



جغرافیا و روابط انسانی، زمستان ۱۴۰۳، دوره ۷، شماره ۳، صص ۶۲۶-۶۰۳

مدلسازی حساسیت به فرونشست زمین و تحلیل عوامل موثر بر آن در دشت شبستر با بهره‌گیری از جنگل تصادفی

منصوره صدری کیا^{۱*}، احمد شام‌کهریزی^۲

^{۱*} استادیار دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران نقشه برداری، تبریز، ایران

m.sadrykia@tabrizu.ac.ir

^۲ کارشناس ارشد، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران نقشه برداری، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۷

چکیده

فرونشست زمین اشاره به حرکت عمودی و رو به سمت پایین سطح زمین دارد. این پدیده ممکن است به صورت طبیعی یا در اثر فعالیت‌های انسانی ایجاد شود و خسارت‌هایی به شبکه‌های راه‌های ارتباطی، تاسیسات، سازه‌ها و زمین‌های کشاورزی وارد آورد. در چند سال اخیر پدیده فرونشست به عنوان یک بحران جدی در بسیاری از دشت‌های حاصل‌خیز ایران مطرح شده است و نگرانی‌های قابل توجهی را به وجود آورده است. در این مقاله دشت شبستر به عنوان یکی از دشت‌های پرخطر استان آذربایجان شرقی به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است. به منظور شناسایی احتمال فرونشست در نقاط مختلف و نیز شناسایی عواملی که سبب فرونشست زمین شده‌اند از الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شده است. نقشه موجود فرونشست زمین که با استفاده از سری زمانی مبتنی بر تکنیک تداخل‌سنجی راداری از منطقه مورد مطالعه تهیه شده بود، به عنوان داده آموزشی استفاده شده است. طبق نتایج مدلسازی، قسمت جنوبی منطقه مورد مطالعه دارای حساسیت بسیار زیاد نسبت به فرونشست شناخته شد، ۵/۶۳ درصد از مساحت منطقه دارای حساسیت خیلی زیاد و ۶/۳۷ درصد در کلاس حساسیت زیاد پهنه‌بندی شد. همچنین بر اساس مدلسازی انجام شده بیشترین تاثیر مربوط به عوامل «ارتفاع»، «سطح آب زیرزمینی»، «کاربری اراضی» و کمترین تاثیر مربوط به «فاصله از گسل» بود. در نهایت ارزیابی مدل از نظر قدرت پیش‌بینی با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) انجام شد، سطح زیر منحنی ۹۶ درصد، پیش‌بینی بسیار خوب مدل را تأیید کرد. نتایج این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی برای توسعه ساخت و سازها و کاربری‌های مختلف آینده مورد استفاده قرار گیرد. همچنین با توجه به امکان شناسایی مناطق و تاسیسات در معرض خطر آن‌ها، اقدامات بهنگام و مناسب برای پیشگیری از خسارات مالی و جانی انجام یابد.

واژگان کلیدی: فرونشست زمین، جنگل تصادفی، دشت شبستر

مقدمه

مخاطرات طبیعی از جمله عواملی هستند که سالیانه باعث ایجاد خسارت‌های جانی و مالی فراوانی در بیشتر مناطق جهان از جمله ایران می‌شوند. طبق تعاریف انستیتو زمین‌شناسی ایالات متحده، پدیده فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست تدریجی، رو به پایین سطح زمین است که می‌تواند دارای بردار جابجایی افقی اندک باشد که به خاطر تغییرات استرس در خاک می‌باشد (Adiyaman, 2012). این حرکت ناگهانی یا تدریجی زمانی اتفاق می‌افتد که لایه‌های زیرزمینی نتوانند در برابر فشار لایه‌های بالایی مقاومت کنند. در بیشتر موارد، فرونشست زمین یک فرآیند زمین‌شناسی کند است که با گذشت زمان قابل رویت می‌باشد (Ghorbanzadeh et al., 2018). این پدیده ممکن است به صورت طبیعی یا در اثر فعالیت‌های انسان‌ها ایجاد شود و تعادل طبیعی را از بین ببرد. خسارات ناشی از فرونشست معمولاً ترمیم ناپذیر، پرهزینه و مخرب می‌باشند که از آن جمله می‌توان به ایجاد شکاف در ساختمان‌ها و تخریب سازه‌های مهندسی، شکستگی خطوط لوله زیرزمینی، تخریب خاک‌های حاصل‌خیز کشاورزی و مرگ تدریجی آبخوان‌های آبرفتی اشاره کرد.

رخداد فرونشست در چند سال اخیر به عنوان یک بحران جدی در بسیاری از دشت‌های حاصل‌خیز کشور ما اتفاق افتاده و نگرانی‌های قابل توجهی را به وجود آورده است. این پدیده در مناطق مسکونی، صنعتی و کشاورزی می‌تواند آثار تخریبی فاجعه‌باری را به دنبال داشته باشد. فرونشست زمین نوعی خطر زمین‌شناسی است که می‌تواند بر اثر عوامل متنوعی مانند برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی، زلزله، فعالیت‌های آتشفشانی و سیلاب‌ها رخ دهد (Park et al., 2012). در ایران به دلیل کمبود بارندگی در طول چند سال گذشته و کاهش آب پشت سدها، برداشت آب از سفره‌های زیرزمینی برای تامین آب، افزایش یافته است که منجر به از بین رفتن منابع آب زیرزمینی و سست شدن خاک و فرونشست شده است. به طور طبیعی، آب زیرزمینی در منافذ آبخوان، مقداری از وزن زمین را تحمل می‌کند و هنگامی که آب زیرزمینی بیش از حد برداشت می‌شود، فشارهای منفذی در سفره افت می‌کند و فشرده شدن و متراکم شدن آبخوان اتفاق می‌افتد، هنگامی که آبخوان فشرده می‌شود باعث فرونشست، پایین آمدن یا ریزش زمین می‌شود (Abbasnejad et al., 2016). فرونشست‌های طبیعی بسیار کند بوده و در دوره‌های زمین‌شناسی بلندمدت توسعه می‌یابند و اثرات آن‌ها معمولاً جدی نیستند. برعکس، فرونشست‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی، تأثیرات آشکارتری در کوتاه‌مدت دارند.

مطالعات مربوط به فرونشست زمین را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی نمود؛ الف) شناسایی محدوده و نرخ فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه؛ با روش‌های گوناگونی نظیر ترازیابی دقیق، استفاده از سامانه‌های تعیین موقعیت مکانی GNSS یا GPS و فناوری تداخل‌سنجی راداری انجام می‌شود. ب) شناسایی عواملی که سبب فرونشست شده‌اند؛ شناسایی عوامل موثر در وقوع فرونشست از گام‌های مهم در بررسی و پیش‌بینی موفقیت‌آمیز این پدیده

است. از عوامل مؤثر شناخته شده در رخداد این پدیده می‌توان به برداشت بی‌رویه از سفره‌های زیرزمینی اشاره کرد که از عوامل اصلی ایجاد فرونشست در بیشتر دشت‌های ایران است. از مناطقی که در شرایط بحرانی ایجاد فروچاله‌ها و فرونشست قرار گرفته‌اند می‌توان به دشت کبودآهنگ همدان، ورامین نظرآباد، دشت تهران، دشت مشهد و نیشابور، دشت‌های استان کرمان، اصفهان و قزوین اشاره کرد (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۷). در شهرها نیز گسترش بی‌رویه و رشد افقی و عمودی شهرها، حفاری‌های متعدد برای تأسیسات شهری و تمرکز بسیاری از تأسیسات شهری در زیرزمین می‌تواند از علل نشست در شهرها باشند. قرار گرفتن شهرها در مناطق کارستی یا آهکی نیز از عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست می‌باشد. ج) پیش‌بینی فرونشست زمین به منظور ارائه راهکار مناسب جهت کاهش و یا جلوگیری از خسارات ناشی از آن: برای این منظور باید نقشه حساسیت به فرونشست زمین تهیه گردد. برای ایجاد نقشه حساسیت فرونشست زمین از روش‌های آماری مختلفی استفاده می‌شود. مدل‌های یادگیری ماشین امروزه عملکرد و دقت پیش‌بینی را افزایش داده‌اند. مزیت اصلی الگوریتم‌های یادگیری ماشین، توانایی آن‌ها در کشف یک رابطه پیچیده در داده‌ها که اغلب وجود دارد می‌باشد (Bui et al., 2018). از جمله الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توان به جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، رگرسیون لجستیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی اشاره کرد.

بررسی منابع پیشین

بررسی در منابع مختلف نشان می‌دهد، روش تداخل‌سنجی راداری با توجه به در دسترس بودن تصاویر برخی از ماهواره‌ها و کم بودن هزینه نسبت به سایر روش‌ها و دقت بالا کارایی بیشتری برای بررسی فرونشست زمین داشته است. تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه «شناسایی میزان فرونشست زمین با روش تداخل‌سنجی راداری» صورت گرفته است (عابدینی و نظری گزیک، ۱۴۰۲؛ قربانی محمدآبادی و همکاران، ۱۴۰۲). همچنین با گسترش نرم‌افزارهای پردازش تصاویر راداری و تلفیق آن با سیستم اطلاعات مکانی جهت «بررسی عوامل مؤثر بر فرونشست زمین» پژوهش‌های مختلفی مطرح شده است (صدری کیا، ۱۴۰۱؛ عابدینی و نظری گزیک، ۱۴۰۳). در ادامه برخی از تحقیقات داخلی و خارجی که به «پیش‌بینی پدیده فرونشست زمین» پرداخته‌اند معرفی می‌شوند.

- رحمانی و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از چهار روش یادگیری ماشین به مدل‌سازی حساسیت به فرونشست زمین در دشت کوهدشت در استان لرستان پرداختند. در این تحقیق ۱۱ فاکتور به عنوان ورودی مدل‌های یادگیری ماشین انتخاب شدند و با استفاده از برداشت میدانی نقاط در سطح دشت، مدل‌سازی حساسیت به فرونشست انجام شده است. برای ارزیابی نتایج مدل‌ها از نمودار ROC و سطح زیرمنحنی استفاده شده است. در این تحقیق مهم‌ترین معیارهای مؤثر نیز معرفی شدند. اطهری و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از مدل‌های رگرسیون خطی و رگرسیون درجه سه و استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری به بررسی فرونشست زمین در دشت ورامین پرداختند. برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی به عنوان عامل اصلی فرونشست زمین معرفی شد و

با مقایسه مدل‌های آماری مشخص گردید که مدل رگرسیون خطی دارای قدرت پیش‌بینی مطلوب‌تری نسبت به مدل رگرسیون درجه سه می‌باشد. محبی و همکاران (۲۰۲۱) خطر فرونشست زمین در دشت ورامین را براساس مدل‌سازی با منطق فازی در چهار مرحله پیش‌بینی کردند. مدل پوشش فازی گاما و مدل SVM به ترتیب به عنوان سازگارترین و بدترین مدل تعیین شدند. به این نتیجه رسیدند که کاهش سطح آب زیرزمینی سبب افزایش نرخ فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه شده است. حکیم و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از داده‌های باند C تصاویر Sentinel-1 با استفاده از تکنیک سری زمانی تداخل‌سنجی راداری به بررسی فرونشست زمین در دشت جاکارتا پرداختند. از رگرسیون لجستیک و الگوریتم‌های یادگیری ماشین و ۱۴ عامل برای مدل‌سازی حساسیت فرونشست زمین استفاده کردند. در این تحقیق برای صحت‌سنجی از منحنی ROC استفاده شده است. دیوتین بوی و همکاران (۲۰۱۸) حساسیت به فرونشست زمین را در کره جنوبی مورد ارزیابی قرار دادند و با استفاده از چهار مدل یادگیری ماشین رگرسیون لجستیک بیزی، بردار ماشین پشتیبان، مدل لجستیک و درخت تصمیم به بررسی حساسیت به فرونشست زمین با استفاده از ۸ عامل پرداختند. به این نتیجه رسیدند که مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند پتانسیل بسیار بالایی برای مدل‌سازی حساسیت به فرونشست زمین داشته باشند. ارزیابی با استفاده از منحنی ROC نشان داد که رگرسیون لجستیک بیزی دارای بیشترین دقت نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد.

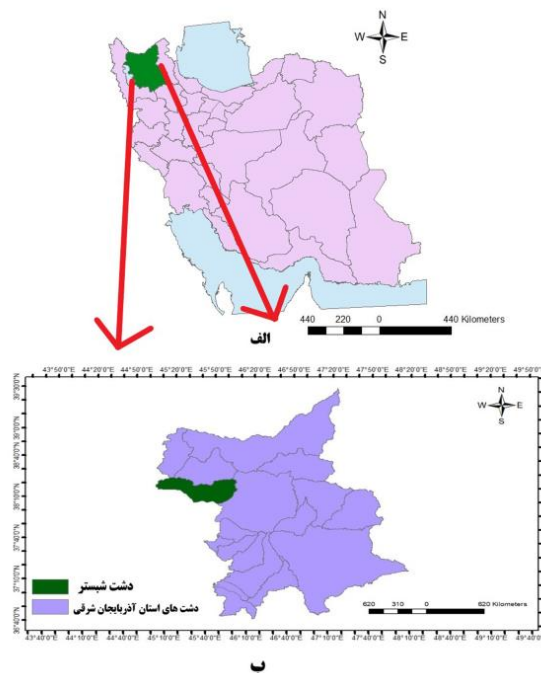
هدف پژوهش حاضر، مدل‌سازی حساسیت به فرونشست زمین در دشت شبستر، از مهم‌ترین دشت‌های استان آذربایجان شرقی با کاربری عمده کشاورزی است. در این مقاله جهت اولویت‌بندی و شناسایی مناطق مستعد فرونشست زمین از روش جنگل تصادفی که یک الگوریتم یادگیری ماشین قدرتمند است استفاده شده است. قبلاً کارایی این الگوریتم در مورد مدل‌سازی حساسیت به فرونشست زمین در دشت شبستر مورد مطالعه قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر از نقشه موجودی فرونشست دشت شبستر که با تحلیل سری زمانی تصاویر راداری تهیه شده و در دسترس بود، جهت صحت‌سنجی استفاده شده است و صحت پیش‌بینی نقشه حساسیت به فرونشست با منحنی ROC ارزیابی می‌شود. همچنین عوامل با بیشترین تأثیر بر روی حساسیت به فرونشست منطقه مورد مطالعه تعیین و تحلیل می‌شوند. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند در برنامه‌های مدیریتی لازم برای پیشگیری و کاهش اثرات فرونشست زمین در دشت شبستر مورد استفاده قرار گیرد.

در ادامه مقاله، منطقه مورد مطالعه، روش پژوهش و داده‌های مورد استفاده به‌عنوان ورودی‌های مدل و نحوه آماده‌سازی داده‌ها معرفی می‌شوند. سپس پیاده‌سازی مدل و ارزیابی آن شرح داده می‌شود و در نهایت تحلیل مدل‌سازی حساسیت به فرونشست زمین انجام می‌شود.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

دشت شبستر واقع در شمال غربی استان آذربایجان شرقی در موقعیت ۳۸ درجه، ۴ دقیقه و ۴۸ ثانیه شمالی و ۴۶ درجه، ۱۷ دقیقه و ۳۱ ثانیه شرقی در ارتفاع حدود ۱۴۰۰ متری از سطح دریا در ۶۰ کیلومتری غرب شهرستان تبریز واقع شده است. وسعت آن ۱۲۹۳ کیلومتر مربع است که مساحت آبخوان مورد بررسی ۴۹۵ کیلومتر مربع می‌باشد. میانگین بارش سالیانه دشت شبستر حدود ۳۰۰ میلیمتر و میانگین دمای سالیانه آن در حدود ۱۱ درجه سانتیگراد است. دشت شبستر در سال‌های اخیر به علت برداشت زیاد از آبهای زیرزمینی برای مصارف کشاورزی با افت شدید سطح آب زیرزمینی مواجه شده است. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه

داده‌ها و روش مورد استفاده

امروزه تکنیک‌های داده‌کاوی در زمینه پیش‌بینی مخاطرات طبیعی و زمین‌ساختی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند (گرایی، ۱۳۹۰). در فرآیند داده‌کاوی، از مدل‌ها و الگوریتم‌هایی مانند شبکه عصبی، درخت تصمیم، جنگل

تصادفی، ماشین بردار پشتیبان استفاده می‌شود که با استفاده از تکنیک‌های مدلسازی می‌توانیم الگوهای مفید در داده‌ها را با حداقل دخالت کاربر کشف کنیم. نکته مهم این است که در بین این مدل‌ها، بهترین وجود ندارد و با توجه به کارایی مدل مورد نظر، باید مدل مناسب انتخاب گردد.

جنگل تصادفی یک روش یادگیری نظارت شده است که از درخت‌های چندگانه در طبقه‌بندی استفاده می‌کند. این الگوریتم در ابتدا توسط لئویرایمن و آدلکاتلر در سال ۱۹۸۴ توسعه داده شد (Breiman et al., 1984). الگوریتم جنگل تصادفی با تغییر مداوم عوامل موثر و مرتبط با هدف، سبب ایجاد تعداد زیادی درخت تصمیم‌گیری شده، سپس تمام درختان به منظور پیش‌بینی با هم ترکیب می‌گردند (Vorpahl et al., 2012). در حال حاضر یکی از بهترین الگوریتم‌های یادگیری است و برخلاف مدل‌های کلاسیک نظیر رگرسیون که تنها بر یک مدل تکیه دارند، جنگل تصادفی با استفاده از صدها و هزاران درخت از اطلاعات بیشتری در داده‌ها استفاده می‌کند، تا استنباط بهتری از متغیرها به دست آید (نوری و همکاران، ۱۳۹۳). این روش روی مجموعه داده‌های بزرگ بسیار خوب عمل می‌کند (حسین نژاد مکی و همکاران، ۱۴۰۱).

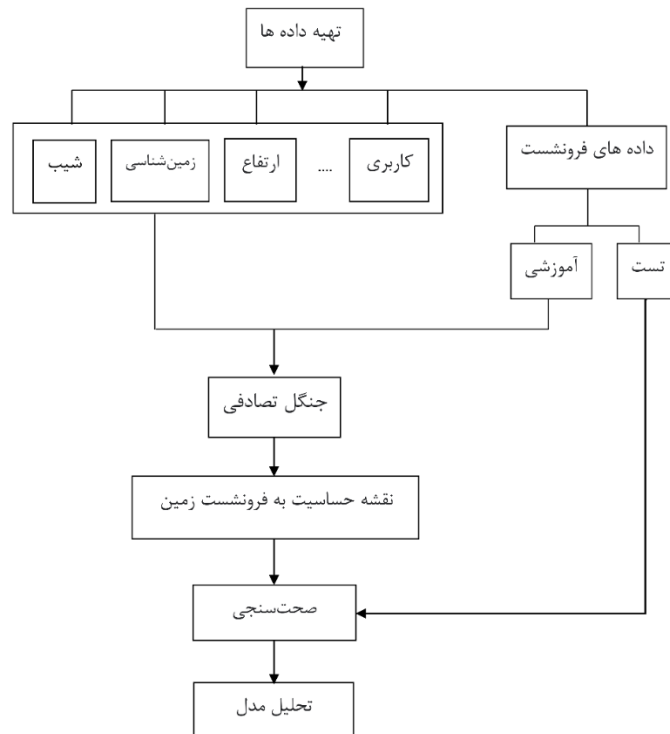
قدرت پیش‌بینی جنگل تصادفی با افزایش قدرت درختان مستقل و کاهش همبستگی بین آنها افزایش می‌یابد. این الگوریتم از تمام داده‌های موجود برای رویاندن درخت استفاده نکرده و تنها از ۷۰ درصد داده‌ها استفاده می‌کند که به آن داده آموزشی گفته می‌شود. در فرآیند آموزش، در هر سری داده‌های اصلی درخت براساس انتخاب تصادفی ساخته می‌شوند. انتخاب متغیر یا عوامل موثر برای تشکیل یک گره در ساخت درخت به صورت تصادفی انجام می‌شود و به این شکل درخت تصمیم به بزرگ‌ترین اندازه ممکن رویانده می‌شود. ۳۰ درصد از داده‌های باقیمانده نیز برای ارزیابی درخت برآزش شده استفاده می‌شود. این فرآیند چندین بار تکرار شده و میانگین تمام مقادیر پیش‌بینی شده به عنوان پیش‌بینی نهایی الگوریتم استفاده می‌شود (Simpson et al., 1994). مسئله مهم در جنگل تصادفی، انتخاب متغیر یا عوامل موثر است. این کار منجر به کاهش ابعاد داده‌ها، محاسبات کمتر و هزینه پایین می‌شود. محاسبه متغیر با اهمیت بر اساس میانگین کاهش ضریب جینی و میانگین کاهش دقت است. در واقع، ضریب جینی نوعی خطاست که برای تمام متغیرها باید محاسبه گردد و با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌گردد.

$$Gini(t) = 1 - \sum_{i=1}^c p_i^2 \quad (1)$$

p_i در رابطه (۱) مقدار احتمال کلاس‌بندی را نشان می‌دهد و $Gini(t)$ مقدار ضریب جینی که برای تمام متغیرهای t باید محاسبه گردد و هر کدام که کمترین مقدار را داشته باشد به عنوان ریشه در نظر گرفته می‌شود.

روش پژوهش

روند کلی انجام تحقیق در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل ۲. روند کلی مراحل کلی تحقیق

همان گونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، مراحل تحقیق عبارتند از: الف) آماده سازی نقشه موجودی فرونشست منطقه مورد مطالعه ب) انتخاب و آماده سازی مجموعه ای از عوامل موثر بر فرونشست زمین ج) انجام مدلسازی با جنگل تصادفی برای تهیه نقشه حساسیت به فرونشست زمین د) صحت سنجی مدل به دست آمده با استفاده از نقشه موجودی فرونشست منطقه مورد مطالعه و ه) تحلیل مدل و تعیین طبقات دخیل در مناطق با حساسیت فرونشست زیاد.

مطالعات کتابخانه ای در ارتباط با موضوع مورد بررسی انجام گردید. در این پژوهش بر اساس مطالعات انجام شده هشت عامل سطح آب های زیرزمینی، شیب، ارتفاعات، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، جهت شیب، کاربری اراضی و زمین شناسی انتخاب شده و به عنوان عوامل موثر بر فرونشست دشت شبستر مورد استفاده قرار می گیرند. نقشه های هریک از عوامل ذکر شده در بستر سیستم اطلاعات مکانی آماده سازی شد. لازم به ذکر می باشد تمامی نقشه های مورد استفاده در سیستم مختصات WGS_1984_UTM_Zone_38N و سائز

پیکسل‌ها ۲۰*۲۰ متر آماده‌سازی شدند. مدلسازی الگوریتم جنگل تصادفی با معرفی داده‌های عوامل موثر و نقشه موجودی فرونشست در برنامه پایتون اجرا شد. درجه اهمیت عوامل موثر بر وقوع فرونشست مشخص شدند. نهایتاً نقشه نهایی پهنه‌بندی فرونشست برای منطقه مورد مطالعه تهیه شد. نقشه بدست آمده به پنج طبقه حساسیت خیلی کم، حساسیت کم، حساسیت متوسط، حساسیت زیاد و حساسیت خیلی زیاد پهنه‌بندی شد. به منظور ارزیابی نتایج نیز از منحنی ROC استفاده شد.

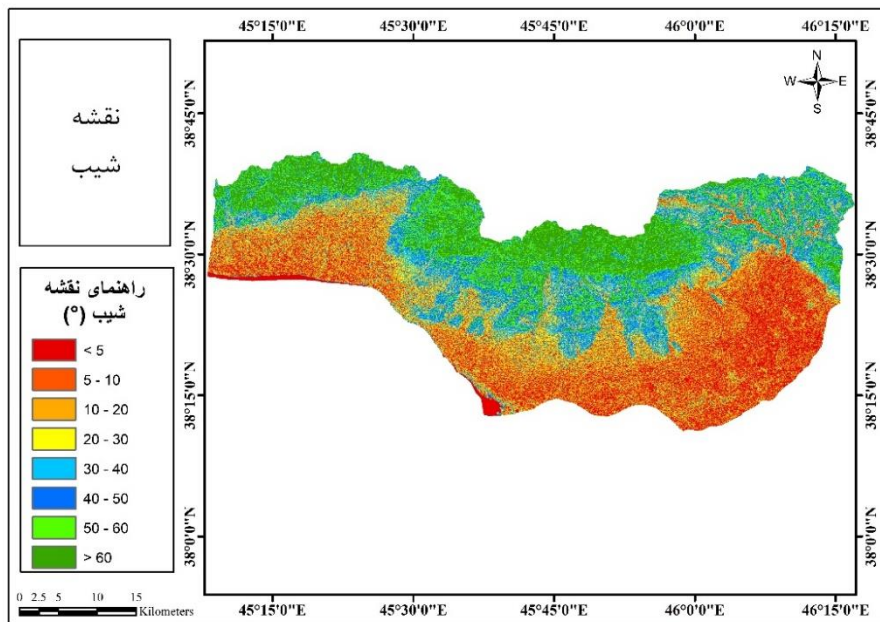
در این پژوهش جهت ترسیم لایه‌های اطلاعاتی پژوهش و تلفیق آنها و تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت فرونشست، محیط ArcMap 10.7.1 و برای تهیه اطلاعات جهت انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری محیط Excel مورد استفاده قرار گرفته است و از محیط پایتون جهت کدنویسی و پیاده‌سازی الگوریتم جنگل تصادفی و ارزیابی مدل‌ها استفاده شده است.

داده‌ها

در ادامه لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده معرفی می‌شوند. همه لایه‌ها برای انجام آنالیزها به فرمت رستری تبدیل شده‌اند.

نقشه شیب

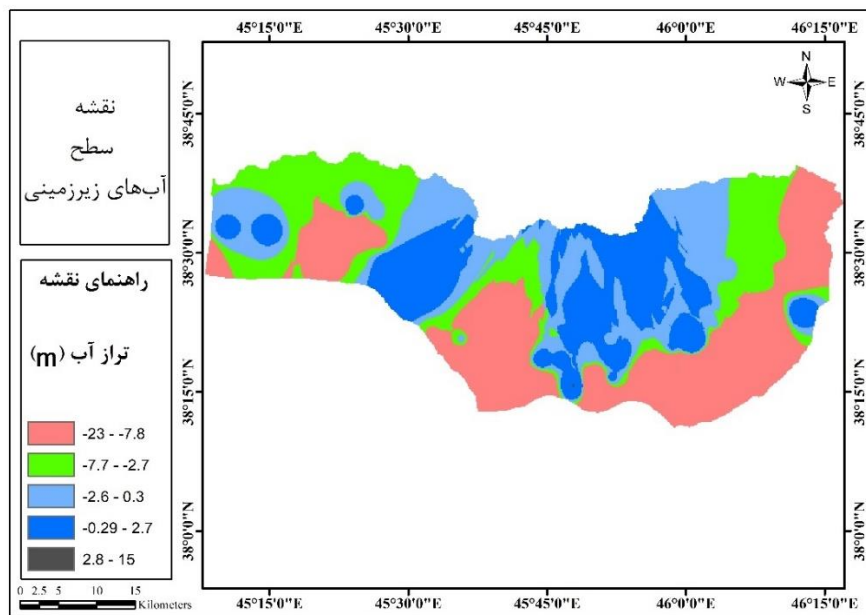
جهت ایجاد نقشه شیب از مدل رقومی ارتفاع منطقه استفاده گردید. شکل (۳) نقشه آماده‌سازی شده شیب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است بیشترین مساحت منطقه در شیب‌های کم واقع گردیده است.



شکل ۳. نقشه شیب

نقشه سطح آب‌های زیرزمینی

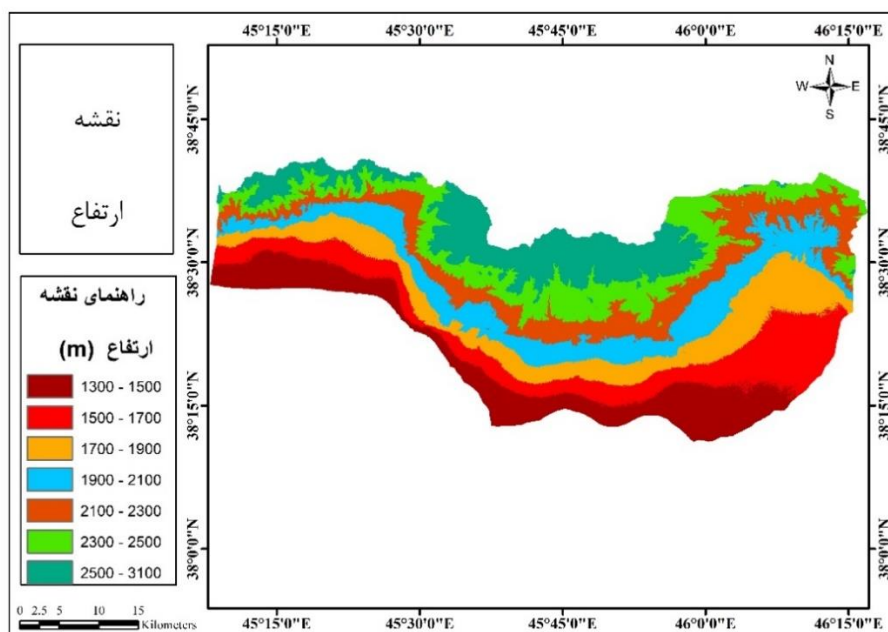
کمبود منابع آب قابل دسترس در جهان یکی از چالش‌های اساسی پیش‌روی بشر است. در بخش‌هایی از ایران منابع آب زیرزمینی به‌عنوان تنها منبع تامین آب جهت مصارف کشاورزی، شرب و صنعتی محسوب می‌شود. خشکسالی، رشد روزافزون جمعیت و توسعه کشاورزی و صنعت باعث تشدید بهره‌برداری از این منابع شده که این امر باعث افت ممتد سطح آب‌های زیرزمینی و متراکم شدن لایه‌ها شده است. تراکم سفره بر خصوصیات هیدرودینامیکی آن تاثیر گذاشته و باعث کاهش نفوذپذیری و افت ضریب ذخیره آن خواهد شد. در این صورت سفره آب زیرزمینی از حالت دینامیک خارج شده و دشت مورد نظر جزو دشت‌های بحرانی قرار می‌گیرد. چنین دشت‌هایی مستعدترین مناطق برای وقوع پدیده فرونشست زمین می‌باشند. دشت شبستر یکی از دشت‌های پرخطر در استان آذربایجان شرقی می‌باشد. در این مقاله سطح آب‌های زیرزمینی به ۵ طبقه، کلاس‌بندی شد. شکل (۴) نقشه آماده‌سازی شده سطح آب‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نقشه سطح آب‌های زیرزمینی

نقشه ارتفاع

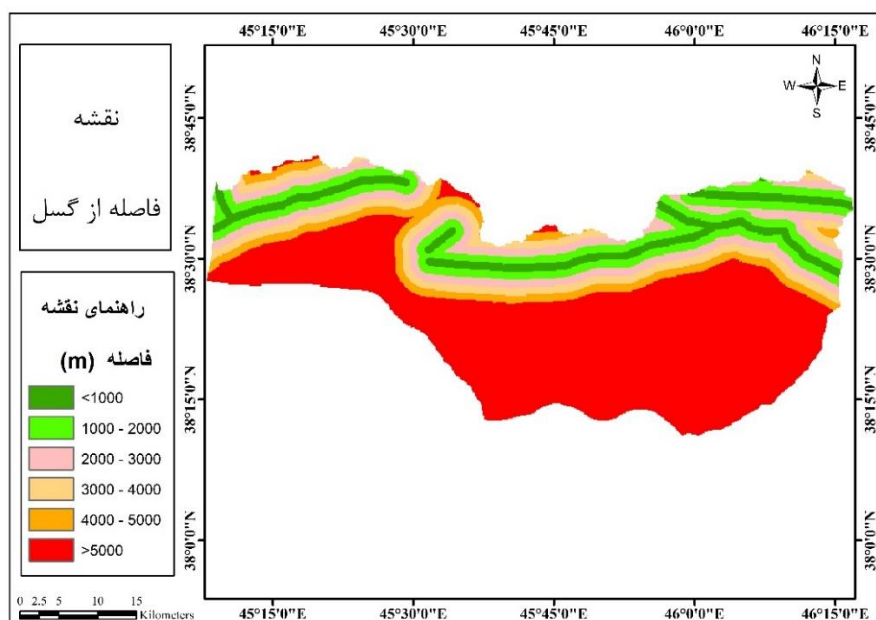
ارتفاع زمین یکی دیگر از عوامل موثر در وقوع فرونشست می‌باشد که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. ارتفاع زمین در دشت شبستر به طبقه‌های ۱۳۰۰-۱۵۰۰ و ۱۵۰۰-۱۷۰۰ و ۱۷۰۰-۱۹۰۰ و ۱۹۰۰-۲۱۰۰ و ۲۱۰۰-۲۳۰۰ و ۲۳۰۰-۲۵۰۰ و ۲۵۰۰-۳۱۰۰ متر کلاس‌بندی شدند. شکل (۵) نقشه آماده‌سازی شده ارتفاع‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نقشه ارتفاع

نقشه فاصله از گسل

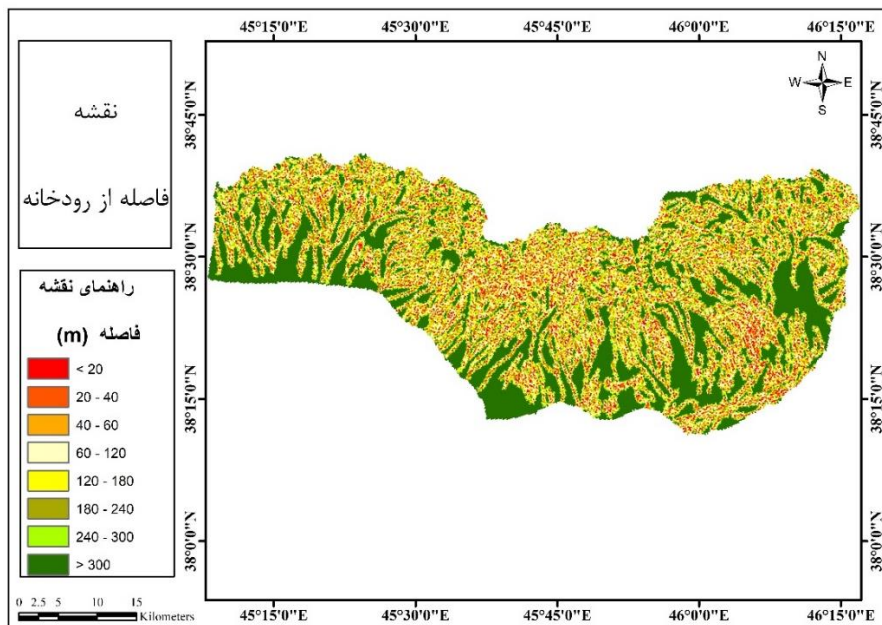
لایه گسل‌های فعال دشت شبستر تهیه گردید. نقشه فاصله از گسل هم به ۶ طبقه، کلاس‌بندی گردید. شکل (۶) نقشه آماده‌سازی شده فاصله از گسل را نمایش می‌دهد.



شکل ۶. نقشه فاصله از گسل

نقشه فاصله از رودخانه

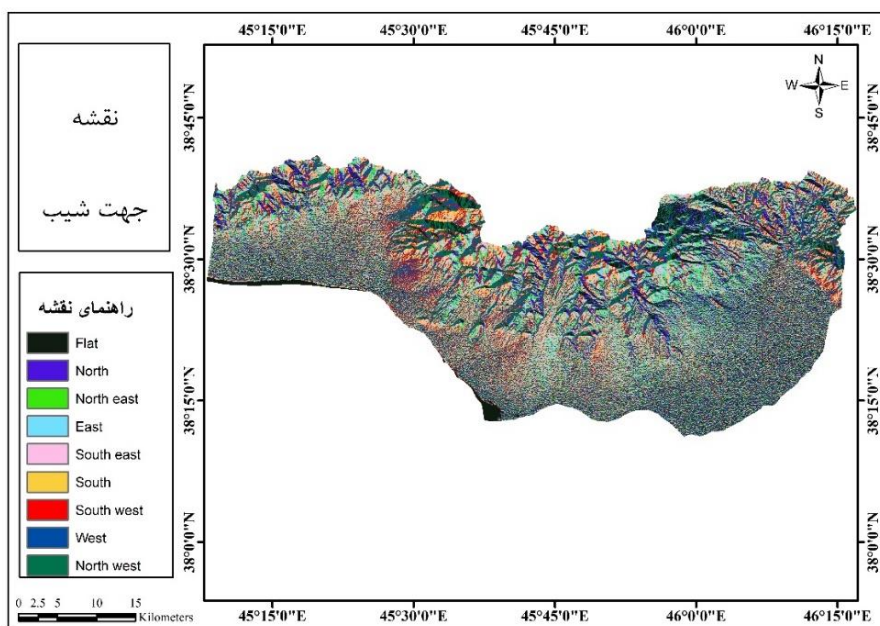
رودخانه‌ها از منابع آب‌های سطحی هستند که در تعدیل سفره‌های آب زیرزمینی و در نتیجه فرونشست زمین نقش موثری دارند. فاصله از رودخانه در این تحقیق به ۶ طبقه، کلاس‌بندی گردید. شکل (۷) نقشه آماده‌سازی شده فاصله از رودخانه را نشان می‌دهد.



شکل ۷. نقشه فاصله از رودخانه

نقشه جهت شیب

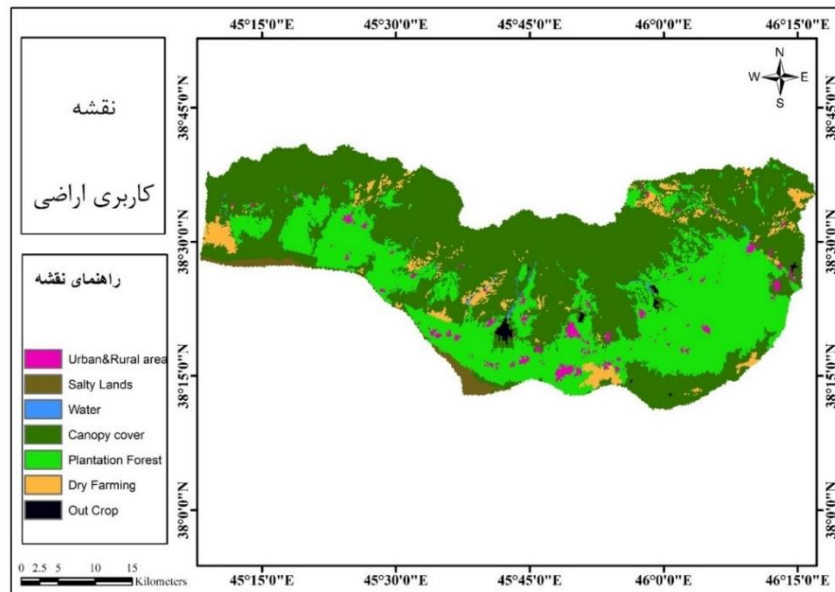
جهت شیب یکی از عوامل تاثیرگذار بر وقوع پدیده فرونشست می‌باشد. جهت شیب با عواملی از قبیل میزان دریافت نورخورشید، بادهای خشک‌کننده، بارندگی (درجه اشباع) در ارتباط است که می‌تواند بر وقوع فرونشست تاثیر بگذارد. جهت دامنه می‌تواند منعکس کننده میزان پوشش گیاهی و رطوبت خاک باشد که به نوبه خود می‌تواند در مقاومت خاک و حساسیت به فرونشست موثر باشند. تعیین میزان فرونشست بر روی جهات مختلف دامنه، با در نظر گرفتن توزیع مساحت هر جهت با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) امکانپذیر است. نقشه جهت شیب به ۹ طبقه مسطح، شمالی، شمال شرقی، شرقی، جنوب شرقی، جنوبی، جنوب غربی، غربی، شمال غربی کلاس‌بندی شده است. شکل (۸) نقشه آماده‌سازی شده جهت شیب را نشان می‌دهد.



شکل ۸. نقشه جهت شیب

نقشه کاربری اراضی

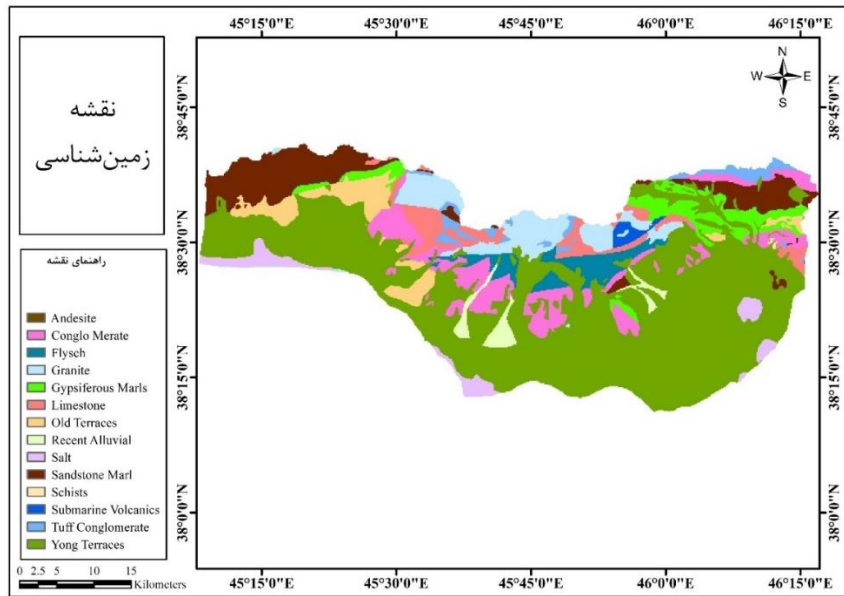
چگونگی و نحوه استفاده از زمین و فعالیت‌های استقرار یافته در هر بخش آن کاربری اراضی نامیده می‌شود. کاربری‌های مختلف اثرات مختلفی بر وقوع فرورفتگی زمین دارند. به عنوان مثال، در کاربری کشاورزی، برداشت آب‌های زیرزمینی می‌تواند سبب فرورفتگی شود یا در محل سازه‌هایی مانند سدها، وزن ناشی از این سازه‌ها می‌تواند سبب تراکم خاک و نشست سطح زمین شود (منافی‌آذر و همکاران، ۲۰۱۹). برای تهیه نقشه کاربری اراضی از نقشه کاربری اراضی اداره منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی استفاده شده است. کاربری اراضی منطقه به ۷ کلاس، محیط‌های شهری و روستایی، شوره‌زار، زراعت آبی، تاج پوشش (این لایه که سقف جنگل است از شبکه شاخه‌ها و درختان تشکیل شده است و میزان دسترسی به نور در این لایه بسیار زیاد است، اما خود این لایه پوششی را می‌سازد که جلوی رسیدن نور به گیاهان پایینی را می‌گیرد)، درختکاری، زمین‌های دیم و اراضی فاقد پوشش گیاهی، طبقه‌بندی شده است. شکل (۹) نقشه آماده‌سازی شده کاربری اراضی را نشان می‌دهد.



شکل ۹. نقشه کاربری اراضی

نقشه زمین شناسی

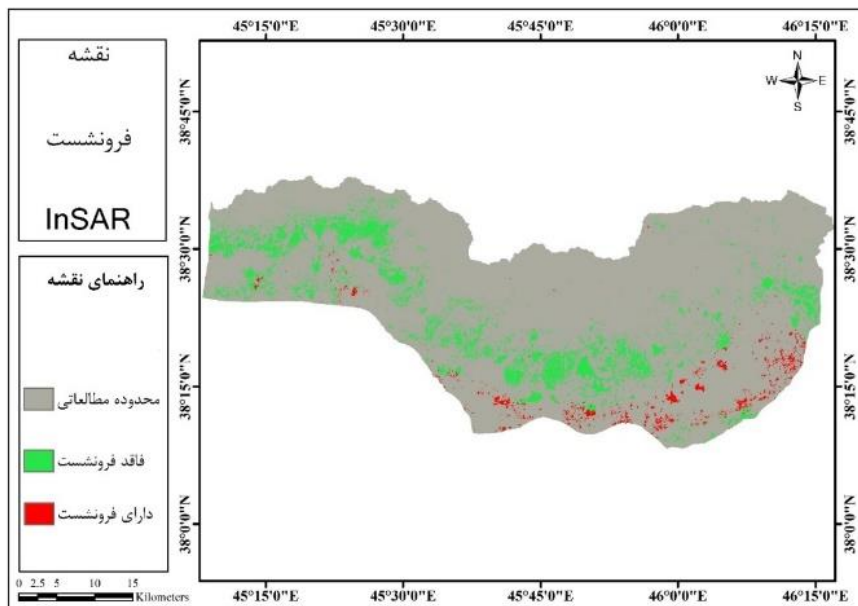
زمین شناسی یکی از عوامل مهم در مطالعات فرونشست می باشد، زیرا واحدهای زمین شناسی مختلف درجه حساسیت متفاوتی نسبت به وقوع فرونشست دارند و تغییرات سنگ شناسی منجر به تفاوت در مقاومت و نفوذپذیری سنگ ها و خاک ها می شود. با توجه به نقشه های زمین شناسی سازمان زمین شناسی کشور نقشه جنس زمین شناسی در منطقه مورد مطالعه به ۱۴ واحد لیتولوژیکی متمایز کلاس بندی شد. شکل (۱۰) نقشه آماده سازی شده زمین شناسی را نشان می دهد. طبقه های لایه سنگ شناسی به ترتیب عبارتند از: آندزیت، کنگلومرا، فلیش، گرانیت، رسوبات کوارترنری، لایم استون، تخته سنگ قدیمی، آبرفتی، نمکی، مارون رسی، شیستی، سن بازالتی، آتشفشانی کنگلومرا و تخته سنگ جدید.



شکل ۱۰. نقشه زمین شناسی

نقشه موجودی فرونشست

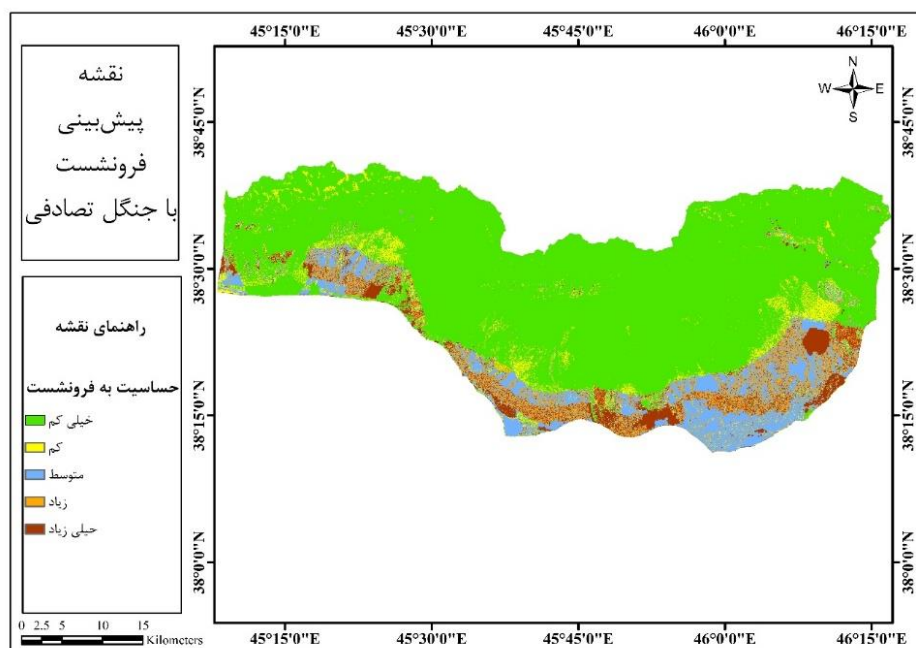
صدری کیا و کاظمی پور (۱۴۰۳) با استفاده از روش سری زمانی مبتنی بر تداخل سنجی راداری با استفاده از روش کوتاه ترین خط مبنا (SBAS) نرخ فرونشست زمین در دشت شبستر را تعیین نمودند. در این مقاله بر اساس نتایج مطالعه فوق‌الذکر نقشه موجودی فرونشست که نقاط دارای فرونشست و نقاط فاقد فرونشست را در دشت شبستر نشان می‌دهد تهیه شد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. نقشه موجودی فرونشست

یافته‌ها و بحث

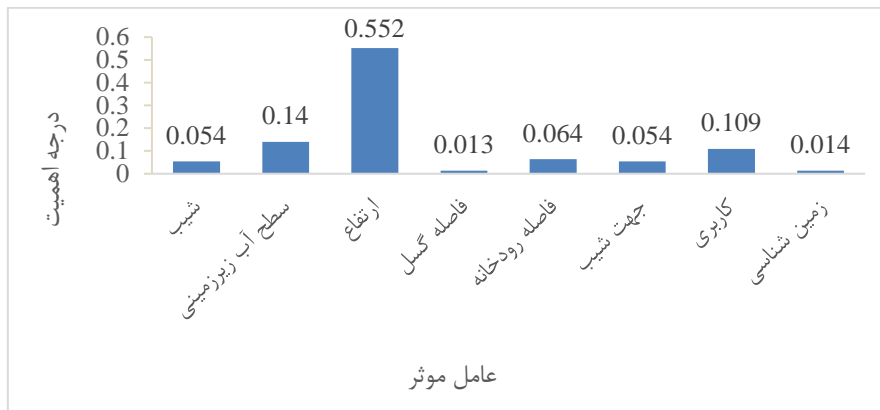
مدلسازی حساسیت به فرونشست بر اساس الگوریتم جنگل تصادفی انجام شد. تمامی داده‌ها هم‌مقیاس شدند. با استفاده از کتابخانه split داده‌ها به دو دسته آموزش (۷۰٪) و تست (۳۰٪) به صورت تصادفی تقسیم‌بندی شدند. مقدار پیش‌بینی به‌دست آمده برای هر پیکسل به محیط ArcGIS وارد شد. در نهایت نقشه حساسیت فرونشست حاصل با استفاده از روش طبقه‌بندی Quantile به ۵ کلاس حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد که در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲. نقشه پیش‌بینی فرونشست زمین با روش جنگل تصادفی

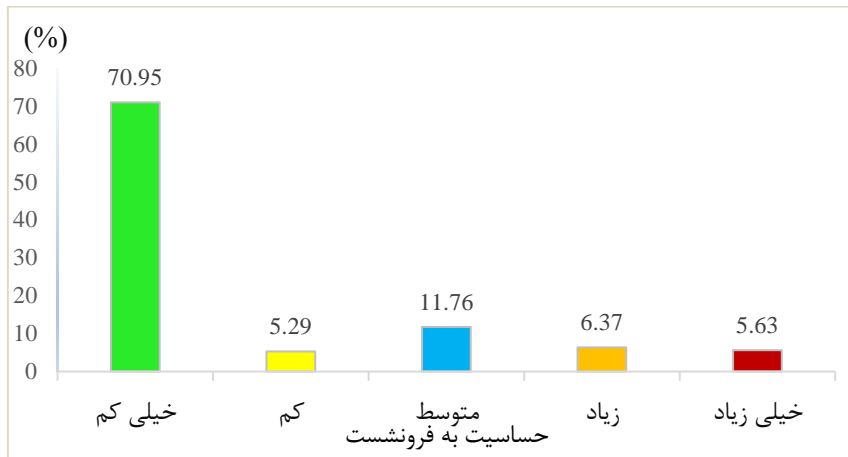
همان‌گونه که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، قسمت جنوبی منطقه مورد مطالعه دارای بیشترین حساسیت به فرونشست زمین می‌باشد.

طبق مدلسازی انجام‌شده درجه اهمیت هر عامل از نظر میزان تاثیر آن بر حساسیت به فرونشست زمین تعیین شد که در شکل (۱۳) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین تاثیر به ترتیب مربوط به عوامل «ارتفاع»، «سطح آب زیرزمینی» و «کاربری اراضی» می‌باشد. سایر عوامل در درجات بعدی اهمیت قرار گرفته‌اند. کمترین درجه اهمیت نیز مربوط به عامل «فاصله از گسل» می‌باشد.



شکل ۱۳. تاثیر عوامل در فرونشست در مدل‌سازی جنگل تصادفی

شکل (۱۴) نمایش دهنده مساحت هر یک از کلاس‌های حساسیت به فرونشست در مدل جنگل تصادفی می‌باشد.



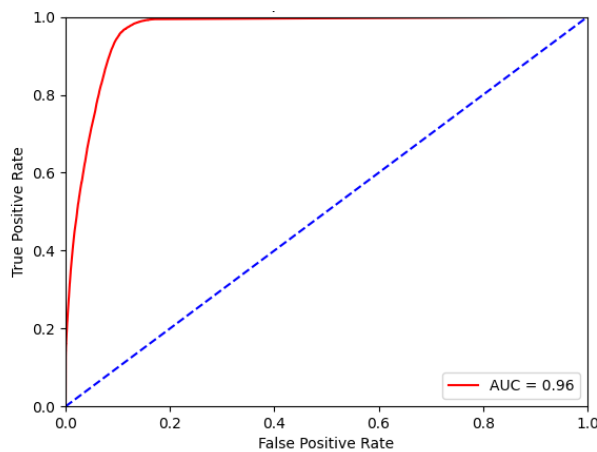
شکل ۱۴. نتایج پهنه بندی حساسیت به فرونشست زمین با روش جنگل تصادفی

صحت‌سنجی مدل

منحنی ROC یکی از مفیدترین روش‌ها در شناسایی قدرت پیش‌بینی سیستم‌هاست. سطح زیر این منحنی بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقوع و عدم وقوع رخدادها است. چنانچه مساحت زیر منحنی ROC بین ۰/۹ تا ۱ باشد عملکرد مدل عالی می‌باشد، چنانچه بین ۰/۸ تا ۰/۹ باشد نشان از عملکرد خوب مدل دارد. در حالتی که مساحت زیر منحنی ROC بین ۰/۷ تا ۰/۸ باشد، عملکرد مدل

متوسط و ۰/۶ تا ۰/۷، عملکرد مدل بد و اگر ۰/۵ تا ۰/۶ باشد عملکرد مدل خیلی بد است. ایده آل ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد.

در این تحقیق برای ارزیابی نقشه حساسیت به فرونشست از ۳۰ درصد باقی مانده از نقاط فرونشست که برای مدلسازی استفاده نشده بود، استفاده شد. با توجه به نتایج بدست آمده، عملکرد پیش بینی مدل در کلاس عملکرد عالی قرار گرفت (شکل ۱۵). سطح زیر منحنی (۹۶٪) در شکل (۱۵) نشان می دهد الگوریتم جنگل تصادفی با دقت بسیار بالایی توانسته است پیش بینی را انجام دهد.



شکل ۱۵. منحنی ROC جهت پیش بینی فرونشست در مدل جنگل تصادفی

تحلیل عوامل موثر در مدلسازی حساسیت به فرونشست زمین با جنگل تصادفی در

دشت شبستر

تحلیل های لازم در مورد اینکه کدام طبقات از هر عامل بیشترین تأثیر را بر فرونشست در مناطق حساسیت «زیاد» و «خیلی زیاد» داشته اند، انجام شد تا طبقاتی از عوامل موثر که دارای بیشترین نقش در نواحی با حساسیت فرونشست زیاد و خیلی زیاد بوده اند شناسایی شوند. نتایج در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مساحت هر یک از طبقات عوامل موثر در مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد

درصد مساحت	طبقه	عامل مؤثر
۳۸/۲۳	< ۵°	شیب
۲۷/۶۷	۵° - ۱۰°	
۱۹/۸۵	۱۰° - ۲۰°	
۱۰/۵۶	۲۰° - ۳۰°	
۲/۹۹	۳۰° - ۴۰°	
۰/۵۴	۴۰° - ۵۰°	
۰/۱۱	۵۰° - ۶۰°	
۰/۰۱	> ۶۰°	
۷۶/۵۴	-۲۳ - -۷/۸	سطح آب‌های زیرزمینی
۸/۶۷	-۷/۷ - -۲/۷	
۳/۳۶	-۲/۶ - ۰/۳	
۱۱/۳۹	۰/۲۹ - ۲/۷	
۰/۰۳	۲/۸ - ۱۵	
۴۹/۰۳	۱۳۰۰ - ۱۵۰۰	ارتفاعات
۴۸/۴۵	۱۵۰۰ - ۱۷۰۰	
۰/۹۱	۱۷۰۰ - ۱۹۰۰	
۱/۱۰	۱۹۰۰ - ۲۱۰۰	
۰/۱۰	۲۱۰۰ - ۲۳۰۰	
۰/۳۰	۲۳۰۰ - ۲۵۰۰	
۰/۰۸	۲۵۰۰ - ۳۱۰۰	
۰/۷۹	< ۱۰۰۰	فاصله از گسل
۰/۵۸	۱۰۰۰ - ۲۰۰۰	
۰/۳۱	۲۰۰۰ - ۳۰۰۰	
۰/۸۳	۳۰۰۰ - ۴۰۰۰	
۰/۹۵	۴۰۰۰ - ۵۰۰۰	
۹۶/۵۳	> ۵۰۰۰	
۷/۰۸	< ۲۰	فاصله از رودخانه
۵/۹۳	۲۰ - ۴۰	
۴/۵۴	۴۰ - ۶۰	
۱۴/۷۰	۶۰ - ۱۲۰	
۱۲/۸۳	۱۲۰ - ۱۸۰	
۷/۷۳	۱۸۰ - ۲۴۰	
۹/۲۴	۲۴۰ - ۳۰۰	
۳۷/۹۲	> ۳۰۰	

۱۵/۵۷	مسطح	جهت شیب
۱۰/۸۱	شمالی	
۱۰/۰۸	شمال شرقی	
۹/۴۲	شرقی	
۹/۸۵	جنوب شرقی	
۸/۳۶	جنوبی	
۹/۹۵	جنوب غربی	
۱۲/۰۳	غربی	
۱۳/۹۱	شمال غربی	
۸/۷۷	تاج پوشش	کاربری اراضی
۷/۲۶	زمین های دیم	
۷۸/۹۷	درختکاری	
۰/۰۹	اراضی فاقد پوشش گیاهی	
۱/۸۹	محیط های شهری و روستایی	
۰/۰۱	زراعت آبی	
۲/۹۸	شوره زار	زمین شناسی
۰/۳۴	سنگ مارون رسی	
۰/۰۱	سنگ آتشفشانی کنگلومرا	
۰/۳۱	رسوبات کوارترنی	
۰/۱۸	سنگ گرانیت	
۰/۰۱	سنگ لایم استون	
۰/۲۷	سنگ کنگلومرا	
۰/۲۲	تخته سنگ قدیمی	
۹۱/۰۱	تخته سنگ جدید	
۰	سنگ بازالتی	
۷/۱۰	نمک	
۰	سنگ شیستی	
۰/۰۵	سنگ فلیش	
۰	سنگ آندزیت	
۰/۴۷	سنگ آبرفتی	

مطابق جدول (۱) بررسی طبقات عوامل موثر که بیشترین مساحت و در نتیجه بیشترین نقش را در مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد فرونشست داشته اند، نشان می دهد که ۳۸/۲۳ درصد این مناطق در طبقه شیب «کمتر از ۵°» واقع شده اند و ۲۷/۶۷ درصد این مناطق در طبقه شیب های «۱۰° - ۵°» قرار دارند. در عامل سطح آب های زیرزمینی ۷۶/۵۴ درصد این مناطق در طبقه «۷/۸ - -۲۳ - متر» و ۱۱/۳۹ درصد مناطق حساسیت زیاد

و خیلی زیاد در طبقه «۲/۷ - ۰/۲۹ متر» واقع می‌باشند. در عامل ارتفاعات حدود ۴۹ درصد این مناطق در طبقه «۱۵۰۰ - ۱۳۰۰ متر» واقع شده اند و ۴۸/۴۵ درصد از این مناطق از طبقه «۱۷۰۰ - ۱۵۰۰ متر» می‌باشند. در عامل فاصله از گسل ۹۶/۵۳ درصد این مناطق از طبقه «فاصله بیشتر از ۵۰۰۰ متر» و حدود ۱ درصد مناطق خطر زیاد و خیلی زیاد نیز از طبقه «۵۰۰۰ - ۴۰۰۰ متر» می‌باشند. در عامل فاصله از رودخانه حدود ۳۸ درصد در طبقه «بیشتر از ۳۰۰ متر» و ۱۴/۷۰ درصد از این مناطق از طبقه «۱۲۰ - ۶۰ متر» واقع می‌باشند. در عامل جهت شیب ۱۵/۵۷ درصد محدوده خطر زیاد و خیلی زیاد در طبقه «مسطح» واقع شده است و حدود ۱۴ درصد از این مناطق از طبقه «شمال‌غربی» می‌باشند. در مورد عامل کاربری اراضی نیز حدود ۷۹ درصد مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد از طبقه «درختکاری» و ۸/۷۷ درصد از این مناطق از طبقه «تاج پوشش» می‌باشند. بررسی طبقات عامل زمین‌شناسی نیز نشان داد که در محدوده خطر زیاد و خیلی زیاد ۹۱ درصد مناطق از طبقه «تخته سنگ جدید» و حدود ۷ درصد از طبقه «نمکزار» می‌باشند.

نتیجه‌گیری

به منظور مدیریت و کاهش خطرات ناشی از فرونشست نیاز است تا منطقه‌های مستعد فرونشست از نظر حساسیت به فرونشست پهنه‌بندی شوند و در هر قسمت متناسب با میزان خطر و حساسیت به وقوع فرونشست، اقدامات مدیریتی پیشگیرانه صورت گیرد. تاکنون روش‌های مختلف داده‌کاوی برگرفته از علوم مختلفی همچون آمار، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، جهت شناسایی الگو و پیش‌بینی مدل‌های فرونشست برای یافتن الگوها و وابستگی‌هایی که تحلیل‌های ساده و معمول آماری قادر به انجام آن نیستند، استفاده شده است. در این مقاله برای ارزیابی حساسیت به فرونشست زمین از روش جنگل تصادفی که یکی از الگوریتم‌های قدرتمند یادگیری ماشین است و پیش از این در دشت شبستر مورد مطالعه قرار نگرفته بود، استفاده شد.

نقشه‌های مربوط به عوامل موثر شامل لایه سطح آب‌های زیرزمینی، لایه شیب، لایه ارتفاعات، لایه فاصله از گسل، لایه فاصله از رودخانه، لایه جهت شیب، لایه کاربری اراضی و لایه زمین‌شناسی تهیه گردیدند. ارتباط بین عوامل موثر در وقوع فرونشست با فرونشست‌های آموزشی از طریق مدل جنگل تصادفی مورد بررسی قرار گرفت و نقشه حساسیت به فرونشست تهیه گردید. در نقشه حاصل، مناطق در معرض خطر فرونشست به پنج کلاس حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی شدند. حساسیت زیاد به پدیده فرونشست در مناطق جنوبی دشت شبستر تایید شد. همچنین مشخص شد که در منطقه مورد مطالعه بیشترین تاثیر مربوط به عوامل ارتفاع زمین، کاربری اراضی و سطح آب‌های زیرزمینی می‌باشد و عوامل فاصله از رودخانه، جهت شیب، شیب، زمین‌شناسی و فاصله از گسل به ترتیب در درجات پایین‌تر اهمیت قرار گرفتند. صحت‌سنجی

مدلسازی انجام شده با جنگل تصادفی با استفاده از منحنی ROC انجام شد، سطح زیر منحنی ۹۶ درصد قدرت پیش‌بینی خیلی خوب و کارایی این مدلسازی را برای ارزیابی حساسیت به فرونشست در منطقه مورد مطالعه نشان داد. همچنین بررسی مناطق با حساسیت فرونشست خیلی زیاد و زیاد نشان داد که در لایه ارتفاع، اکثریت این مناطق در طبقه‌های با کمترین ارتفاع یعنی ۱۵۰۰ - ۱۳۰۰ و ۱۷۰۰-۱۵۰۰ متر واقع بودند و با افزایش ارتفاع، میزان احتمال فرونشست کاهش و به صفر می‌رسد. همچنین نشان داده شد که در شیب‌های زیاد احتمال وقوع فرونشست بسیار پایین و حتی صفر می‌باشد. در لایه کاربری اراضی، طبقه درختکاری بیشترین درصد را در مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد به خود اختصاص داد. این نشان‌دهنده اهمیت بررسی و بازبینی الگوی مصرف آب در مناطق با کاربری درختکاری، جهت جلوگیری از وارد شدن خسارت‌های ناشی از فرونشست به این مناطق است. در مورد سطح آب‌های زیرزمینی اکثریت محدوده حساسیت زیاد و خیلی زیاد مربوط به طبقه با پایین‌ترین تراز آب یعنی $۷/۸ - ۲۳$ متر بوده است. این موضوع بیانگر ارتباط مستقیم بین افت سطح آب‌های زیرزمینی و احتمال وقوع فرونشست در دشت شبستر می‌باشد. همچنین در مورد جنس زمین‌شناسی، اکثریت مناطق با حساسیت فرونشست زیاد و خیلی زیاد از نوع تخته سنگ جدید می‌باشند که لازم است جهت جلوگیری از خسارت‌های جانی و مالی ناشی از فرونشست، در برنامه‌ریزی برای ساخت و سازها مورد توجه قرار گیرد. در مورد لایه فاصله از گسل نیز با توجه به اینکه قسمت عمده مناطق با حساسیت زیاد و خیلی زیاد فرونشست، دارای فاصله‌های بیشتر از ۵۰۰۰ متر از گسل‌ها بودند، رابطه مستقیم بین فاصله از گسل و احتمال وقوع فرونشست در دشت شبستر تأیید شد.

نتایج این مطالعه می‌تواند، جهت بکارگیری روش‌های مدیریتی مناسب و اجرای برنامه‌های موثر و بهنگام برای پیشگیری و به حداقل رساندن خسارت‌های ناشی از آن، در اختیار مراجع تصمیم‌گیری و نهادهای مربوطه قرار گیرد. در تحقیقات آتی می‌توان نتایج به دست آمده از مدلسازی حساسیت به فرونشست با الگوریتم جنگل تصادفی را با روش‌های دیگر آماری و یادگیری ماشین نظیر نسبت فراوانی، فرآیندهای سلسله مراتبی تحلیلی، وزن شواهد، ماشین بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز در منطقه مورد مطالعه مقایسه نمود.

منابع

اطهری، م. ع.، عزیزی، ح. ر.، هاشمی، س. ش.، و هنری، ح. ر. (۱۴۰۱). بررسی رابطه بین میزان تغییرات سطح زمین در اثر فرونشست و آب زیر زمینی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 و مدل‌های آماری (منطقه مورد مطالعه: دشت ورامین). (۱)۷، ۳۴-۴۳.

<https://doi.org/10.22112/JWWSE.2021.261650.1232>

حسین نژاد مکی، ا. بشیری، م. و مرادی، ح. (۱۴۰۱). ارزیابی مکانی مناطق در معرض ریسک فرونشست زمین در روستای فدافن، شهرستان کاشمر. راهبردهای توسعه روستایی، ۹(۳)، ۴۱۱-۴۲۶.
<https://doi.org/10.22048/rdsj.2022.340615.2020>

رحمانی، پ.، غلامی، ح.، و گلزاری، ش. (۱۴۰۲). مدل‌سازی مکانی حساسیت اراضی به فرونشست با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین (مطالعه موردی: دشت کوهدشت). مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، -.
<https://doi.org/10.22098/mmws.2023.13822.1368>

صدری کیا، م. (۱۴۰۱). پایش فرونشست زمین با تحلیل سری زمانی پراکنش گره‌های دائمی و تغییرات تراز آب زیرزمینی؛ (مطالعه موردی دشت سراب). تحقیقات منابع آب ایران، ۱۸(۲)، ۱-۱۸.
https://www.iwrr.ir/article_148820_bee19d2acdd3192ff3aa77fdd7d77591.pdf

صدری کیا، م.، و کاظمی پور، ن. (۱۴۰۳). ارزیابی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تداخل‌سنجی راداری و تحلیل‌های مکانی. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۸(۹۰)، -.
<https://doi.org/10.22034/gp.2024.58713.3194>

عابدینی، م.، و نظری گزیک، ز. (۱۴۰۲). تجزیه و تحلیل میزان فرونشست زمین در محدوده شهر نیشابور. جغرافیا و روابط انسانی، ۶(۳)، ۶۹۸-۷۱۷.
<https://doi.org/10.22034/gahr.2024.437003.2039>

عابدینی، م.، و نظری گزیک، ز. (۱۴۰۳). بررسی اثر افت آب‌های زیرزمینی بر فرونشست زمین مطالعه موردی: شهرستان چناران. جغرافیا و روابط انسانی، ۶(۴)، ۶۶۹-۶۸۹.
<https://doi.org/10.22034/gahr.2024.433326.2019>

قربانی محمدآبادی، ص.، نژادحسینی، ر.، و گنجائیان، ح. (۱۴۰۲). تحلیل عوامل موثر در وقوع فرونشست دشت قهاوند با استفاده از تصاویر راداری و ماهواره‌ای. جغرافیا و روابط انسانی، ۵(۴)، ۵۴۲-۵۵۳.
https://www.gahr.ir/article_171195_6d20fc6043064f7514b1f9f4c7c89efb.pdf

گرایی، پ. (۱۳۹۰). تعیین مناسب‌ترین روش پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز استان -ساری. پژوهش‌های دانش زمین، ۲۲(۲)، ۹۳-۱۱۴.
https://esrj.sbu.ac.ir/article_94472_4324856f7f51350e2c363830bdfc2356.pdf

لشکری پور، غ. ر.، غفوری، م.، و کاظمی گلیان، ر. (۱۳۸۷). بررسی نشست زمین در دشت نیشابور و ارتباط آن با افت سطح آب‌های زیرزمینی. دانشگاه فردوسی مشهد. <https://civilica.com/doc/1278767>

نوری، س.، نوری جلیانی، ک.، کاظم، م.، نیکنام، م. ح.، محمودی، م.، آندونیان، ل.، و اکابری، آ. (۱۳۹۳). آنالیز جنگل‌های تصادفی: یک روش آماری مدرن برای غربالگری در مطالعات با بعد بالا و کاربرد آن در یک مطالعه همبستگی ژنتیکی جمعیت-پایه. مجله دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی. ۱۳۹۰؛ ۳(۵): ۹۳-۱۰۱.

- Abbasnejad, A., Abbasnejad, B., Derakhshani, R., & Hemmati Sarapardeh, A. (2016). Qanat hazard in Iranian urban areas: explanation and remedies. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-14 .
- Adiyaman, I. B. (2012). Land Subsidence and Earth Fissures Due to Groundwater Pumping. *Doctor of Philosophy With a Major in Civil Engineering*, 198 .
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (1984). Classification and regression trees Chapman & Hall. *New York* .
- Bui, D. T., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chapi, K., Pradhan, B., Chen, W.,...Saro, L. (2018). Land subsidence susceptibility mapping in South Korea using machine learning algorithms. *Sensors (Switzerland)*, 18. <https://doi.org/10.3390/s18082464>
- Ghorbanzadeh, O., Rostamzadeh, H., Blaschke, T., Gholaminia, K., & Aryal, J. (2018). A new GIS-based data mining technique using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and k-fold cross-validation approach for land subsidence susceptibility mapping. *Natural Hazards*, 94, 497-517. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3449-y>
- Hakim, W. L., Achmad, A. R., & Lee, C. W. (2020). Land subsidence susceptibility mapping in jakarta using functional and meta-ensemble machine learning algorithm based on time-series insar data. *Remote Sensing*, 12, 1-26. <https://doi.org/10.3390/rs12213627>
- Manafiazar, A., Khamchian, M., & Nadiri, A. (2019). Comparison of Vulnerability of the Southwest Tehran Plain Aquifer with Simple Weighting Model (ALPRIFT Model) and Genetic Algorithm (GA). *Kharazmi Journal of Earth Sciences*, 4(2), 199-212. <https://doi.org/10.29252/gnf.4.2.199>
- Mohebbi Tafreshi, G., Nakhaei, M., & Lak, R. (2021). Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran. *GeoJournal*, 86, 1203-1223. <https://doi.org/10.1007/s10708-019-10129-8>
- Park, I., Choi, J., Lee ,M. J., & Lee, S. (2012). Application of an adaptive neuro-fuzzy inference system to ground subsidence hazard mapping. *Computers & Geosciences*, 48, 228-238 .
- Simpson, A. R., Dandy, G. C., & Murphy, L. J. (1994). Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Journal of water resources planning and management*, 120, 423-443 .
- Vorpahl, P., Elsenbeer, H., Märker, M., & Schröder, B. (2012). How can statistical models help to determine driving factors of landslides. *Ecological Modelling*, 239, 27-39 .