فصلنامه راهبردهای توسعه روستایی
جلد ۹، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱ ص. ۴۲۶-۴۱۱

Rural Development Strategies
Vol. 9, No. 3, Fall 2022, P. 411-426

مقاله پژوهشی

ارزیابی مکانی مناطق در معرض ریسک فرونشست زمین در روستای فدافن، شهرستان کاشمر

احسان حسین‌نژاد مکی[۱]، مهدی بشیری[۲*]، حمیدرضا مرادی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۷ اردیبهشت ۱۴۰۱ تاریخ پذیرش: ۲۹ مرداد ۱۴۰۱

چکیده

رشد جمعیت همراه با توسعه صنعت و کشاورزی، افزایش مصرف آب را به‌دنبال داشته‌است. محدودیت منابع آب‌های سطحی، باعث برداشت بیش‌ازحد از سفره‌های آب زیرزمینی گردیده و پیامدهای جبران‌ناپذیری را بر منابع آب و محیط‌زیست کشور وارد کرده است؛ از جمله پدیده فرونشست، که اغلب دشت‌های کشور را فراگرفته است. هدف این پژوهش، شناسایی عوامل مؤثر و مناطق در معرض ریسک فرونشست در روستای فدافن کاشمر است. جهت پهنه‌بندی ریسک، طی سال ۱۳۹۸، عوامل سنگ‌شناسی، کاربری‌اراضی، خاک‌شناسی، میزان برداشت از آبخوان، فاصله از آبراهه، گسل، چاه‌های بهره‌برداری، چشمه و قنات‌ها و نیز عوامل ژئومورفولوژی شامل شیب، جهت و ارتفاع بررسی و هر یک از عوامل، تبدیل به یک لایه اطلاعاتی شد و با الگوریتم جنگل تصادفی در نرم‌افزار R، مدل‌سازی و ارزیابی انجام گردید. سپس جهت تعیین نواحی مستعد فرونشست، نقشه‌های پهنه‌بندی ریسک در پنج کلاس با دو روش ارزش اطلاعاتی و تراکم سطح در محیط ArcGIS استخراج شدند. نتایج نشان داد در روش‌های تراکم سطح و ارزش اطلاعات به‌ترتیب ۹۷/۰۱ و ۹۱/۰۴ درصد فرونشست‌ها درکلاس خطر خیلی زیاد و زیاد قرار گرفته است. بنابراین هر دو روش در پهنه‌بندی مناطق در معرض ریسک، موفق عمل کرده‌اند و عوامل برداشت از آبخوان و کاربری اراضی بیشترین اهمیت در وقوع فرونشست را دارند. همچنین براساس منحنی ROC، الگوریتم جنگل تصادفی با دقت بسیار بالا (۹۳ درصد)، نتایج خوبی در اولویت‌بندی و اهمیت عوامل مؤثر در فرونشست ارائه کرده است و بخش جنوبی منطقه با کاربری مرتع، بیشترین ریسک و زراعت آبی در منطقه، کمترین ریسک در توسعه مکانی فرونشست‌ها را دارد. در نتیجه مدیریت تغذیه آبخوان با پخش سیلاب‌ها و کاهش استحصال آب در جنوب منطقه می‌تواند در کاهش ریسک وقوع و توسعه فرونشست‌ها مؤثر و کاربردی باشد.

کلمات کلیدی: آبخوان، الگوریتم جنگل‌تصادفی، حساسیت به فرونشست، سیستم اطلاعات جغرافیایی، مدل‌سازی.

۱- کارشناس ارشد آبخیزداری، گروه مهندسی طبیعت و گیاهان دارویی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تربت‌حیدریه، خراسان‌رضوی، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی طبیعت و گیاهان دارویی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تربت‌حیدریه، خراسان‌رضوی، ایران
۳- استاد گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، مازندران، نور، ایران
(*-نویسنده مسئول: m.bashiri@torbath.ac.ir)

DOI: 10.22048/rdsj.2022.340615.2020

مقدمه

توسعه مناطق شهری و روستایی باعث بروز برخی ناهنجاری‌های طبیعی می شود که همزمان با دستکاری بشر در سامانه‌های طبیعی، این ناهنجاری‌ها شتاب روزافزون به خود گرفته است. عرصه‌های طبیعی به دنبال تحولات اقتصادی و اجتماعی و رشد صنایع به صورت مداوم در معرض تهدید و تخریب قرار دارند و طبیعتاً بررسی نتایج برخی از عوامل محیطی می‌تواند در زمینه برنامه‌ریزی توسعه کمک شایانی نماید و با هدف توسعه پایدار اطلاعات ارزشمندی را به بخش مدیریتی ارائه نمایند (بشیری و همکاران، ۱۳۹۸). توسعه صنایع اگر همگام با بررسی‌های محیطی و ارزیابی‌های ریسک نباشد باعث به خطر افتادن حیات جامعه انسانی و بروز بسیاری از پیامدهای زیست محیطی و مخاطرات می‌گردد (نعمت الهی و همکاران، ۱۴۰۰). بر مبنای مطالعات پهنه‌بندی خطر می‌توان به طور قابل ملاحظه‌ای ضمن جلوگیری از گسترش خسارت و کاهش آن، از منابع اعتباری محدود حداکثر استفاده را در توسعه روستایی نمود. در نتیجه نقشه پهنه‌بندی ریسک به عنوان یک سیستم هشداردهنده جهت کاهش خطرات احتمالی و جلوگیری از وارد شدن خسارات جانی و مالی قابل استفاده است (صفرپور و همکاران، ۱۳۹۹).

از مهمترین راهکارهای مدیریت منابع آب و خاک، شناخت فرایندهای مؤثر در آن است (حجابی و همکاران، ۱۴۰۰). مخاطرات طبیعی هر ساله خسارت‌های جانی و مالی فراوانی را در مناطق مختلف دنیا و از جمله ایران باعث می‌شوند و منظور از مخاطرات طبیعی، فرایند هایی هستند که پتانسیل ایجاد خطر خسارت و تأثیرات زیان‌آور دیگری را برای انسان و محیط طبیعی آنها دارند. شناخت مناطق مستعد ریسک از اولین اقدامات در مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی توسعه‌ای و عمرانی است (آریاپور و همکاران، ۱۳۹۸). شناسایی مناطق ایمن برای توسعه شهری و روستایی همیشه مورد توجه برنامه‌ریزان بوده است که در این راستا شناسایی عوامل مؤثر می‌تواند در ارزیابی خطر، مدیریت بحران و توسعه پایدار نقشی کلیدی داشته باشد. شناسایی مناطق حساس و در معرض ریسک مخاطرات محیطی نیاز به استفاده از علوم جدید دارد که علم داده‌کاوی می‌تواند در اجرای این هدف سودمند باشد، چرا که کاربرد این روش می‌تواند وابستگی به عملیات گسترده میدانی را کاهش دهد و در نتیجه باعث کاهش زمان و هزینه مطالعات گردد (بشیری و همکاران، ۱۳۹۸). امروزه می‌توان فرایند پیش‌بینی را با استفاده از علم داده-کاوی که روشی نسبتاً جدید است، در علوم منابع طبیعی انجام داد. این فرایند شامل استخراج اطلاعات مفید و مهم از مجموعه بزرگی از داده‌هاست. استفاده از داده‌کاوی در علوم منابع طبیعی می‌تواند مدیران را به شیوه‌های بهتر و با ایده‌های مناسب‌تر برای تصمیم‌گیری یاری کند تا سیاست‌های بهتری را بتوان برای توسعه روستایی اتخاذ نمود. در نتیجه علم داده‌کاوی نقش مهمی در تصمیم‌گیری ایفا می‌نماید (بشیری و ماروسی، ۱۳۹۹).

فرونشست زمین که زلزله خاموش نیز نام گرفته، نوعی ریسک زمین‌شناسی است که در نتیجه عوامل مختلفی مثل برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی، زلزله، فعالیت‌های آتشفشانی و سیلاب‌ها رخ می‌دهد (پارک[1] و همکاران، ۲۰۱۲). فرونشست در کوتاه مدت محسوس نیست، چون فرایند آن به عوامل فیزیکی و طبیعی بستگی دارد (امیدوار، ۱۳۹۰). روند طبیعی فرونشست زمین با عوامل غیرطبیعی محرک آن، تشدید شده و خسارات مورفولوژیکی سطحی، خسارات مالی و جانی را نیز برای انسان به همراه خواهد داشت (پولند[2]، ۱۹۸۴).

۱- Park
۲- poland

قرار گرفتن کشور ایران در منطقه‌ای خشک و کم آب با میانگین بارشی معادل یک سوم دنیا و سرانه مصرف حدود سه برابری نسبت به سایر کشورها در کنار نحوه زندگی، بهره‌وری پائین آب و عدم هم‌خوانی با توان اکولوژیک مناطق، از مخاطرات زیست‌محیطی است که عدم شناخت و مدیریت مناسب آن، تبعات جبران‌ناپذیری را به‌دنبال خواهد داشت (رنجبر و جعفری، ۱۳۸۸).

برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی و درنتیجه افت شدید تراز آب زیرزمینی در برخی دشت‌ها، اثرات زیادی مثل کاهش کیفیت آب، افزایش فشار مؤثر و فشردگی دائم در رسوبات را داشته است که باعث فرونشست می‌شود (فولتن[1]، ۲۰۰۶). طبق مطالعات، در مقیاس جهانی، خطر فرونشست زمین بر اثر افت تراز آب زیرزمینی در سال‌های ۱۹۷۰-۱۹۵۰ و هم‌زمان با صنعتی شدن و رشد شهرنشینی، به اوج خود رسید (توکلی‌شیرازی، ۱۳۹۳). پژوهشگران مختلفی به مطالعه در زمینه بررسی و تخمین میزان فرونشست و عوامل مؤثر بر آن با استفاده از روش‌های مختلف پرداخته‌اند. زارع‌مهرجردی (۱۳۹۰)، در مطالعه فرونشست میبد، دو عامل ژئوتکتونیک و تکتونیک را مورد بررسی قرار داد و شکستگی‌های این منطقه را ناشی از فعالیت گسل‌های منطقه عنوان نمود. محمدی و همکاران (۱۳۹۰)، در دشت سملقان خراسان‌شمالی بررسی‌هایی به‌منظور علل ایجاد درز و شکاف‌ها انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که علت اصلی ایجاد این شکاف‌ها، نشست زمین در بخش‌های جنوبی به علت برداشت بیش‌ازحد مجاز آب زیرزمینی و تراکم لایه‌های رسی در این منطقه می‌باشد. پیشرو و همکاران (۱۳۹۰) برای مدل‌سازی و پیش‌بینی فرونشست، پژوهشی بر پایه نه متغیر انجام دادند که این مدل توانست پیش‌بینی فرونشست را با دقت بالایی و با ضریب همبستگی ۹۴٪ بین داده‌های موجود و پیش‌بینی‌شده، محاسبه نماید. جهت بررسی فروچاله‌ها در دشت جابر استان ایلام پژوهشی توسط کریمی و همکاران (۱۳۹۱) انجام گرفت. نتایج نشان داد عوامل شیب دامنه، سنگ‌شناسی، فاصله از خط کنیک، ضخامت رسوب، کاربری اراضی، شبکه آبراهه و عمق سفره آب زیرزمینی بیش‌ترین تأثیر را در وقوع فروچاله‌های منطقه داشته‌اند. انگورانی و همکاران (۱۳۹۴) در شناسایی پدیده فرونشست و پیش‌بینی وقوع آن از روش‌های هوشمند مثل مدل شبکه عصبی استفاده نمودند. مقایسه مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل و مقدار واقعی فرونشست، نشانگر تطابق خوب دو دسته نتایج و قابلیت اعتماد پیشنهادی بود. شادفر و همکاران (۱۳۹۴)، با تحلیل سلسله مراتبی و در نظر گرفتن پنج عامل شیب، ارتفاع، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل و برداشت بی رویه از آب‌های زیرزمینی، نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست را در منطقه بوئین‌زهرای مرکزی تهیه کردند و نتیجه نشان داد عامل برداشت بی‌رویه بیشترین تأثیر در ایجاد فرونشست‌های این منطقه را داشته است. رکنی و همکاران (۱۳۹۵)، در دشت نیشابور به بررسی تغییرات ژئومورفولوژیکی شکاف‌ها و ترک‌های حاصل از فرونشست زمین پرداختند. نتایج نشان داد که افت شدید آب زیرزمینی در سال‌های اخیر باعث ایجاد ترک‌ها و شکاف‌های عمیق و طویل ممتد، منقطع، حفرات مدور، چاله‌ها و فروچاله‌هایی شده است. با مطالعه پهنه‌بندی فرونشست، شایان و همکاران (۱۳۹۵)، نشان دادند که تغییرات ناهمسان در داده‌های مورفومتری شبکه زهکشی مهم‌ترین فاکتور مؤثر در تشدید افت آب‌های زیرزمینی و وقوع فرونشست در منطقه بوده است. امیری و همکاران (۱۳۹۶)، با بررسی و تحلیل نرخ فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری نشان دادند بخش‌های شمالی و شمال‌غربی شهر مشهد در کلاس با ریسک زیاد قرار گرفته است. نتیجه پژوهش پورقاسمی و ساروی (۱۳۹۶)، با هدف مدل‌سازی مکانی و ارزیابی حساسیت فرونشست زمین با استفاده از روش داده‌کاوی مدل جمعی تعمیم‌یافته در دشت جیرفت

۱- Fulton

استان کرمان، نشان داد که عوامل طبقات ارتفاعی، تغییرات کاربری زمین و جهت شیب از بین ۱۱ عامل مؤثر، به‌ترتیب در رتبه‌های بالا بودند. سپهر و همکاران (۱۳۹۶)، جهت بررسی ارتباط بین تغییرپذیری ادافیک و تغییرات مورفولوژی ترک‌های حاصل از فرونشست زمین در دشت نیشابور مطالعه‌ای را انجام دادند و نتایج تأیید کرد که رطوبت خاک عاملی جهت گسترش ابعاد شکاف (طول و عمق) است. پژوهش صالحی‌متعهد و همکاران (۱۳۹۶)، جهت پایش نرخ فرونشست سالانه در شهر مشهد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری نشان داد که بیشترین نرخ فرونشست در مناطق با افت شدید سطح آب زیرزمینی، بافت ریزدانه خاک و ضخامت آبرفت زیاد ایجادشده است. نادری و همکاران (۱۳۹۷) با پیشنهاد چارچوبی جامع جهت شناسایی نواحی احتمالی رخداد فرونشست در آبخوان به این نتیجه رسیدند دو پارامتر محیط آبخوان و ضخامت آبخوان حساسیت و تغییرپذیری زیادی نسبت به سایر پارامترها داشتند. هم‌چنین کم‌اثرترین پارامتر، فاصله از گسل بود. ندیری و همکاران (۱۳۹۷) با مطالعه هفت عامل هیدروژئولوژیکی به منظور بررسی فرونشست با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک به این نتیجه رسیدند این روش با افزایش ضریب همبستگی بین شاخص فرونشست و فرونشست‌های به‌دست‌آمده در دشت، توانایی بیشتری در ارزیابی پتانسیل فرونشست دارد. رجبی و صالحی (۱۴۰۰) وضعیت فرونشست دشت قزوین ناشی از برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی را ارزیابی نمودند که مطابق بررسی‌های صورت گرفته با تصاویر ماهواره‌ای و همچنین تحلیل‌های عددی، بطور میانگین مقادیر نرخ فرونشست از ۲۷/۵ تا ۸۶/۷ میلی‌متر در سال متغیر بود که محدودیت پمپاژ آب زیر زمینی پیشنهاد گردید.

در پژوهش‌های خارج از کشور، لی[۱] و همکاران (۲۰۱۳)، در بررسی فرونشست زمین در چین، از روش ماشین بردار پشتیبان استفاده نمودند. نتایج مقایسه میان الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با توابع کرنل مختلف و روش‌های تک متغیره (نسبت فراوانی) و چندمتغیره (رگرسیون لجستیک) آماری، نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل ماشین بردار پشتیبان بود. پارک و همکاران (۲۰۱۴)، با تهیه نقشه حساسیت فرونشست زمین در اطراف معادن زغال‌سنگ سمچوک کُره جنوبی، با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی، رگرسیون لجستیک، شبکه عصبی مصنوعی و ترکیب این مدل‌ها نشان دادند که دقت مدل‌های ترکیبی از مدل‌هایی که به‌تنهایی استفاده می‌شوند بیش‌تر است. برای تعیین میزان ارتباط و تأثیرگذاری فرونشست زمین در وقوع سیل، توسط ین[۲] و همکاران (۲۰۱۶)، مدل‌های هیدرولیک در مناطق شهری شانگ‌های چین به‌کاربرده شد. نتایج نشان داد که فرونشست زمین ممکن است غیرمستقیم از ویژگی‌های سیل تأثیر بگیرد. در ارزیابی خطر فرونشست زمین، شرستا[۳] و همکاران (۲۰۱۷) با روش شبیه‌سازی مدل جریان آب کاملاً کالیبراسیون شده (GW) که براساس مدل جریان آب سطحی- زیرسطحی توسعه داده شده است در منطقه‌ای در نپال نشان دادند که بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی منطقه به فرونشست زمین بسیار حساس است. در آن منطقه سالانه به‌طور متوسط، ۱/۶ میلی‌متر فرونشست زمین روی می‌دهد. گانورو و کومار[۴] (۲۰۱۷)، به بررسی برآورد فرونشست زمین بر پایه PsInSAR در میدان نفتی بورگان با استفاده از TerraSAR-X پرداختند. نتایج نشان داد این تکنیک برای نظارت بر فرونشست زمین پس از اصلاح خطاهای اتمسفری نتایج قابل‌قبولی را ارائه می‌دهد. عبدالهی[۵] و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان و بررسی عملکرد توابع مختلف کرنل به تهیه نقشه فرونشست در

۱- Li

۲- Yin
۳- Sheresta
۴- Gonnuru & Kumar
۵- Abdollahi

استان کرمان پرداختند. نتایج اولویت‌بندی متغیرها نشان داد به‌ترتیب داده‌های پیزومتری، شاخص پوشش‌گیاهی و ارتفاع مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع فرونشست این دشت است. قربان‌زاده[۱] و همکاران (۲۰۱۸)، در شهر آمل از تکنیک استنتاج فازی (ANFIS) با شش تابع عضویت و سیستم اطلاعات جغرافیایی جهت پیش‌بینی نقشه فرونشست منطقه استفاده نمودند. نقشه‌های پیش‌بینی‌شده با مدل با استفاده از منحنی عملکرد نسبی (ROC) مورد ارزیابی قرار گرفت که این منحنی با دقت ۸۴ درصد عملکرد مناسب مدل را در پیش‌بینی مناطق حساس به فرونشست را تأیید کرد. گویان[۲] و همکاران (۲۰۲۲) در ارزیابی درازمدت فرونشست زمین و افت آب زیرزمینی در ویتنام بر مبنای تصاویر راداری نشان دادند که فرونشست بخش مرکزی طی ۱۲ سال متوقف و بخش‌های غربی و جنوبی با سرعت ۵ میلی‌متر در سال در حال فرونشست هستند.

در پژوهش حاضر دست‌یابی به دو هدف مدنظر است؛ نخست ارزیابی روش‌های داده‌کاوی و رگرسیون دومتغیره در پهنه‌بندی و شناسایی مناطق مستعد خطر فرونشست زمین در روستای فدافن شهرستان کاشمر و دوم، پهنه‌بندی، شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر فرونشست زمین در منطقه موردمطالعه و مناطق در معرض ریسک توسعه فرونشست. طی مرور منابع، مشاهده شد استفاده از روش‌های جدید محاسباتی ازجمله روش‌های داده‌کاوی دارای دقت بالاتر و عملکرد بهتری در بررسی فرونشست و شاخص‌های مرتبط با آن نسبت به سایر روش‌های سنتی آماری می‌باشد. لذا این پژوهش در همین راستا گام برداشته تا با استفاده از فرآیند ترکیبی مدل‌سازی با الگوریتم‌ها و روش‌های آماری چندمتغیره به بررسی فرونشست بپردازد و امید است مبنایی برای سایر پژوهش‌های آتی قرار گیرد.

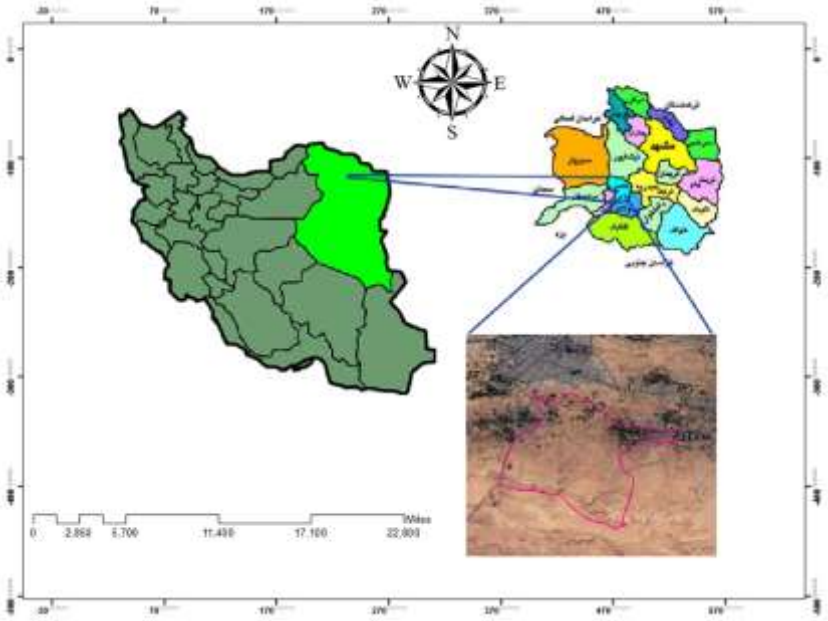
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

دشت کاشمر به‌عنوان بخشی از حوضه آبریز کاشمر با مختصات طول جغرافیایی ´۵۱°۳۴ تا ´۵۴°۵۷ طول شرقی و ´۲۸°۳۵ تا ´۳۹°۵۸ عرض شمالی در جنوب استان خراسان‌رضوی قرار دارد. حوضه آبریز کاشمر دارای اقلیم نیمه‌خشک تا خشک است و متوسط بارندگی محاسبه‌شده این حوضه ۱۹۰/۶ میلی‌متر می‌باشد. در دهه‌های اخیر توسعه سریع کشاورزی همراه با رشد سریع جمعیت و افزایش نیاز آبی باعث استحصال بی‌رویه آب زیرزمینی این دشت شده که این برداشت سبب افت سالیانه حدود ۰/۸ متر سطح آب‌های زیرزمینی همراه با کسری مخزن به میزان ۱۲۱/۴ میلیون مترمکعب گردیده است.این افت ممتد سطح آب زیرزمینی، دشت کاشمر را در زمره دشت‌های بحرانی استان قرار داده‌است (مهندسین مشاور آب و توسعه پایدار، ۱۳۸۴). روستای فدافن از توابع شهرستان کاشمر و در جنوب این شهرستان واقع شده است. منطقه موردمطالعه به‌عنوان پلاک روستای فدافن با مساحت ۹۲۲/۶ هکتار می‌باشد که با توجه به عملیات میدانی صورت‌گرفته در منطقه، پدیده فرونشست به‌وضوح به‌صورت ترک‌های شعاعی و شکاف‌های کششی با تراکم نسبتاً بالایی قابل‌مشاهده هستند و به‌علت قرار گرفتن در مجاورت اراضی کشاورزی و بافت مسکونی یک تهدید اساسی برای این منطقه می‌باشد. از دیگر امکاناتی که از سوی این پدیده در منطقه تهدید می‌شود می‌توان به ایستگاه تقویت فشار گاز، کوره‌های متعدد آجرپزی و ایستگاه کاشت و خزانه نهال اشاره کرد. شکل ۱ موقعیت حوزه مطالعاتی در استان و کشور را نمایش می‌دهد.

۱- Ghorbanzadeh

۲- Nguyen



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور و استان خراسان رضوی

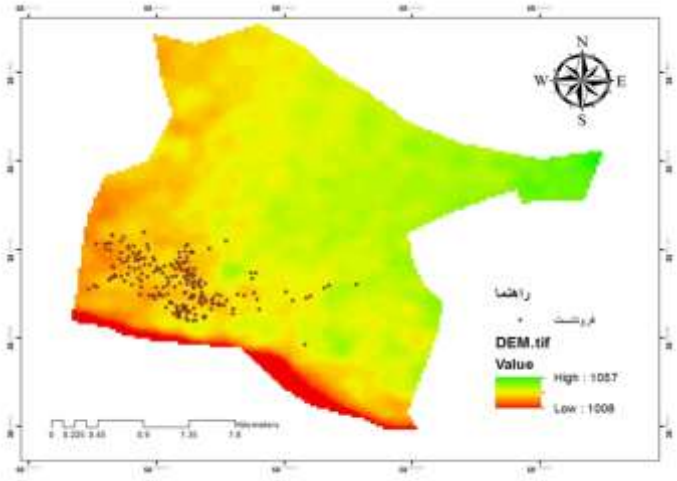
روش پژوهش

در ایـن پـژوهش، جهـت پهنه‌بنـدی خطـر فرونشسـت در روستای فدافن شهرستان کاشمر، عوامل سنگ‌شناسـی، کـاربری اراضی، خاک‌شناسی، میزان برداشت از آبخوان، فاصله‌از آبراهـه، فاصله از گسل، فاصله از چاه‌های بهره‌برداری، چشمه و قنات‌هـا و عوامل ژئومورفولوژی شامل شیب، جهت شیب و ارتفـاع مـورد بررسی قرار گرفتند.

آنالیز داده‌ها مبتنی بر روش‌های داده‌کاوی است. داده‌کـاوی یک فرآیند شناخت الگوهای معتبر، جدید، ذاتاً مفید و قابل‌فهم از داده‌ها و همچنین جستجوی خودکار منابع داده‌ای بـزرگ، بـرای یافتن الگوها و وابسـتگی‌هـایی اسـت کـه تحلیل‌هـای سـاده و معمول آماری قادر به انجام آن نیستند، می‌باشد. در این پژوهش از بین الگوریتم‌های داده‌کاوی از روش جنگل تصـادفی اسـتفاده شد. جنگل تصادفی یک روش یادگیری نظارت‌شده بـوده کـه از درخت‌های چندگانه در طبقه‌بنـدی اسـتفاده مـی‌کنـد (بـریمن[۱] و همکاران، ۱۹۸۴). در این مدل از دو عامل میانگین کاهشی دقـت و میانگین کاهشی جینی برای تعیین اولویت هر یـک از عوامـل مؤثر استفاده می‌گردد. جهت فرآیند مدل‌سازی از افزونـه Rattle در بسته نرم‌افزاری R استفاده شد.

در شروع تحقیق از طریق بازدیدهای میدانی، فرونشست‌های موجود در منطقه مشخص و بـا ثبـت موقعیـت آن‌هـا اقـدام بـه نقشه‌برداری و ثبـت مورفـومتری فرونشسـت‌ها شـد. در نتیجـه موقعیت جغرافیایی ۲۰۱ فرونشست ثبت و نقشه پراکندگی نقاط و لایه رقومی آن در محیط GIS تهیـه شـد (شـکل ۲). پـس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی رقومی روستای فـدافن، بـا قطـع دادن لایه نقاط فرونشست با هر یک از لایه‌ها، داده‌های حاصل جهت ورود به نرم‌افزار R آماده گردید.

۱- Breiman



شکل ۲. نقشه فرونشست‌های مورد بررسی در روستای فدافن

جهت اجرای آنالیزها، اطلاعات ۷۰ درصد نقاط جهت مدلسازی و ۳۰ درصد باقیمانده جهت ارزیابی تفکیک گردیدند. با وارد کردن اطلاعات لایه‌های مربوط به عوامل مؤثر بر اساس مختصات نقاط پراکنش فرونشست‌ها به نرم‌افزار R، مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی انجام و نقش عوامل مؤثر بر وقوع فرونشست مشخص شد. وزن طبقات مختلف هر عامل هم با استفاده از روش‌های آماری ارزش اطلاعات[۱] و تراکم سطح[۲] محاسبه شد. نهایتاً با توجه به وزن عوامل و طبقات هر عامل، نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی فرونشست برای منطقه موردمطالعه استخراج شد.

جهت بررسی تأثیر لایه‌های اطلاعاتی در تعیین مناطق مستعد فرونشست عملیات وزن‌دهی انجام گرفت. در مرحله اول لایه‌های رستری تحقیق با عملیات Reclassify طبقه‌بندی شدند و سپس این لایه‌های رستری تبدیل به Featur می‌شوند تا بتوان مقادیر وزنی را به لایه‌ها اضافه کرد؛ بنابراین پس از تبدیل تک‌تک لایه‌ها به فرمت فیچری با دستور Raster to feature پلی‌گون لایه‌ها ساخته شد. در جدول اطلاعات مربوط به هر لایه ستونی با نام وزن ارزش اطلاعات و ستونی با نام وزن تراکم سطح ایجاد کرده و مقادیر وزنی مربوطه برای هر کلاس از لایه‌های ده‌گانه دستی وارد شد. بعد از این جهت عملیات روی هم انداختن لایه‌ها از تابع Raster Calculator در منوی Spatial Analyze اقدام گردید. لایه‌های فیچر شده با تأثیر مقدار ضریب جینی مربوط به هر لایه در مقادیر وزنی هر لایه با یکدیگر جمع جبری شده و خروجی نهایی پهنه‌بندی ریسک در قالب نقشه با ئو روش مذکور آماده و ارزیابی گردید.

نتایج

خروجی‌های مربوط به مقادیر ضرایب میانگین کاهشی صحت (شاخص صحت)[۳] و میانگین کاهشی جینی (شاخص جینی)[۴] لایه‌های ورودی در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو شاخص فاکتور شیب و فاصله از آبراهه دارای کمترین تأثیر در فرآیند مدل‌سازی با الگوریتم جنگل تصادفی بودند. پس از این دو فاکتور، در هردو شاخص اهمیت سایر فاکتورها بیشتر می‌شود تا آنجا که دو فاکتور میزان

۱- Information Value
۲- Area Density
۳- Mean Decrease Gini (Gini Index)
۴- Mean Decrease Accuracy (Accuracy Index)

برداشت از آبخوان و کاربری‌اراضی به‌ترتیب دارای بیشترین ارجحیت در بین متغیرهای موردبررسی در شاخص جینی و در فرآیند مدل‌سازی فرونشست می‌باشند.

به‌منظور تجزیه و تحلیل آماری و وزن‌دهی به کلاس‌های مختلف هر کدام از متغیرها، لازم است که عوامل در نظر گرفته‌شده را کمی نمود تا قابل‌مقایسه با همدیگر باشند؛ چراکه عوامل کیفی را نمی‌توان باهم مقایسه کرده و ارجحیت هر کدام از آن‌ها را نسبت به یکدیگر ارزیابی کرد. جهت وزن‌دهی به طبقات هر لایه از دو روش آماری ارزش اطلاعات و تراکم سطح استفاده گردید که نتایج به دست آمده در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. مقادیر ضرایب میانگین کاهشی صحت (شاخص صحت) و میانگین کاهشی جینی (شاخص جینی) متغیرهای ورودی

متغیر ورودی	شاخص صحت	شاخص جینی
میزان برداشت از آبخوان	۳۱/۲۹	۲۰/۰۷
کاربری اراضی	۲۵/۵۹	۲۱/۳۰
فاصله از چاه	۲۳/۰۶	۶/۰۹
طبقات ارتفاعی	۱۹/۱۸	۱۱/۱۵
خاک‌شناسی	۱۳/۹۶	۵/۸۲
جهت شیب	۱۰/۷۸	۵/۹۹
سنگ‌شناسی	۷/۹۸	۲/۳۶
فاصله از قنات	۵/۹۴	۲/۹۹
فاصله از آبراهه	۴/۱۰	۱/۹۶
شیب	-۴/۶۲	۰/۱۵

روی‌هم‌انداختن لایه‌ها جهت تهیه نقشه ریسک خطر، یک‌بار بر اساس وزن‌های روش تراکم سطح و یک‌بار براساس وزن‌های روش ارزش اطلاعات تهیه شد. نقشه‌های حاصل در پنج کلاس ریسک خطر خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم برای داده‌های آموزش طبقه‌بندی شد که در شکل ۲ آمده است.

خروجی مهم دیگری که حاصل می‌شود منحنی مشخصه عملیاتی دریافت‌کننده[۱] (ROC) است. منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از خطای مثبت و منفی برای هر مقدار احتمالی از برش‌هاست. سطح زیر منحنی ROC بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخداد و عدم وقوع رخداد آن است. به‌منظور ارزیابی الگوریتم ایجادشده از این منحنی استفاده گردید. ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی[۲] (AUC) را دارد و طبق نتایج، الگوریتم جنگل تصادفی با دقت بسیار بالایی (۹۳٪) پیش‌بینی را انجام داده است.

جهت ارزیابی نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده با روش تراکم سطح و ارزش اطلاعات از نقاط مرحله آزمون یعنی ۶۷ نقطه باقیمانده از کل داده‌ها که برای مرحله اعتبارسنجی کنار گذاشته شده بود استفاده شد. با قطع دادن این ۳۰ درصد نقاط بر روی دو نقشه ریسک فرونشست و محاسبه رخداد فرونشست‌های هر طبقه و مساحت مربوط به آن‌ها و هم‌چنین محاسبه درصد تراکم فرونشست‌های اتفاق افتاده در حوضه نتیجه شد که در روش ارزش اطلاعات ۹۱/۰۴ درصد تراکم فرونشست‌ها در کلاس خطر زیاد و خیلی‌زیاد رخ داده است.

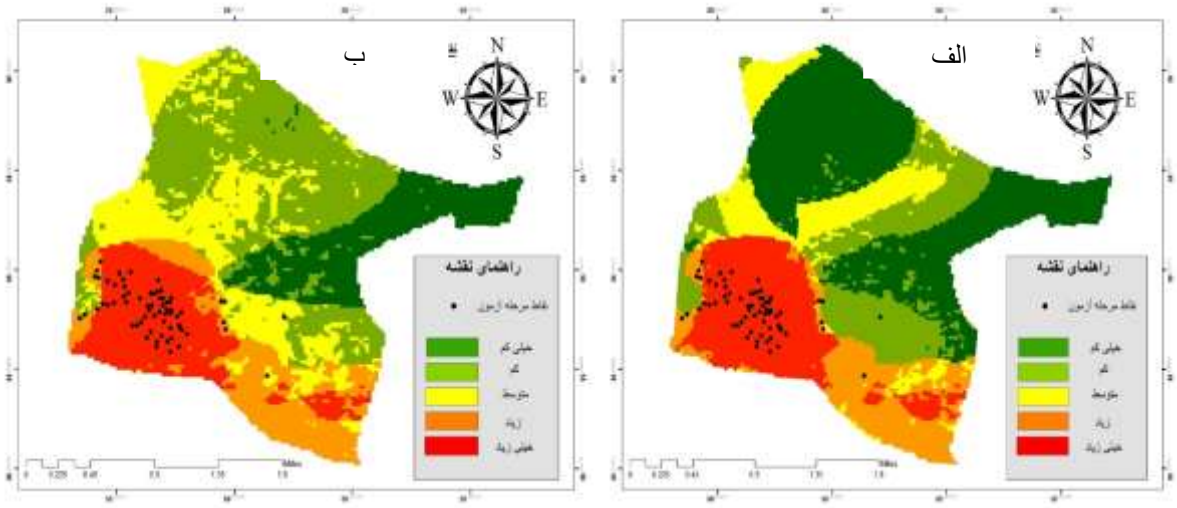
۱- Receiver operating characteristic

۲- Area Under the Curve

جدول ۲. وزن طبقات متغیرهای مختلف در دو روش مورد استفاده

متغیرهای ورودی	طبقات متغیر	تعداد فرونشست	مساحت (هکتار)	تراکم فرونشست	وزن روش ارزش اطلاعات	وزن روش تراکم سطح
سنگ‌شناسی	Qft2	۱۰	۵۸۴/۶۰	۰/۰۱۷	−۲/۱۵۸	−۱۳۰/۹
	Plms	۱۲۴	۳۲۰/۸۹	۰/۳۸۶	۰/۹۶۰	۲۳۸/۴
کاربری اراضی	زراعت آبی	۹	۶۱۶/۳۴	۰/۰۱۵	−۲/۳۱۶	−۱۳۳/۴
	مرتع با پوشش متوسط	۱۲۵	۲۸۹/۲۳	۰/۴۳۲	۱/۰۷۲	۲۸۴/۲
خاک‌شناسی	اریدی‌سول	۱	۵۳۷/۴۶	۰/۰۰۲	−۴/۳۴۲	−۱۴۴/۱
	انتی‌سول	۱۳۳	۳۷۸/۸۴	۰/۳۵۱	۰/۸۷۷	۲۰۵/۱
حجم برداشت از آبخوان (میلیون متر مکعب)	کلاس اول	۶	۱۵۸/۰۲	۰/۰۳۸	−۱/۳۶۰	−۱۱۰
	کلاس دوم	۵	۱۹۲/۳۵	۰/۰۲۶	−۱/۷۳۹	−۱۲۲
	کلاس سوم	۳۹	۱۵۸/۱۸	۰/۲۴۶	۰/۵۱۰	۹۸/۵
	کلاس چهارم	۸۴	۲۰۹/۶۱	۰/۴۰۱	۰/۹۹۶	۲۵۲/۷
	کلاس پنجم	۰	۱۸۷/۷۳	۰	۰	−۱۴۸
فاصله از آبراهه (متر)	۰–۵۰	۶۱	۳۹۸/۳۲	۰/۱۵۳	۰/۰۳۳	۵/۱
	۵۰–۱۰۰	۵۲	۳۲۱/۳۵	۰/۱۶۲	۰/۰۸۹	۱۳/۸
	۱۰۰–۱۵۰	۲۱	۱۵۰/۰۱	۰/۱۴۰	۰/۰۵۵	−۸
	۱۵۰–۲۰۰	۰	۲۷/۷۴	۰	۰	−۱۴۸
	۲۰۰<	۰	۷/۳۲	۰	۰	−۱۴۸
فاصله از چاه (متر)	۰–۲۰۰	۶	۷۴/۴۴	۰/۰۸۱	−۰/۶۰۸	−۶۷/۱۴
	۲۰۰–۴۰۰	۱۷	۱۶۸/۷۲	۰/۱۰۱	−۰/۳۸۵	−۴۷/۳
	۴۰۰–۶۰۰	۲۳	۱۷۰/۵۳	۰/۱۳۵	−۰/۰۹۳	−۱۳/۱
	۶۰۰–۸۰۰	۲۶	۱۳۱/۰۸۲	۰/۱۹۸	۰/۲۹۲	۵۰/۳
	۸۰۰<	۶۲	۳۶۱/۰۳۰	۰/۱۷۲	۰/۱۴۸	۲۳/۷
فاصله از قنات (متر)	۰–۱۵۰	۴۵	۱۶۱/۴۸	۰/۲۷۹	۰/۶۳۳	۱۳۰/۷
	۱۵۰–۳۰۰	۳۷	۱۶۷/۱۵	۰/۲۲۱	۰/۴۰۲	۷۳/۳
	۳۰۰–۴۵۰	۴۰	۱۳۵/۲۶	۰/۲۹۶	−۰/۶۹۲	۱۴۷/۷
	۴۵۰–۶۰۰	۱۲	۹۴/۹۰	۰/۱۲۶	−۰/۱۵۸	−۲۱/۶
	۶۰۰–۷۵۰	۰	۸۸/۲۶	۰	۰	−۱۴۸
	۷۵۰<	۰	۲۵۹/۶۲	۰	۰	−۱۴۸
جهت شیب	هموار	۱	۸/۳۹	۰/۱۱۹	−۰/۲۱۶	−۲۸/۸
	شمال	۲۶	۱۳۲/۲۳	۰/۱۹۷	۰/۲۸۴	۴۸/۶
	شمال شرقی	۲۱	۸۹/۳۵	۰/۲۳۵	۰/۴۶۲	۸۷
	شرق	۷	۶۷/۹۲	۰/۱۰۳	−۰/۳۶۱	−۴۴/۹
	جنوب شرقی	۱۳	۹۷/۵۲	۰/۱۳۳	−۰/۱۰۵	−۱۴/۷
	جنوب	۲۰	۱۵۵/۳۶	۰/۱۲۹	−۰/۱۴۰	−۱۹/۳
	جنوب غربی	۱۵	۱۳۷/۰۸	۰/۱۰۹	−۰/۳۰۲	−۳۸/۶
	غرب	۱۵	۹۸/۵۴	۰/۱۵۲	۰/۰۲۸	۴/۲
	شمال غربی	۱۶	۱۱۹/۸۹	۰/۱۳۳	−۰/۱۰۴	−۱۴/۶
ارتفاع (متر)	۰–۵۵	۰	۴/۱۱۵	۰	۰	−۱۴۸
	۵۵–۴۳۹	۳	۳۳/۳۵	۰/۰۹۰	−۰/۴۹۸	−۵۸/۱
	۴۳۹–۴۱۲۱	۱۲۸	۵۴۸/۲۸	۰/۲۳۳	−۰/۴۵۵	۸۵/۴
	۴۱۲۱–۷۰۲۱	۳	۳۲۰/۲۵	۰/۰۰۹	−۲/۷۵۶	−۱۳۸/۶

	۰-۸۳	۳۷	۴۱۶/۳۳	۰/۰۸۹	-۰/۵۱۰	-۵۹/۱
	۸۳-۱۶۶	۵۶	۳۰۳/۶۵	۰/۱۸۴	۰/۲۲۰	۳۶/۴
شیب	۱۶۶-۲۸۲	۳۶	۱۳۶/۳۰	۰/۲۶۴	۰/۵۷۹	-۱۱۶/۱
	۲۸۲-۵۰۲	۵	۳۸/۷۷	۰/۱۲۹	۰/۱۳۸	-۱۹/۱
	۵۰۲-۱۰۶۰	۰	۱۰/۸۶	۰	۰	-۱۴۸



شکل ۲: نقشه ریسک فرونشست بر اساس روش تراکم سطح (الف) وارزش اطلاعات (ب)

جدول ۳. ارزیابی دقت روش‌های پهنه‌بندی ریسک فرونشست

روش	ارزش اطلاعات			تراکم سطح		
کلاس ریسک	مساحت طبقه (هکتار)	درصد مساحت	درصد تراکم فرونشست	مساحت طبقه (هکتار)	درصد مساحت	درصد تراکم فرونشست
خیلی کم	۱۲۹/۰۷	۱۴/۶۸	۰	۳۳۵/۴۸	۳۷/۵۱	۰
کم	۱۵۴/۱۳	۱۷/۵۲	۲/۹۹	۱۵۷/۹۷	۱۷/۶۷	۲/۹۹
متوسط	۳۲۹/۸۲	۳۷/۵۰	۵/۹۷	۱۲۳/۳۱	۱۳/۷۹	۰
زیاد	۱۲۰/۳۷	۱۳/۶۹	۱۳/۴۳	۱۱۳/۹۰	۱۲/۷۴	۱۱/۹۴
خیلی زیاد	۱۴۶/۰۵	۱۶/۶۱	۷۷/۶۱	۱۶۳/۶۰	۱۸/۲۹	۸۵/۰۷

اما در روش تراکم سطح در کلاس خطر خیلی‌زیاد و زیاد، تراکم وقوع فرونشست‌ها مقدار ۹۷/۰۱ درصد را نشان می‌دهد. بنابراین مدل تراکم سطح دقت بیشتری را در وقوع خطر فرونشست در حوزه فدافن ارائه نموده است. جدول ۳ مقایر مربوط به تراکم فرونشست‌های هر کلاس و مساحت آن‌ها را برای مرحله آزمون مدل نمایش می‌دهد.

بحث و نتیجه‌گیری

فرونشست زمین در سال‌های اخیر یک بحران جدی در بسیاری از دشت‌های حاصلخیز و قابل کشاورزی کشور بوده و باعث نگرانی‌های قابل توجهی شده است. خشکسالی‌های اخیر به‌همراه افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی اصلی‌ترین دلیل افزایش دشت‌های در حال نشست در کشورمان می‌باشد. بنابراین روش‌های جدید پیش‌بینی و مدل‌سازی فرونشست برای

ارزیابی بهتر خطرات امری ضروری به‌نظر می‌رسد. با اعمال مدل‌سازی الگوریتم های داده‌کاوی و روش‌های مدیریتی مناسب، این امکان وجود دارد که مناطق در معرض خطر فرونشست با دقت زیادی شناسایی و برنامه‌های لازم برای جلوگیری از وقوع این پدیده و به‌حداقل رساندن تأثیرات آن ایجاد شود. به‌علاوه می‌توان چهارچوب عملی پیشنهادی را در سایر آبخوان‌های کشور اجرایی نمود.

باتوجه به اینکه در این تحقیق، مدل‌سازی با الگوریتم جنگل تصادفی انجام گرفته است و این الگوریتم با دو شاخص صحت و جینی مورد سنجش قرار می‌گیرد، در این مطالعه دو فاکتور حجم برداشت از آبخوان و کاربری اراضی و سپس فاصله از چاه‌های بهره‌برداری و ارتفاع در درجه بعدی، دارای بیشترین تأثیر در فرونشست‌های رخ داده در منطقه با شاخص صحت می‌باشند. اما نتایج شاخص جینی بیان‌گر تأثیر دو فاکتور کاربری اراضی و سپس میزان برداشت از آبخوان می‌باشد. طبق مطالعات، مقدار فرونشست زمین برای هر ۱۰متر افت سطح آب زیرزمینی حدوداً بین یک تا ۵۰ سانتی‌متر متغیر است و دامنه این تغییرات به ضخامت و تراکم‌پذیری لایه‌ها، طول زمان بارگذاری، درجه و نوع تنش وارده بستگی دارد (لوفگرن[۱]، ۱۹۶۹). در مطالعه ذبیحی و همکاران (۱۳۹۴)، با مدل آنتروپی شانون فاکتور کاربری اراضی و سپس لیتولوژی بیشترین تأثیر را در وقوع فرونشست گزارش شدند، که با نتایج این پژوهش در تعیین فاکتورهای مؤثر تقریباً مشابه است. در بررسی و مقایسه این دو شاخص از بالا به پایین میزان تأثیر عوامل کاهش یافته تا آنجا که عامل شیب در پایین‌ترین بخش قرار گرفته است؛ بنابراین فاکتور شیب کم‌اثرترین عامل در وقوع رخداد فرونشست‌های منطقه با روش جنگل تصادفی می‌باشد. هم‌چنین در بخش ارزیابی مدل براساس منحنی ROC، نتایج نشان داد مدل حاضر با دقت بسیار بالا یعنی ۹۳٪ پیش‌بینی را انجام داده است. این نتیجه نشان می‌دهد مقدار مشاهده شده، رابطه قوی با مقادیر احتمال حاصل از مدل جنگل تصادفی است و این مقدار دقت بسیاربالا نمایان‌گر کارایی و عملکرد مناسب مدل است. در مطالعه پورقاسمی و ساروی (۱۳۹۶)، که از روش داده‌کاوی مدل جمعی تعمیم‌یافته در دشت جیرفت استان کرمان استفاده شد، نتایج ارزیابی مدل نشان داد که دقت نقشه حساسیت تهیه‌شده با استفاده از این مدل خیلی‌زیاد (۸۱/۲۰٪) است. هم‌چنین عوامل طبقات ارتفاعی، تغییرات کاربری زمین و جهت شیب، به‌ترتیب در بالاترین رتبه‌ها در وقوع فرونشست قرارگرفته‌اند. میرهاشمی و همکاران (۱۳۹۶)، با استفاده از الگوریتم درخت تصمیم نشان دادند بیشترین تأثیر به‌ترتیب به سه عامل دما، تبخیر و تعرق و تقاضای آب کشاورزی مربوط می‌باشد که در تطابق با نتایج پژوهش حاضر نیست. در نتایج مقایسه دو مدل آنتروپی شانون و جنگل تصادفی تحقیق ذبیحی و همکاران (۱۳۹۴)، مدل آنتروپی شانون با دقت ۸۵/۵۵ در مقایسه با روش جنگل تصادفی با دقت ۷۶/۹۵ مناسب‌تر معرفی شد. هم‌چنین بر اساس مدل آنتروپی شانون لایه‌های کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از آبراهه و طبقات ارتفاعی بیشترین تأثیر را بر پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی داشته‌اند که با مطالعه نقیبی و همکاران (۱۳۹۳)، در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در حوضه آبخیز مغان خراسان‌رضوی کارایی مناسب مدل آنتروپی شانون با سطح زیر منحنی برابر با ۹۱/۲۱ درصد کارایی منطبق است. در تحقیق عبدالهی و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان با دقت ۰/۸۹ پیش‌بینی انجام شده است و از بین فاکتورهای مؤثر به‌ترتیب داده‌های پیزومتری، شاخص پوشش-گیاهی و ارتفاع مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع فرونشست دشت کرمان معرفی شده‌اند. در پژوهش قربان‌زاده و همکاران (۲۰۱۸)، در شهر آمل با تکنیک استنتاج فازی (ANFIS)، منحنی ROC با دقت ۸۴ درصد عملکرد مناسب مدل را در پیش‌بینی مناطق

۱- Lofgren

حساس به فرونشست در این حوضه تأیید می‌گردد. هم‌چنین نتایج تحقیق پارک و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد که دقت مدل‌های ترکیبی از مدل‌هایی که به تنهایی استفاده می‌شوند بیش‌تر است.

در بررسی لایه سنگ‌شناسی، بیشترین تراکم فرونشست و در نتیجه بیشترین وزن مربوط به کلاس plms می‌باشد. این واحد سنگ چینه‌شناسی بسیار حساس به فرآیندهای دخیل در وقوع فرونشست و شکاف‌ها می‌باشند زیرا جزء واحدهای سنگی حساس به رطوبت و فرسایش‌پذیر می‌باشند. در لایه کاربری اراضی بیشترین تراکم فرونشست‌ها در کلاس مرتع با تاج پوشش متوسط رخ داده و وزن این کلاس نسبت به کلاس اراضی زراعت آبی در هر دو روش آماری بیشتر گزارش شده است. چرای دام در اراضی مرتعی سبب آسیب به خاک شده و این مورد نیز موجب فراهم آوردن و حتی تشدید شرایط ایجاد فرونشست می‌گردد. نتایج وزن‌دهی لایه خاک‌شناسی نشان داد بیشترین تراکم فرونشست در خاک‌های آنتی‌سول این منطقه رخ داده، با وجود اینکه وسعت بیشتری از حوضه از خاک‌های اریدی سول پوشیده شده است. خاک‌های آنتی‌سول به‌دلیل بافت ریزدانه، جوان و تکامل نیافته‌ای که دارند استعداد وقوع فرونشست را دارند.

نتایج وزن‌دهی لایه حجم برداشت از آبخوان نشان می‌دهد بیشترین وزن مربوط به کلاس چهارم این لایه یعنی میزان برداشت ۶۴,۱۷۲/۸ تا ۸۳,۶۰۳/۵ میلیون مترمکعب می‌باشد. در مطالعه محمدی و همکاران (۱۳۹۰) در دشت سملقان خراسان‌شمالی، مهم‌ترین عامل فرونشست‌های حوزه، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و تراکم لایه‌های رسی عامل اصلی وقوع فرونشست گزارش شد. در لایه فاصله از آبراهه با دو شدن بیشتر از آبراهه‌ها تراکم فرونشست‌ها نیز کاهش می‌یابد. پس می‌توان نتیجه گرفت بیشترین فرونشست‌های رخ داده در نزدیکی آبراهه‌های حوضه می‌باشد و کلاس ۱۰۰-۵۰ متری دارای بیشترین وزن در هر دو روش آماری می‌باشد. در بین کلاس فاصله از چاه‌های بهره‌برداری حوضه، کلاس ۶۰۰ تا ۸۰۰ متری دارای بیشترین وزن و تراکم فرونشست‌ها است. پس بیشترین فرونشست‌ها در فاصله ۶۰۰ تا ۸۰۰ متری از چاه‌ها اتفاق افتاده است. به‌طور کلی فرونشست‌ها طبق نتایج این لایه بیانگر این است که با دور شدن از چاه‌های بهره‌برداری میزان فرونشست‌ها بیشتر شده است.

در لایه فاصله از قنات بیشترین تراکم فرونشست در کلاس ۳۰۰ تا ۴۵۰ متری اتفاق افتاده است و از فاصله ۶۰۰ متری قنات‌ها دیگر هیچ مورد فرونشستی مشاهده نشده، بنابراین تراکم فرونشست‌ها در نزدیکی قنات‌ها و تا فاصله حداکثر ۶۰۰ متری برآوردشده است. این نتیجه بیانگر تأثیر مؤثر برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی و به‌تبع آن افزایش افت سطح آب و درنتیجه رخداد فروشست می‌باشد که حفر قنات و استفاده از آب آن سبب خشک شدن و تخلیه بسیاری از سفره‌های آب دشت‌ها شده است. نتایج وزن‌دهی لایه جهت شیب نشان داد بیشترین تراکم فرونشست در جهت شمال‌شرقی حوضه می‌باشد. در مطالعه پیشرو و همکاران (۱۳۹۰) بیشترین تراکم فرونشست در نواحی مرکزی و غربی تهران اتفاق افتاده است. در حوضه فدافن بیشترین تراکم فرونشست مربوط به کلاس ارتفاعی ۴۱۲۱-۱۳۹ متر است. که این طبقه بیشترین مساحت منطقه را دربرگرفته است. در لایه شیب، کلاس ۱۶۶ تا ۲۸۲ درصد بیشترین وزن را دارد و طبق نتایج جدول ۲ در بخش لایه شیب، با افزایش شیب درصد وقوع فرونشست کمتر می‌شود زیرا در شیب‌های زیاد شرایط وقوع فرونشست مهیا نیست.

در تهیه نقشه پهنه‌بندی ریسک خطر در پنج طبقه بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم و بسیارکم نتایج نشان داد مدل تراکم سطح دقت بیشتری دارد. براساس روش تراکم سطح ۹۷/۰۱

درصد مساحت حوزه در خطر خیلی زیاد و زیاد قرار دارد و در روش ارزش اطلاعات ۹۱/۰۴ مساحت حوضه ریسک خطر خیلی زیاد و زیاد را نشان می‌دهد. بنابراین هر دو روش در پیش‌بینی وقوع خطر موفق عمل کرده‌اند ولی دقت روش تراکم سطح در این زمینه بیشتر است. در مطالعه کریمی و همکاران (۱۳۹۱) در استان ایلام با روش‌های آماری رگرسیونی چندمتغیره نشان دادند ۸۱ درصد فروچاله‌ها در کلاس‌های خیلی پرخطر و پرخطر قرار دارند و مهم‌ترین عوامل با این روش‌ها شیب دامنه، سنگ‌شناسی، فاصله از خط کنیک، ضخامت رسوب و کاربری اراضی معرفی نمودند. در مطالعه شادفر و همکاران (۱۳۹۴) در پهنه‌بندی وقوع فرونشست با روش‌های آماری ۵۵ درصد عرصه در کلاس خطر نسبتاً زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است. لی و همکاران (۲۰۱۳) طی پژوهشی با مقایسه روش‌های آماری تک متغیره و چندمتغیره با روش ماشین بردار پشتیبان اعلام نمودند دقت الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SWF) بیش‌تر از روش‌های آماری است.

آنچه مسلم است اینکه فرونشست زمین از بحران‌های جدی و مخاطرات طبیعی در دشت‌های مختلف قابل کشاورزی کشور است. از سوی دیگر، توسعه جوامع روستایی وابستگی بالایی به بخش کشاورزی دارد. در نتیجه حفظ و نگهداری محیط زیست و منابع طبیعی یکی از مهمترین چالش‌هایی است که بشر در آستانه قرن بیست و یکم با آن مواجه است و در کشورهای در حال توسعه، لزوم بهبود سطح استانداردهای زندگی مردم اهمیت خود را از دست نداده است. با توجه به اهمیت و جایگاه جامعه روستایی و معضلات و چالش‌هایی که این جامعه در مسیر توسعه با آن روبه روست، شناخت ویژگی‌های برنامه‌ریزی توسعه روستایی و پرداختن به تمامی جوانب آن ضرورت دارد (اکبرپور و همکاران، ۱۴۰۱). در جهان امروز، همه‌روزه بر مراکز جمعیتی و در نتیجه مشکلات آنها همچون فرسودگی و زوال نواحی مختلف، سلامت، تفکیک کاربری‌ها و نابرابری‌های اقتصادی- اجتماعی افزوده می‌شود. در نتیجه امروزه رهیافت‌های گوناگونی از جمله پایداری، رشد هوشمند و زیست‌پذیری برای مواجهه با این شرایط و حل معضلات مطرح گردیده و به‌کار گرفته شده‌اند. زیست‌پذیری به معنی توانایی و قابلیت یک منطقه برای تامین نیازهای زیستی ساکنان می‌باشد. اهمیت زیست‌پذیری به دلیل رواج روز افزون الگوهای ناپایدار زندگی است که در دراز مدت موجب کاهش ظرفیت منابع طبیعی و محیطی می‌شوند (علی-اکبری و همکاران، ۱۴۰۱). در نتیجه پدیده فرونشست زمین نیز به عنوان یکی از مخاطرات طبیعی رو به گسترش در مناطق مسکونی و دشت‌های کشاورزی، باید مورد توجه مدیران و برنامه‌ریزان توسعه قرار گیرد.

در خصوص مدیریت پدیده فرونشست زمین، با تغذیه مصنوعی تا حدودی از نشست زمین می‌توان جلوگیری کرد، ولی شکاف و فروچاله‌های ایجادشده در سطح زمین خسارات زیادی را به تاسیسات گاز، آب‌رسانی و برق وارد آورده و پدیده لوله‌زایی را به‌دنبال دارد. اجرای طرح‌های پخش سیلاب و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و جلوگیری از بهره‌برداری و انسداد چاه‌های غیرمجاز وکنترل بهره‌برداری چاه‌های دارای پروانه نیز می‌تواند در کنترل فرونشست مؤثر باشد. همچنین با توجه به اینکه الگوریتم جنگل تصادفی نتایج خوبی را در تعیین اولویت و اهمیت عوامل مؤثر در فرونشست ارائه کرده است بهتر است در حوضه‌های دیگر نیز مورد استفاده قرار گیرد. علم داده‌کاوی رو به توسعه روزافزون است بنابراین پیشنهاد می‌شود از دیگر الگوریتم‌ها نیز در بررسی فرونشست استفاده و ارزیابی شود. نهایتاً برنامه‌ریزی به‌منظور پاسخ به فرونشست غیرمنتظره تعیین و ارزیابی مشکلات مشاهده‌شده در پدیده فرونشست زمین می‌تواند در پیشبرد سرمایه‌گذاری به‌منظور حفاظت و احیاء اراضی مؤثر باشد و می‌توان از پتانسیل فرونشست زمین به‌موقع و به سهولت جلوگیری کرد.

منابع

آریاپور، م.، بشیری، م. و گلکاریان، ع. ۱۳۹۸. مدلسازی حرکات توده-ای با روش‌های داده‌کاوی در جنوب شرق نیشابور، استان خراسان رضوی. هیدروژئومورفولوژی، ۱۹(۵) :۵۷-۷۷.

اکبرپور، م.، امیری، ت. و عظیمی، س. ۱۴۰۱. تحلیل مدیریت پسماند روستایی با استفاده از تحلیل مدل ساختاری PLS (مطالعه موردی دهستان ماهیدشت کرمانشاه). فصلنامه راهبردهای توسعه روستایی، ۹(۱): ۱۲۳ – ۱۴۰.

امیری، م.، حافظی‌مقدس، ن. و لشکری‌پور، غ.ر. ۱۳۹۶. ارزیابی ریسک فرونشست زمین در محدوده شهر مشهد. پنجمین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری. ۱۳ دی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

انگورانی، س. معماریان، ح.، شریعت‌پناهی، م. و بلورچی، م.ج. ۱۳۹۴. مدل‌سازی پویای فرونشست دشت تهران. مجله علوم زمین، ۲۵(۹۷): ۲۱۱ – ۲۲۰.

امیدوار، ک. ۱۳۹۰. مخاطرات طبیعی. انتشارات دانشگاه یزد، یزد. ۳۱۰ ص.

بشیری، م.، کاوسی‌داودی، س.م. و افضلی، ا. ۱۳۹۸. ارزیابی روش-های داده‌کاوی و آمار دو متغیره در پهنه‌بندی خطر وقوع گسل (مطالعه موردی: حوضه قره قوم). تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۶(۴): ۱۰۰۳-۱۰۱۹.

بشیری، م. و ماروسی، ع. ۱۳۹۹. ارزیابی و مدلسازی پارامترهای اقلیمی مؤثر بر تولید سالانه گونه مرتعی ریواس (Rheum ribes) با الگوریتمهای داده کاوی. نشریه مرتع، ۱۴(۳): ۴۳۵-۴۵۱.

پورقاسمی، ح.ر. و ساروی‌محسنی، م. ۱۳۹۶. مدل‌سازی مکانی حساسیت فرونشست زمین با استفاده از روش داده‌کاوی مدل جمعی تعمیم‌یافته. مجله پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، ۳۰(۴): ۲۰ – ۳۴.

پیشرو، م.، شمشکی، أ.، قهرودی، م. و کرم، أ. ۱۳۹۰. ارزیابی و مدل‌سازی فرونشست زمین در جنوب‌غرب کلان‌شهر تهران. اولین همایش ملی فضایی مخاطرات محیطی کلان‌شهر تهران. یک خرداد، دانشکده علوم جغرافیا تهران.

توکلی شیرازی، ن. ۱۳۹۳. بررسی ابعاد فرونشست و مخاطرات آن. همایش ملی زمین‌شناسی و اکتشاف منابع، ۲۰ اسفند، شیراز. ۵ص.

حجابی‌جردوی، ف.، بشیری، م.و آذرخشی، م. ۱۴۰۰. اثر الگوی استقرار قطعات سنگی بر فرایندهای فرسایش خاک در شرایط شبیه‌سازی شده. پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۴۱(۱): ۲۰-۳۵.

ذبیحی، م.، پورقاسمی، ح.ر. و بهزادفر، م. ۱۳۹۴. تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های آنتروپی شانون و جنگل تصادفی در دشت بجنورد. مجله اکوهیدرولوژی، ۲(۲): ۲۲۱ – ۲۳۲.

رجبی، ع.م. و صالحی، م. ۱۴۰۰. ارزیابی نتایج نرخ فرونشست زمین ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در دشت قزوین. چهارمین کنفرانس بین‌المللی و پنجمین کنفرانس ملی عمران، معماری، هنر و طراحی شهری، ۲۵-۲۶ اسفند. تبریز.

رکنی، ج.، حسین‌زاده، س.ر. و لشکری‌پور، غ.ر. ۱۳۹۵. بررسی فرونشست زمین، چشم‌اندازها و تحولات ژئومورفولوژی ناشی از آن در دشت‌های تراکمی(مطالعه موردی: دشت نیشابور). مجله مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۶(۲۴): ۲۱ – ۳۸.

رنجبر، م. و جعفری، ن. ۱۳۸۸. بررسی عوامل مؤثر در فرونشست زمین دشت اشتهارد. فصل‌نامه جغرافیا، ۶(۱۸ و ۱۹) : ۱۵۵ – ۱۶۶.

زارع‌مهرجردی، ا.ع. ۱۳۹۰. بررسی پدیده نشست زمین و شکستگی های موجود در منطقه رستاق جنوب میبد. مجله‌جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۲(۴۳): ۱۵۶ – ۱۶۶.

سپهر، ع.، جلینی، م.، لشکری‌پور، غ.ر. و راشکی، ع.ر. ۱۳۹۶. بررسی همبستگی مورفومتری ترک‌های حاصل از فرونشست با تغییرپذیری ادافیک دشت نیشابور. پژوهش‌های ژئومورفولوژی

کمی، ۵(۴): ۵۹ – ۷۵.

شادفر، ص.، نصیری، ا.، چیتگر، س. و احمدی، ع. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر فرونشست با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی AHP ناحیه موردمطالعه (دشت بوئین‌زهرا). فصلنامه علمی – پژوهشی جغرافیای سرزمین، ۱۲(۴۸): ۱۰۱ – ۱۱۶.

شایان، س.، یمانی، م. و یادگاری، م. ۱۳۹۵. پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوضه آبخیز قره‌چای همدان. مجله هیدروژئومرفولوژی، ۹: ۱۳۹ – ۱۵۸.

صالحی‌متعهد، ف.، حافظی‌مقدس، ن.، لشکری‌پور، غ.ر. و دهقانی، م. ۱۳۹۶. ارزیابی علل زمین‌شناختی فرونشست زمین در دشت مشهد و اثرات آن بر شهر مشهد. مجموعه مقالات دومین همایش زمین‌شناسی و محیط زیست. ۹ اسفندماه، دانشگاه فردوسی مشهد. ۹ص.

صفرپور، ز.، فرزادمهر، ج.، گلکاریان، ع. و بشیری، م. ۱۳۹۹. بررسی کارایی مدل شاخص پایداری دامنه در شرایط مختلف هیدرولوژیکی(مطالعهٔ موردی: حوزهٔ سد بیدواز اسفراین). مرتع آبخیزداری، ۷۳(۱): ۱۳۹–۱۴۸.

علی‌اکبری، ا.، مختاری‌ملک‌آبادی، ر. و موسوی، س.ج. ۱۴۰۱. ارایه چارچوبی برای تدوین زیست‌پذیری با تکیه بر عوامل راهبردی. فصلنامه راهبردهای توسعه روستایی، ۹(۱): ۸۳ – ۱۰۲.

کریمی، ج.، گرایی، پ. و توکلی، م. ۱۳۹۱. پهنه‌بندی خطر وقوع فروچاله‌ها با استفاده از رگرسیون چندمتغیره (مطالعه موردی: فرو چاله‌های ریزشی دشت جابر، ایلام). مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۹(۶): ۵۳ – ۶۲.

محمدی، ا.، صهبائی لطفی، ا. ر. و طلعتی، ا. ۱۳۹۰. بررسی علل ایجاد درز و شکاف‌های به‌وجود آمده در شمال‌غرب دشت سملقان خراسان‌شمالی. اولین همایش منطقه‌ای توسعه منابع آب. ابرکوه، ۲۹ اردیبهشت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابرکوه.

مهندسین مشاور آب و توسعه پایدار .۱۳۸۴. گزارش مطالعات هیدروژئولوژی دشت کاشمر، ۲۶۵ص.

میرهاشمی، س. ح.، حقیقت‌جو، پ، میرزایی، ف و پناهی، م. ۱۳۹۶. ارزیابی الگوریتم داده‌کاوی در بررسی و پیش‌بینی وضعیت آبخوان دشت قزوین. مجله هیدروژئولوژی، ۲ (۲): ۵۳ – ۶۶.

نادری، ک.، ندیری، ع.ا.، اصغری‌مقدم، ا. و کرد، م. ۱۳۹۷. روشی جدید برای شناسایی و تعیین مناطق در معرض خطر فرونشست (مطالعه موردی: آبخوان دشت سلماس). اکوهیدرولوژی، ۵(۱): ۸۵ – ۹۷.

ندیری، ع.ا، طاهری، ز.، برزگری. دیده‌بان، خ. ۱۳۹۷. ارائه چهارچوبی برای تخمین پتانسیل فرونشست آبخوان با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک. مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۲): ۱۷۴ – ۱۸۵.

نعمت‌الهی، م.، بشیری، م.، آذرخشی، م. و رستمی‌خلج، م. ۱۴۰۰. اثر گوگرد و سیلیکات سدیم بر تثبیت آهک خاک و مهارکردن فرسایش آبی در پیرامون کارخانه‌ی آهک (تربت حیدریه). پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۴(۴): ۸۸–۱۰۳.

نقیبی، س.ا.، پورقاسمی، ح.ر.، پورطفلی، ز.س. و رضایی، ا. ۱۳۹۳. نقشه‌برداری بالقوه قنات‌های زیرزمینی با استفاده از نسبت فرکانس و مدل‌های آنتروپی شانون در حوزه آبخیز مغان. مجله علوم زمین، ۸(۱): ۱۷۱ – ۱۸۶.

Abdollahi, S., Pourghasemi, H. R., Ghanbarian, G. A. and Safaeian, R. 2018. Prioritization of effective Fctors in the occurrence of land subsidence and its susceptibility mapping using an SVM model and their different kernel function. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 14: 1-18.

Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A. and Stone, C. J. 1984. *Regression trees*. Chapman and Hall, New York.

Fulton, A. 2006. Subsidance and Water table. U.K

Gonnuru, P. and Kumar, Sh. 2017. PsInSAR based land subsidence estimation of Burgan oil field using TerraSAR-X data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 9: 17–25.

Ghorbanzadeh, O., Blaschke, T., Aryal, T. and Gholaminia, Kh. 2018. A new GIS-based technique using an adaptive neuro-fuzzy inference system for land subsidence susceptibility mapping, *Journal of Spatial Science*, (65): 401-418.

Li, Z., Zhou, H. and Xu, Y. 2013. Research on prediction model of support vector machine-based

2012.Application of an adaptive neuro fuzzy inference system to ground subsidence hazard mapping. *Computers & Geosciences*, 48: 228–238.

Poland, J.F. 1984. Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, *Studies and Reports in Hydrology*, 40:305-309.

Shrestha, P. K. Shakya, N. M. Pandey, V. P. and Birkinshaw, S.J. 2017. Model-based estimation of land subsidence in Kathmandu Valley, Nepal. Geomatics, *Natural Hazards and Risk*, 8 (2): 974-996.

Yin, J. Yu, D. and Wilby, R. 2016. Modelling the impact of land subsidence on urban pluvial flooding; a case study of downtown Shanghai, China. *Science of The Total Environment*, 544: 744-753.

land subsidence caused by foundation pit dewatering. *Advanced Materials Research*, 671-674: 105–108.

Lofgren, B.E. 1969. Changes in aquifer-system properties with groundwater depletion, Proceeding of International Conference on Evaluation and Prediction of Land Subsidence, Pensacola, American Society of Civil Engineers: 26-46.

Nguyen, M., Lin, Y.N., Tran, Q.C., Ni, C.F., Chan, Y.C., Tseng, K.H. and Chang, C.P. 2022. Assessment of long-term ground subsidence and groundwater depletion in Hanoi, Vietnam, *Engineering Geology*, (299), https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106555.

Park, I., Lee, J. and Lee, S. 2014. Ensemble of ground subsidence hazard maps using fuzzy logic. *Center European Journal of Geoscience*s, 6 (2): 207–218.

Park, I. Choi, J. Jin Lee, M. and Lee, S.

Spatial assessment of areas at risk of land subsidence in the Fadafan village, Kashmar County

Ehsan Hosein Nezhad Makki[1], Mehdi Bashiri[2*], Hamid Reza Moradi[3]

Submitted: 7 May 2022 **Accepted:** 20 August 2022

Abstract

Population growth, along with the development of industry and agriculture, has led to an increase in water consumption. Limited surface water resources have led to over-harvesting of groundwater aquifers and has had irreparable consequences for the country's water resources and environment, including the subsidence phenomenon, which has covered most of the country's plains. The present research aims to identify the effective factors and areas at risk of subsidence in Fadafan village of Kashmar. For risk zoning, during 2019, the lithology, land use, Petrology, aquifer Extraction rate, Distance from the stream, Fault, exploitation wells, springs and aqueducts factors as well as geomorphological factors including slope, direction and height studied and each factor turned into an information layer, then modeling and evaluation were performed using random forest algorithm in R software. Then, to determine the areas prone to subsidence, risk zoning maps in five classes were extracted using two methods of information value and area density in ArcGIS environment. The results showed that in the methods of area density and information value, 97.01 and 91.04% of subsidence were in the very- high and high-risk class, respectively. Therefore, both methods have been successful in risk zoning. Also, the aquifer extraction and land use factors are most important in subsidence. Also based on the ROC curve, random forest algorithm with very high accuracy (93%) has provided good results in prioritizing and the importance of effective factors in subsidence. The southern part of the region with rangeland use, has the highest and irrigated agriculture in the region has the lowest risk in the spatial development of land subsidence. As a result, aquifer recharge management by spreading floods and reducing water extraction in the southern part of the region can be effective and practical in reducing the risk of occurrence and development of subsidence.

Keywords: Aquifer, Random Forest algorithm, Geographic information system, Modeling, Susceptibility to subsidence.

1 - M.Sc. in Watreshed Management, Department of Nature Engineering and Medicinal Plants, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Torbat-Heydarieh, Khorasan-Razavi, Iran
2 - Assistant Professor, Department of Nature Engineering and Medicinal Plants, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Torbat-Heydarieh, Khorasan-Razavi, Iran
3 - Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran
(*- Corresponding author Email: m.bashiri@torbath.ac.i)
DOI: 10.22048/rdsj.2022.340615.2020