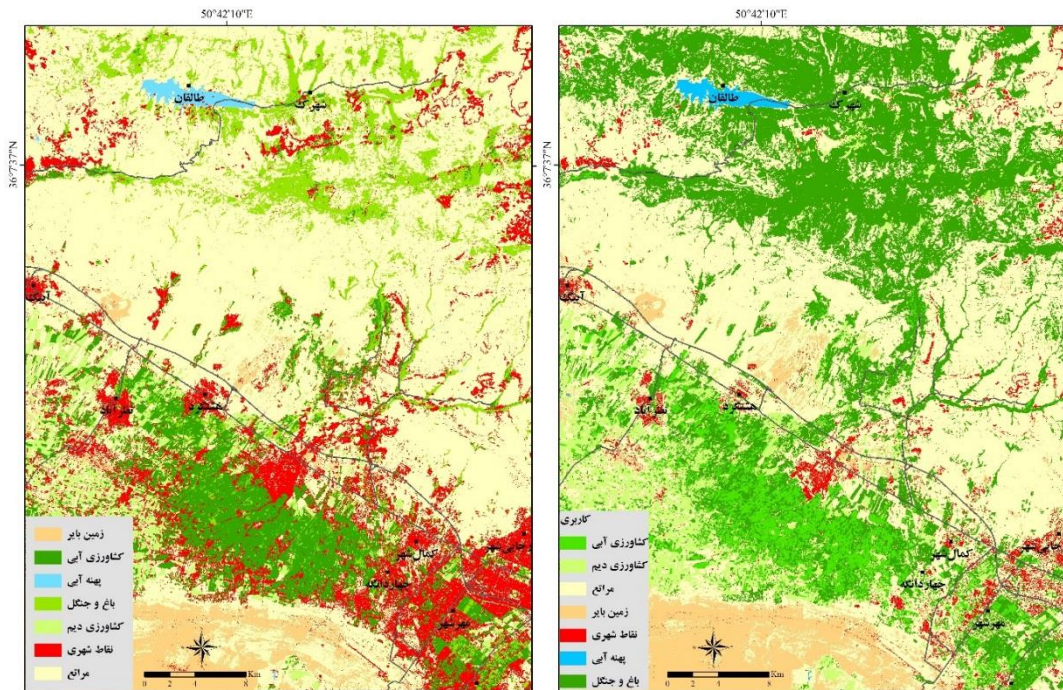


شکل ۳. فلوجارت مراحل انجام تحقیق

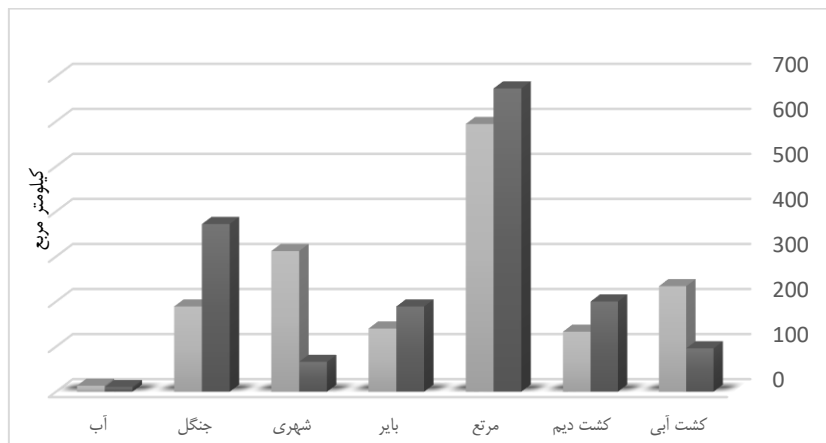
بحث و یافته‌ها

عوامل متعددی در وقوع مخاطره فرونشست و یا تشدید آن تأثیرگذار هستند. از مهم‌ترین عوامل اصلی در وقوع این مخاطره نوع کاربری اراضی یا به تعبیری تغییرات کاربری اراضی است. محدوده دشت هشتگرد فاقد تنوع لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی بوده و عمدتاً بر روی واحد دشت و مخروط‌افکنه‌های قدیمی قرار دارد. نبود موانع ژئومورفولوژیکی باعث شده است که توسعه سکونتگاهی و کشاورزی در این منطقه با محدودیت زیادی روبه‌رو نباشد. لذا در بازه زمانی ۳۰ ساله تغییرات عمده‌ای در کاربری اراضی منطقه به وجود آمده است. نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه در طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ بیانگر افزایش کاربری‌های مسکونی و کشاورزی می‌باشد (شکل ۴).

بررسی نقشه‌های کاربری اراضی هشتگرد نشان می‌دهد که در دوره زمانی ۳۰ ساله تغییرات شدیدی در نوع کاربری ایجاد شده است به طوری که در سال ۱۹۹۰ مساحت کاربری سکونتگاهی ۶۳ کیلومتر مربع بوده و این میزان در سال ۲۰۲۰ به ۳۱۲ کیلومتر مربع افزایش یافته است. کاربری جنگل و باغات در سال ۱۹۹۱ مساحتی در حدود ۳۷۲ کیلومتر مربع داشته است و در سال ۲۰۲۰ به ۱۸۹ کیلومتر مربع کاهش یافته است. نتایج حاصل از تغییرات کاربری اراضی بیانگر این است که کاربری شهری و سکونتگاهی دارای روند افزایشی بوده است. این مسئله می‌تواند در وقوع مخاطره فرونشست مؤثر باشد. علاوه بر این افزایش کاربری‌های کشاورزی فشار بر منابع آب را تشدید کرده و به عنوان یک عامل غیرمستقیم نقش قابل توجهی در فراهم آوردن شرایط برای وقوع فرونشست بازی می‌کند (شکل ۵).



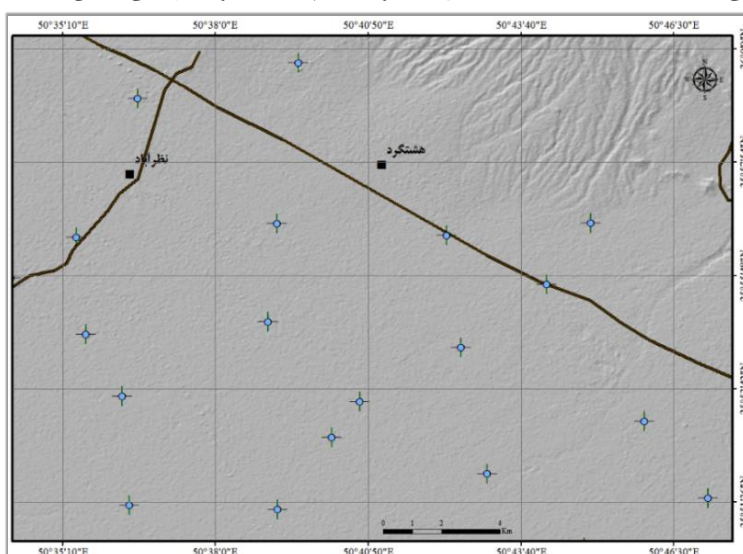
شکل ۴. نقشه کاربری اراضی محدوده دشت هشتگرد در سال‌های ۱۹۹۰ (سمت راست) و ۲۰۲۰ (سمت چپ)



شکل ۵. مساحت کاربری‌های اراضی منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۲۰

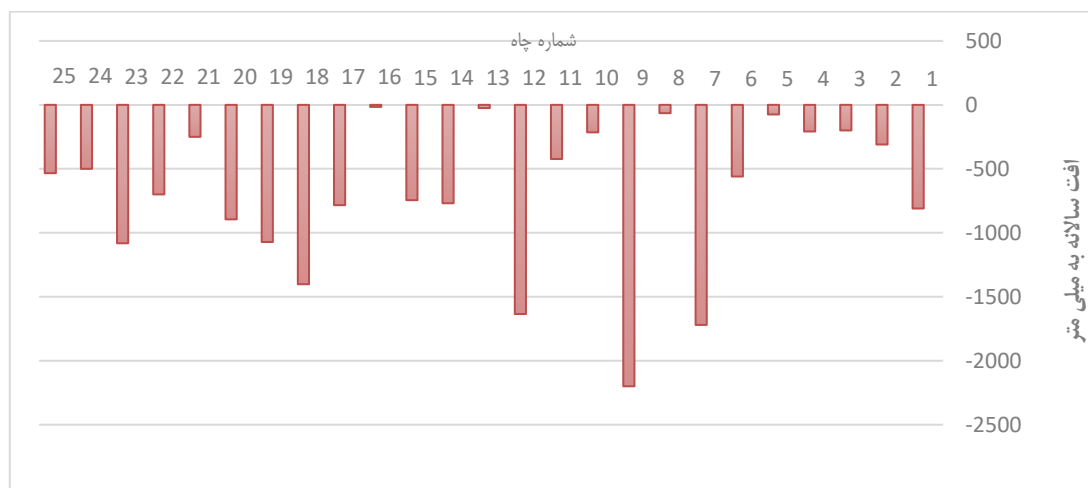
ارزیابی وضعیت منابع آب زیرزمینی

دشت هشتگرد-نظرآباد با توجه به وضعیت ژئومورفولوژی که دارد، دارای بیشترین کاربری اراضی کشاورزی است. در واقع، شیب مناسب و نبود موانع محدودکننده سبب شده است تا اراضی کشاورزی آبی در این دشت با توسعه زیادی همراه باشد. همچنین با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه از نظر اقلیمی در منطقه نیمه‌خشک 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. در شکل ۶ موقعیت چاه‌های مورد بررسی نشان داده شده است.



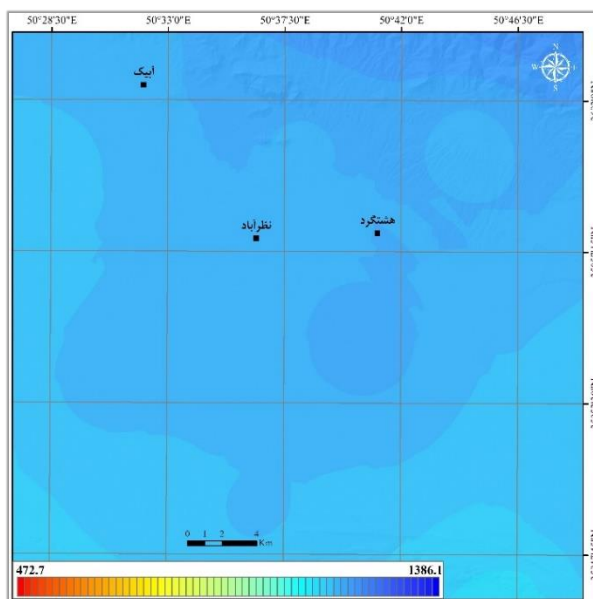
شکل ۶. موقعیت چاه‌های مورد بررسی

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 که میانگین افت سالانه چاه‌ها بین ۱۰۰ تا ۲۰۷۰ میلی‌متر محاسبه شده است. در شکل ۷ نتایج حاصل از محاسبه میانگین افت سالانه سطح آب چاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است که بر اساس آن، 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 ۷. میانگین افت سالانه چاه‌های مورد مطالعه برحسب میلی‌متر

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 سطح ایستابی سالانه آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه تهیه شده است (شکل ۸) که بر این اساس مناطق میانی و جنوبی محدوده مطالعاتی دارای بالاترین میانگین سالانه افت سطح آب زیرزمینی هستند.

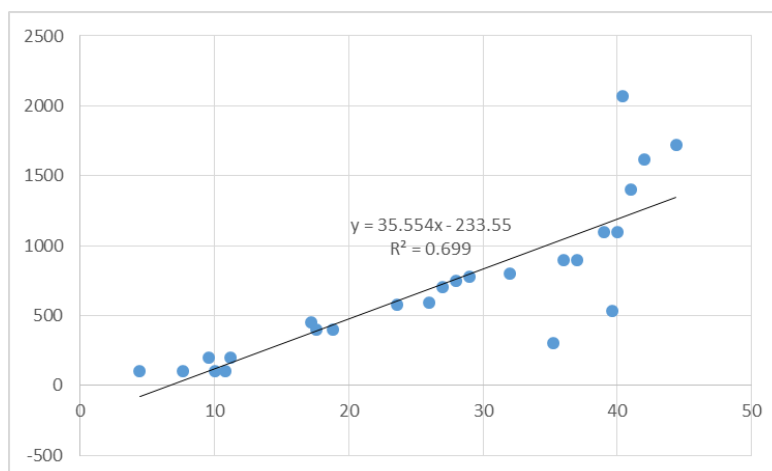


شکل ۸. نقشه درونیابی میانگین سالانه سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

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 ۳) که نتایج حاصله بیانگر این است که ضریب همبستگی بین آن‌ها حدود ۰/۷ می‌باشد (شکل ۹). به عنوان مثال در چاه شماره ۳ که میانگین افت سالانه ۱۷۲۰ میلی‌متر را دارا می‌باشد، میزان فرونشست در بازه زمانی ۵ ساله برابر با ۲۲ سانتی‌متر بوده است. در واقع 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.

جدول ۳. بررسی رابطه بین میزان فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مورد مطالعه بر حسب میلی‌متر

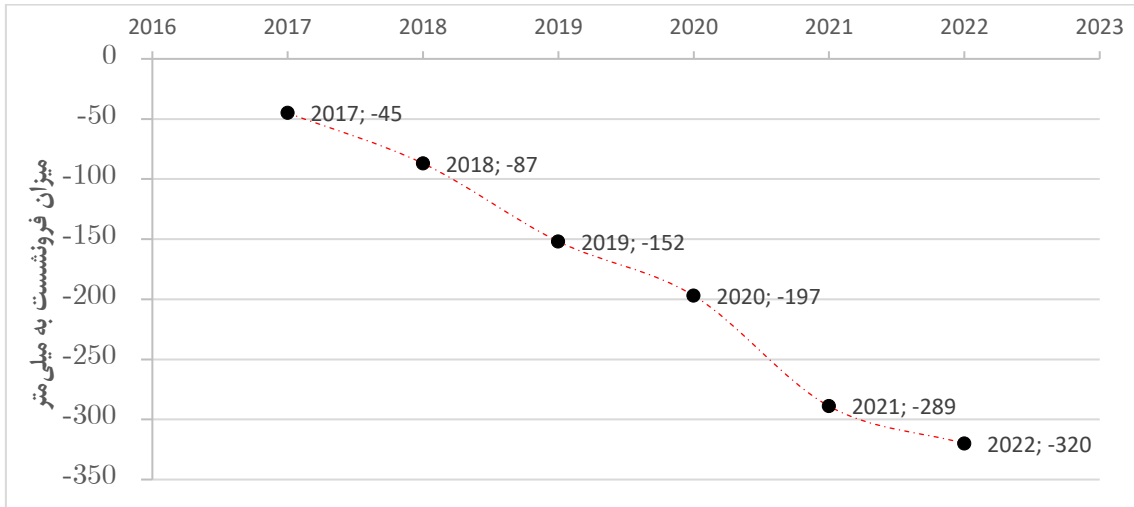
شماره چاه	میانگین افت سالانه سطح آب	میزان فرونشست در دوره ۵ ساله
۱	۴۰۰	۹۵
۲	۶۵۰	۱۵۲
۳	۱۷۲۰	۲۲۲
۴	۲۰۴	۴۰/۸
۵	۱۰۸	۳۸



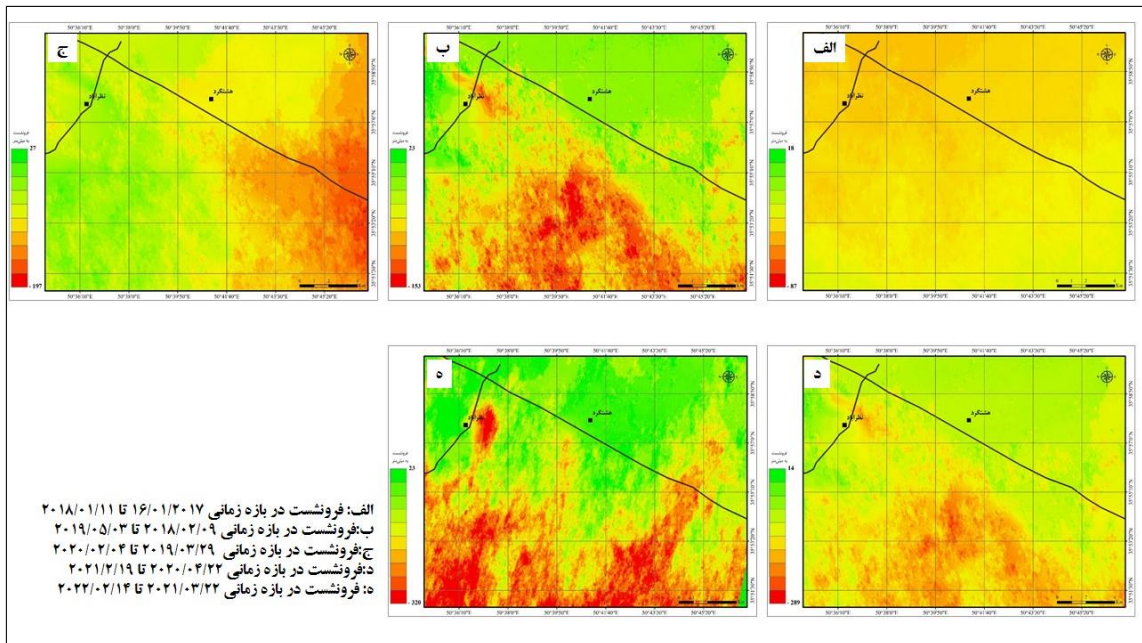
شکل ۹. نمودار همبستگی بین میزان فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی

پایش فرونشست در منطقه مورد مطالعه

به منظور ارزیابی میزان فرونشست در محدوده مورد مطالعه در بازه زمانی ۵ ساله پس از تهیه تصاویر راداری سنتینل ۱، ابتدا زوج تصاویر مورد نظر جهت تهیه اینترفروگرام مشخص شد. پس از انتخاب تصاویر زوجی، نقشه‌های اینترفروگرام منطقه تهیه شد. پس از تهیه اینترفروگرام‌ها با روش سری زمانی SBAS میزان فرونشست در منطقه به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که محدوده هشتگرد در بازه زمانی پنج‌ساله ما بین ۱۸ تا ۳۲۰ میلی‌متر فرونشست را تجربه کرده است. بررسی وضعیت سالانه فرونشست در منطقه مورد مطالعه بیانگر این است که در طی دوره زمانی اول یعنی از تاریخ ۲۰۱۷/۰۱/۱۶ تا ۲۰۱۸/۰۱/۱۱ این محدوده دارای ۹۵ میلی‌متر فرونشست بوده است که این میزان در دوره زمانی دوم یعنی از تاریخ ۲۰۱۸/۰۱/۱۱ تا ۲۰۱۹/۰۱/۰۵ با ۵۷ میلی‌متر افزایش به ۱۵۲ میلی‌متر رسیده است. میزان فرونشست در دوره زمانی سوم یعنی از تاریخ ۲۰۱۹/۰۱/۰۵ تا ۲۰۲۰/۰۱/۲۴ با ۵۵ میلی‌متر افزایش به ۱۹۷ رسیده است. در دوره چهارم نیز یعنی از تاریخ ۲۰۲۰/۰۱/۲۴ تا ۲۰۲۱/۰۱/۱۹، 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 ۲۰۲۱/۰۱/۱۹ تا ۲۰۲۲/۰۲/۱۴ این منطقه ۴۲ میلی‌متر فرونشست مواجه شده است و در مجموع میزان فرونشست منطقه در طی دوره زمانی ۵ ساله به ۳۲۰ میلی‌متر افزایش یافته است (شکل ۱۰). با توجه به موارد مذکور، حداکثر میزان فرونشست سالانه در منطقه با ۹۵ میلی‌متر مربوط به سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ بوده است و بعدازآن میزان فرونشست روند کاهشی داشته است و در نهایت در طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ و ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۰ به ۴۲ میلی‌متر در سال کاهش یافته است.



شکل ۱۰. نمودار میزان فرونشست سالانه در منطقه مورد مطالعه

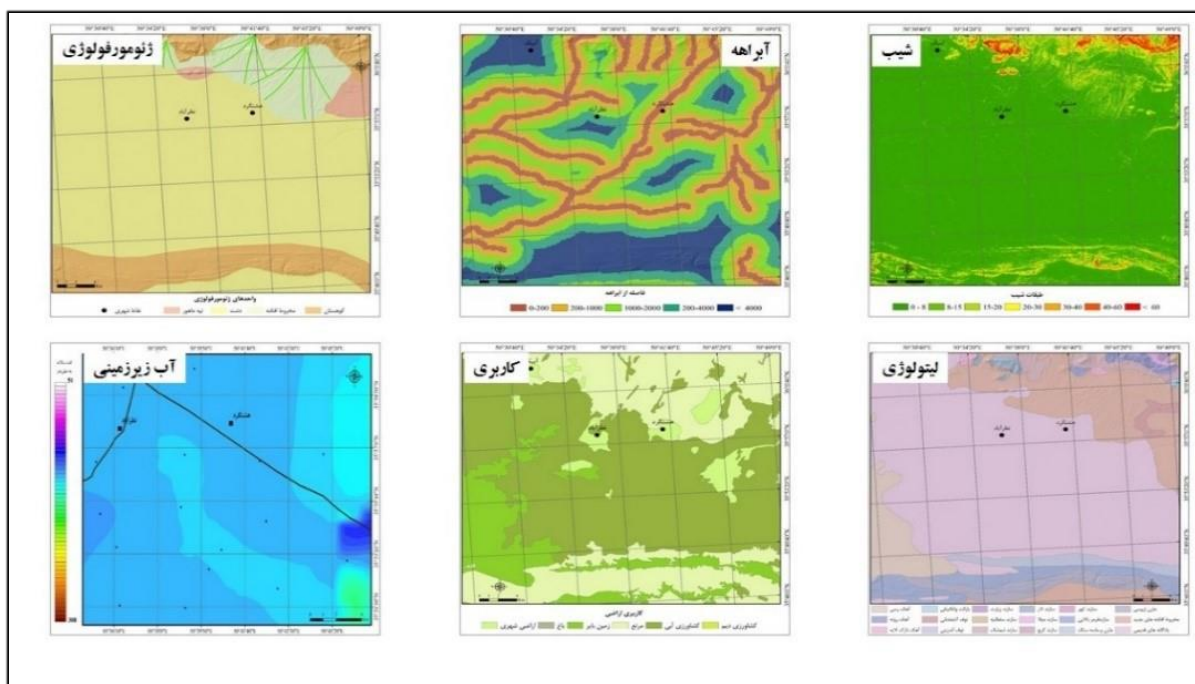


شکل ۱۱. نقشه‌های فرونشست در بازه زمانی ۵ ساله در منطقه مورد مطالعه

شناسایی مناطق مستعد فرونشست

پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی، به منظور انجام پهنه‌بندی نهایی، لایه‌ها فازی‌سازی شده است. فازی سازی 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 لایه واحدهای ژئومورفولوژی، به واحدهای دشت و مخروطه‌افکنه ارزش نزدیک به ۱ و به واحدهای تپه‌ماهور 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، به مناطق آبرفتی ارزش نزدیک به ۱ و به مناطق بازالتی و آندزیتی ارزش نزدیک به صفر داده شده است (شکل ۱۲).



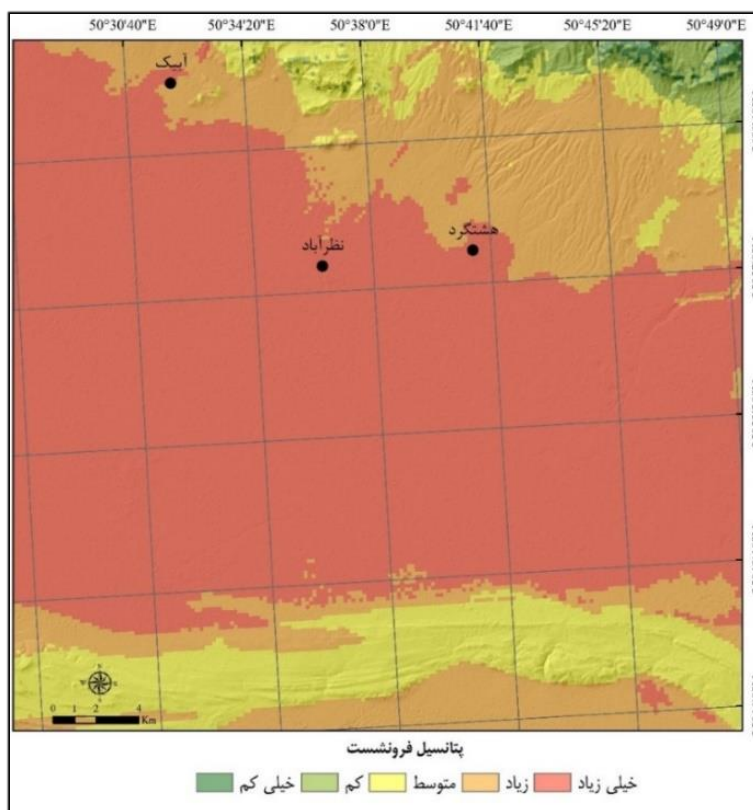
شکل ۱۲. لایه‌های مورد استفاده برای پهنه‌بندی فازی

پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی، با توجه به اینکه ارزش و اهمیت لایه‌ها یکسان نیست، از مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای وزن‌دهی استفاده شده است (جدول ۴). امتیازدهی به معیارها نیز از طریق پرسش‌نامه و دیدگاه‌های کارشناسان امر انجام شد. برای انجام محاسبات از نرم‌افزار Expert Choice و پس از به دست آوردن وزن‌های نهایی هر کدام از معیارها، وزن به دست آمده در نرم‌افزار ArcGIS بر روی لایه‌ها اعمال شده است. مقدار ضریب ناسازگاری در روش AHP برابر با ۰/۰۴۴۲ می‌باشد.

جدول ۴. وزن لایه‌های اطلاعاتی بر اساس مدل AHP

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

در نهایت پس از همپوشانی لایه‌های اطلاعاتی، نقشه نهایی مناطقی مستعد وقوع فرونشست در ۵ کلاس تهیه شده است (شکل ۱۳). بنابراین مناطق جنوبی محدوده مطالعاتی به دلیل نوع کاربری، نوع لیتولوژی، شیب کم، قرار گرفتن در واحد دشت و مخروط افکنه و همچنین افت زیاد منابع آب زیرزمینی در این مناطق، پتانسیل بالایی جهت وقوع و تشدید فرونشست در آینده دارد. نقشه اطلاعات مکانی فرونشست می‌تواند آمایش سرزمین بسیار کمک‌کننده باشد. مقایسه نقشه‌های حاصل از تداخل سنجی راداری با نقشه پتانسیل فرونشست حاکی از دقت بالایی هر دو روش در تعیین مناطق دارای فرونشست در منطقه است. به گونه‌ای که بیشترین میزان فرونشست در هر دو روش در بخش‌های جنوبی قرار دارد.



شکل ۱۳. نقشه مناطق مستعد فرونشست در منطقه مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش ارزیابی میزان فرونشست محدوده شهری هشتگرد می‌باشد. این شهرستان جزو استان البرز بوده و در غرب شهر کرج واقع شده است. فرونشست زمین، یک پدیده غیرقابل برگشت است؛ چرا که رخداد این مخاطره در هر منطقه‌ای منجر به بسته شدن خلل و فرج و فشردگی خاک شده و از ورود آب‌های سطحی به درون لایه‌های آبرفتی جلوگیری می‌شود. در پی این فرآیند، مواد مغذی روی خاک که در طی میلیون‌ها سال ایجاد شده‌اند، ظرف مدت بسیار کوتاهی از بین می‌روند. نتیجه این روند «مرگ آبخوان» و از بین رفتن کشاورزی و زراعت و باغداری در دشت هشتگرد خواهد بود. با ادامه این روند زمین‌های حاصلخیز منطقه هشتگرد چشم‌انداز تاریکی را روبه‌روی خود خواهند داشت و عوارض اجتماعی و اقتصادی غیرقابل جبرانی دامن‌گیر منطقه خواهد شد.

تداخل‌سنجی داده‌های راداری در بین روش‌های متنوع و گوناگون آشکارسازی تغییرات پوسته زمین به‌عنوان بهترین روش اندازه‌گیری پیوسته این تغییرات مطرح می‌باشد و یکی از دقیق‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های سنجش‌ازدور، برای شناسایی و نمایش جابه‌جایی‌های به‌وجودآمده در سطح زمین بوده است (چاترجی و همکاران^۱، ۲۰۱۶). نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری بیانگر این است که میزان فرونشست در محدوده مطالعاتی در طی دوره زمانی ۵ ساله بین ۱۸ تا ۳۲ سانتی‌متر است. نقشه نهایی فرونشست نشان می‌دهد که بالاترین میزان فرونشست در مناطق جنوبی و غربی و کمترین میزان آن نیز مربوط به مناطق شمالی محدوده مورد مطالعه است. بر اساس ارزیابی مناطق مستعد وقوع مخاطره فرونشست می‌توان دریافت که نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری تا حد قابل توجهی از اعتبار بالایی برخوردار می‌باشد. نتایج حاصل از ارزیابی وضعیت ژئومورفولوژی منطقه نیز بیانگر این است که محدوده دارای اختلاف ارتفاع و شیب بسیار کمی است و

^۱. Chatterjee, et al

در دو دهه اخیر به دلیل نداشتن موانع ژئومورفولوژی و افزایش آمار مهاجرت از شهرهای دیگر با توسعه ساخت‌وسازها و فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی همراه بوده است. توسعه فعالیت‌های مذکور سبب بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی شده است و این مسئله سبب شده است تا در طی سال‌های اخیر این محدوده با افت شدید آب‌های زیرزمینی روبه‌رو باشد. افت زیاد سطح آب‌های زیرزمینی به‌طور متوسط سبب ایجاد فرونشست در منطقه شده است. نتایج حاصل از پژوهش بیانگر این است که فرونشست ایجاد شده در منطقه مورد مطالعه بیشتر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی بوده است و در صورت مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح می‌توان از روند فرونشست در منطقه تا حدودی جلوگیری کرد. براین اساس مدیریت و اصلاح الگوی مصرف نه به عنوان یک راه‌حل کوتاه‌مدت، بلکه به عنوان بهترین و پایدارترین گزینه و راه‌حل برای شرایط حال حاضر منطقه باید در دستور کار مدیران و تصمیم‌گیران حوزه آب قرار گیرد. علاوه بر این نیاز است که روند مستندسازی و رصد نرخ فرونشست در منطقه مورد مطالعه با دقت بالاتری نسبت به قبل و با کمک تجهیزات به‌روز انجام گیرد. در نهایت در راستای ایجاد یک عزم ملی برای مقابله با بحران روبه‌رشد فرونشست زمین در محدوده مورد مطالعه نیاز است همکاری گسترده‌ای میان نهادهای مختلف و ارگان‌های اجرایی در راستای مدیریت بحران شکل گیرد.

منابع

- اسدی، م؛ گنجائیان، ح، جاودانی، م، قادری حسب، م، ۱۴۰۰، ارزیابی ارتباط بین عوامل طبیعی و میزان فرونشست در دشت ایوانکی با استفاده از تصاویر رادار، مجله هیدرولوژی، دوره ۶، شماره ۱، صفحه ۲۲-۱۳.
- امیری، سیامک، مظاهری، مهدی؛ ۱۴۰۲، چالش‌های ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در کشور، گزارش کارشناسی مرکز پژوهش‌های شورای اسلامی، شماره مسلسل ۱۸۸۸۴.
- رضایی شهابی، ر؛ عرب، ع؛ احمدی، ح؛ پیشوا، ا، شهبخش موسی‌زهی، م، ۱۴۰۱، ارزیابی آسیب‌پذیری بافت شهری منطقه ۱۸ تهران، تحت تأثیر فرونشست زمین با استفاده از تحلیل شبکه‌ای ANP و GIS، جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره چهل و چهارم، ص ۲۱۹-۱۹۳.
- رنجبر باروق، زهرا؛ فتح‌الله زاده، محمد، ۱۴۰۱، بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: کلان‌شهر کرج)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۰، شماره ۴، ۱۳۸-۱۵۵.
- رنجبر، محسن و نسرین جعفری، ۱۳۸۷. بررسی عوامل مؤثر در فرونشست زمین دشت اشتهارد، نشریه علمی پژوهشی انجمن جغرافیای ایران، دوره جدید، سال ششم، شماره ۱۹ و ۱۸، ص ۱۶۶-۱۵۵.
- شهبازی، افسانه؛ صفری، فرشید و حامد کتابچی، ۱۳۹۹، مدل‌سازی اقدامات مدیریتی در کنترل افت سطح تراز آب زیرزمینی (دشت هشتگرد، استان البرز)، تحقیقات منابع آب ایران، دوره ۱۶، شماره ۱، صص ۱۳۴-۱۱۶.
- صدیقی، مرتضی و رامین گودرزی، ۱۳۹۵. تعیین فرونشست زمین در منطقه نظرآباد هشتگرد با استفاده از الگوریتم SBAS، همایش ملی ژئوماتیک. تهران، صص ۲۱-۱۲.
- ملکی، امجد، رضایی، پیمان. ۱۳۹۵. پیش‌بینی مکان‌های در معرض خطر فرونشست دشت کرمانشاه با استفاده از مدل فازی، برنامه ریزی و آمایش فضا دوره ۲۰ بهار ۱۳۹۵ شماره ۱، صص ۲۳-۱۲.
- مهرنور، شبنم؛ رباطی؛ مریم؛ خیرخواه، مسعود؛ فرساد، فروغ و شهرام بیک‌پور. ۱۴۰۱. پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست زمین در دشت هشتگرد بر اساس رویکرد تلفیقی تصمیم‌گیری چند معیار: WOI-BWM، جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۱۱، شماره ۴ - شماره پیاپی ۴۴، بهمن ۱۴۰۱، صص ۱۴۸-۱۲۷

- نصیری زارع، سعید و امیر کرم، ۱۴۰۱ فرا روشی برای شناسایی موضوع تحقیقات علمی در فرونشست زمین (یک تحقیق با رویکرد علم‌سنجی)، نشریه علمی جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۱۱، شماره ۴، ص ۱۹-۱.
- Cao Y, Wei Y-n, Fan W, Peng M, Bao L., 2020. Experimental study of land subsidence in response to groundwater withdrawal and recharge in Changping District of Beijing. *PLoS ONE* 15(5):pp1-17.
- Chatterjee, R. S., Fruneau, B., Rudant, J. P., Roy, P. S., Frison, P. L., Lakhera, R. C., ... & Saha, R., 2006. Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990s as observed from space by differential synthetic aperture radar interferometry (D-InSAR) technique. *Remote Sensing of Environment*, 102(1-2), 176-185.
- Dang, V. K.; C. Doubre, C. Weber, N. Gourmelen, F. Masson., 2014. Recent land subsidence caused by the rapid urban development in the Hanoi region (Vietnam) using ALOS InSAR data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 14: 657-674.
- Du, Z., Ge, L., Ng, A. H. M., Lian, X., Zhu, Q., Horgan, F. G., & Zhang, Q., 2021. Analysis of the impact of the South-to-North water diversion project on water balance and land subsidence in Beijing, China between 2007 and 2020. *Journal of Hydrology*, 603, 126990.
- Duan, G., Gong, H., Chen, B., Li, X., Pan, X., Shi, M., & Zhang, H., 2022. Spatiotemporal heterogeneity of land subsidence in Beijing. *Scientific Reports*, 12(1), 15120.
- Eriksen H.Ø.; Lauknes T.R.; Larsen Y.; Corner G.D.; Bergh S.G.; Dehls J., 2017. Visualizing and interpreting surface displacement patterns on unstable slopes using multi-geometry satellite SAR interferometry (2D InSAR). *Remote Sens. Environ.*, 191, 297-312.
- Guo, H., Zhang, Z., Cheng, G., Li, W., Li, T., & Jiao, J. J., 2015. Groundwater-derived land subsidence in the North China Plain. *Environmental earth sciences*, 74, 1415-1427.
- Lyu, H. M., Shen, S. L., Zhou, A., & Yang, J., 2020. Risk assessment of mega-city infrastructures related to land subsidence using improved trapezoidal FAHP. *Science of the Total Environment*, 717, 135310.
- Hanssen, R., & Rocca, F., 2020. *Radar Interferometry: 20 Years of Development in Time Series Techniques and Future Perspectives*.
- Lyu, H. M., Shen, S. L., Zhou, A., & Yang, J., 2020. Risk assessment of mega-city infrastructures related to land subsidence using improved trapezoidal FAHP. *Science of the Total Environment*, 717, 135310.
- Jorgensen, D. G. 1975. Analog-model studies of ground-water hydrology in the Houston district, Texas: Texas Water Devel. Board Rept. 190, 84 p.
- Karila K.; Karjalainen M.; Hyypää J.; Koskinen J.; Saaranen V.; Rouhiainen P. A., 2013. Comparison of precise leveling and persistent scatterer SAR interferometry for building subsidence rate measurement. *ISPRS Int. J. Geogr. Inf.*, 2, 797-816.
- Ketelaar, V.B.H Gini., 2008. *Satellite Radar Interferometry Subsidence Monitoring Techniques. Vol, 14 Netherlands. Springer Science*
- Khan, J., Ren, X., Hussain, M. A., & Jan, M. Q., 2022. Monitoring Land Subsidence Using PS-InSAR Technique in Rawalpindi and Islamabad, Pakistan. *Remote Sensing*, 14(15), 3722.
- Lyu, Z. H. O. U., Yizhan, Z. H. A. O., Zilin, Z. H. U., Chao, R. E. N., Fei, Y. A. N. G., Huang, L., & Li, X., 2022. Spatial and Temporal Evolution of Surface Subsidence in Tianjin from 2015 to 2020 Based on SBAS-InSAR Technology. *Journal of Geodesy & Geoinformation Science*, 5(1).

- Malik, K., Kumar, D., Perissin, D., & Pradhan, B., 2022. Estimation of ground subsidence of New Delhi, India using PS-InSAR technique and Multi-sensor Radar data. *Advances in Space Research*, 69(4), 1863-1882.
- Mohammad K.; Alizadeh B.; Tousi E. G.; Shakerian M.; Maghsoudi Y.; Rahgozar P., 2019. How groundwater level fluctuations and geotechnical properties lead to asymmetric subsidence: A PSInSAR analysis of land deformation over a transit corridor in the Los Angeles metropolitan area. *Remote Sensing*, 11,377.
- Raspini, F., Loupasakis, C., Rozos, D., Adam, N., & Moretti, S., 2014. Ground subsidence phenomena in the Delta municipality region (Northern Greece): Geotechnical modeling and validation with Persistent Scatterer Interferometry. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28, 78-89. Sato, C., Haga, M., & Nishino, J., 2006. Land subsidence and groundwater management in Tokyo. *International Review for Environmental Strategies*, 6(2), 403-424
- Siriwardana- de Zoysa, R., Schone, T., Herbeck, J., Illigner, J., Haghghi, M., Simarmata, H., Hornidge, A.K., 2021. The wickedness of governing land subsidence: Policy perspectives from urban Southeast Asia. *Pos one*, 16 (6).pp 261-289.
- Tangdamrongsub, N., Han, S. C., Jasinski, M. F., & Šprlák, M., 2019. Quantifying water storage change and land subsidence induced by reservoir impoundment using GRACE, Landsat, and GPS data. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111385.
- Terzaghi, K., 1943. *Theory of Consolidation*. John Wiley & Sons, Dordrecht, Netherlands, pp. 265–296.
- UNESCO, IASH., 1970. *Land Subsidence: Proceedings of the First International Symposium on Land Subsidence, Tokyo, 1969*. Int. Ass. Sci. Hydro (IASH).
- Zainuri, M., Helmi, M., Novita, M. G. A., Kusumaningrum, H. P., & Koch, M., 2022. Improved performance of geospatial model to access the tidal flood impact on land use by evaluating sea level rise and land subsidence Parameters. *Journal of Ecological Engineering*, 23(2).
- Zhang, Y., Wu, H. A., Kang, Y., & Zhu, C. (2016). Ground subsidence in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1992 to 2014 revealed by multiple SAR stacks. *Remote Sensing*, 8(8), 675.