ارزیابی تطبیقی مدل های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در پهنه بندی خطر لرزه ای استان کرمانشاه

چکیده:

زمین‌لرزه یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی در ایران است و استان کرمانشاه به دلیل قرارگیری در کمربند چین‌خورده و راندگی زاگرس، از فعال ترین پهنه های لرزه خیز کشور محسوب می شود. هدف پژوهش حاضر پهنه بندی خطر زمین لرزه در این استان با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، داده های زمین شناسی، لرزه زمین ساختی و مورفومتری و همچنین استفاده از دو الگوریتم یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی (RF) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) است. ابتدا مجموعه‌ای از متغیرهای مؤثر بر لرزه خیزی(ارتفاع، انحناء، شدت زلزله های گذشته، تراکم گسل، زمین شناسی، شیب، عمق زلزله های رخ داده، فاصله از گسل، انحناء سطح، انحناء مقطع) استخراج و لایه های مکانی آن ها تهیه شد. سپس با استفاده از مدل‌های RF و SVM ،الگوی فضایی خطر و تولید نقشه نهایی پهنه بندی مورد تحلیل قرار گرفتند. همچنین برای سنجش توانایی مدل در تفکیک کلاس‌ها و پیش‌بینی صحیح داده‌ها، از شاخص AUC استفاده شد. نتایج نشان داد هر دو مدل عملکرد مناسبی در پیش بینی خطر زمین لرزه داشته اند، اما مدل RF در مراحل اعتبار سنجی و آزمون دقت بالاتری نسبت به SVM ارائه کرد. نقشه های نهایی پهنه بندی خطر حاصل از RF و SVM نشان می‌دهند که مناطق با خطر بالا و بسیار بالا عمدتاً در محدوده های هم راستا با ساختار چین خورده و رانده زاگرس، در مجاورت گسل‌های اصلی و در نواحی با شیب و ارتفاع قابل توجه متمرکز شده‌اند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنای مهمی برای برنامه ریزی توسعه شهری و روستایی، مکان یابی زیرساخت های حیاتی، و تدوین سیاست های کاهش خطر پذیری و مدیریت بحران در یکی از لرزه خیزترین استان های کشور باشد.

کلمات کلیدی: زمین لرزه، ، یادگیری ماشین، جنگل تصادفی (RF)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، ، کرمانشاه

۱- مقدمه:

مخاطرات طبیعی، مخاطراتی هستند که تکوین و تشکیل آن ها متکی به حوادث طبیعی است و انسان می تواند در وقوع آن ها نقش تحریک کننده داشته باشد. اما ویژگی های محیط طبیعی زمینه ساز شکل گیری و تکوین مخاطره به شمار می رود(اکبری،۱۳۹٤). زمین لرزه ها از جمله فاجعه بارترین مخاطرات طبیعی هستند که موجب تلفات گسترده انسانی، آسیب دیدگی و خسارات اقتصادی قابل توجه می شوند(Abdullah et al., 2023; Gong et al., 2024; Masson et al., 2025). ایران به علت موقعیت لرزه خیزی و قرارگری بر روی کمربند زلزله آسیب پذیر

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهش
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

بوده و بسیاری از سکونتگاه های انسانی بر روی گسل فعال قرار دارد. نقشه پهنه بندی خطر نسبی زمین لرزه در ایران نشان می دهد که بیشتر نقاط شهری و غیرشهری کشور در نواحی با خطر نسبی زیاد قرارگرفته اند(کاشانی اصل، ۱۳۹۵). ساختمان زمین شناسی فلات ایران و حواشی آن به سیستم کمربند چین خورده دوران سوم زمین شناسی ارتباط دارد که از نظر ذخایر معدنی و اقتصادی یک عامل بالقوه و مثبت و از نظر تکامل لرز ه خیزی یک عامل منفی می باشد (رمضانی گورابی، ۱۳. ۱۰۷) آمارها نشان میدهد استان کرمانشاه، به دلیل قرارگیری بر روی کمربند چین خورده و راندگی زاگرس، یکی از فعال ترین نواحی لرزه خیز ایران محسوب می شود. و هر چند سال یک بار زلزله های ویرانگر، قسمت های از این استان را تخریب می کند(پژوهان و همکاران،۱۳۹۸). پهنه بندی منطق بر اساس نقش عوامل مخرب محیطی، تقسیم نواحی جغرافیایی به درجات مختلف بر حسب واکنش در مقابل بلاهای طبیعی و نقشه پهنه بندی آسیب پذیری ناشی از زلزله می تواند در پیش بینی جهت کاهش اثرات بلاهای طبیعی مفید باشد(قاسمیان،۱۳۸۸). این تدابیر حاصل شناخت و بررسی زمین است که امکان خطر زمین لرزه وجود دارد و می توان با بهره گیری از آن و تجزیه و تحلیل آنها، آمادگی لازم جهت پیشگیری و یا کنترل زلزله را بدست آورد. در این هدف، سیستم اطلاعات جغرافیایی در تلفیق نقشه های مرتبط نقش بسزایی دارد. الگوریتم های یادگیری ماشین به عنوان ابزارهایی کارآمد در تحلیل داده‌های پیچیده، به ویژه در زمینه پیش بینی و مدل سازی زلزله ها، مورد توجه قرار گرفته اند، و عنوان سکویی برای ادغام و تجزیه و تحلیل داده‌های جغرافیایی، امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلف زلزله و بررسی تأثیرات آن ها بر سکونتگاه ها و زیرساخت ها را فراهم می آورد. روش‌های سنتی ارزیابی خطر لرزه ای، گرچه پایه های علمی محکمی دارند، اما در برخورد با مکانی های پیچیده و عدم قطعیت داده ها، با محدودیت هایی روبرو خواهیم بود. در سال‌های اخیر، تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) با الگوریتم های یادگیری ماشین (ML) رویکردی نوین و قدرتمند برای تحلیل داده های مکانی و مدل سازی پدیده های پیچیده مانند خطر لرزه ای ارائه داده است. در ادامه به تعدادی از پژوهش های داخلی مرتبط با موضوع پرداخته شده است. غلامی راد و بهروزی بان بیدی(۱٤۰۲) در مقاله ای با عنوان استقرار سکونتگاه های روستایی استان کرمانشاه در ارتباط با گسل ها پرداخته اند. در این تحقیق نقشه های پایه ابتد تهیه گردید، سپس استقرارسکونتگاه ها در رابطه با لایه گسل GIS با استفاده از تحلیل و از آزمون همبستگی پیرسون، جهت تعیین میزان همبستگی عوامل طبیعی با پراکنش سکونتگاه ها استفاده شد. نتایج حاصل از روش ضریب همبستگی نشان میدهد که بین عامل طبیعی گسل و توزیع سکونتگاه ها رابطه معنی داری در ناحیه مورد مطالعه وجود دارد و پراکنش سکونتگاه های روستایی مورد مطالعه در رابطه با قابلیت ها و محدودیت های محیطی- اکولوژیکی انتظام نیافته اند. در سطح گسترده‌تر، مطالعاتی مانند پژوهش زارع و همکاران (۲۰۰٤) و شیبانی (۲۰۱۰)، پهنه بندی خطر لرزه ای ایران را با استفاده از داده های گسترده تاریخی و دستگاهی انجام داده‌اند. این تحقیقات نشان می دهد که رشته کوه زاگرس یکی از فعال ترین مناطق تکتونیکی کشور است و گسل های مهمی مانند گسل اصلی زاگرس[1] و گسل های فرعی مرتبط با آن در افزایش احتمال رخداد زمین لرزه های شدید نقش دارند. انجمن پژوهش های ملی ایتالیا پهنه بندی خطر زمین لرزه را با استفاده از فناوری سیستم اطلاعات جغرافیایی طی یک پژوهش انجام داده است. در این تحقیق نکات موثری چون لرزش مستقیم زمین و اثرات

[1] Main Zagros Reverse Fault

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

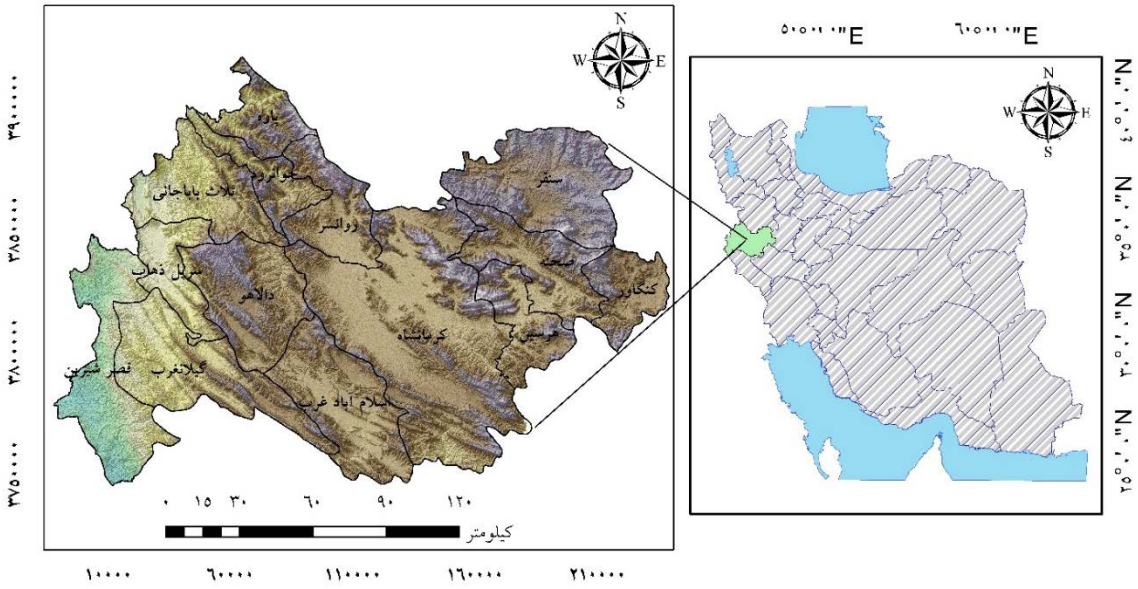
ثانویه(لغزش یا رانش) مورد نظر بوده است. استفاده از مدل فیزیکی برای شیب و روش های آماری و متغییر های مستقیلی مانند زمین شناسی، ژئومورفولوژی، هیدرولوژی و پارامترهای لرزه ای در نهایت به صورت یک نقشه ضریب خطر نمایش داده شده است. تاسیری و همکاران (۲۰۲۰) مروری بر لرزه خیزی ایران ارائه کردند و بر نیاز به بهبود روش های ارزیابی ریسک تأکید نمودند(Taesiri et al,2020). ادیب و همکاران (۲۰۱٦) مطالعه پهنه بندی لرزه ای را در استان یزد انجام دادند که بر اهمیت تلفیق داده های تاریخی با روش های نوین تأکید داشت. نتایج آن ها نشان داد مناطقی که سابقه فعالیت لرزه‌ای دارند، نیازمند پایش مستمر و به روزرسانی ارزیابی ها برای کاهش مؤثر خطر هستند(Adib et al., 2016). جلالیان ودادگر(۱۳۹٤) در مطالعه ای تحت عنوان پهنه بندی آسیب پذیری سکونتگاه های روستایی در برابر زلزله با مدلAHP در محیط GIS در بخش چورزق شهرستان طارم پرداخته اند. برای این کار، ابتدا پارامترهای موثر مانند: وجود گسل، جنس زمین، شیب، زمین لغزش و تراکم جمعیت انتخاب شده و سپس لایه های اطلاعاتی آنها در محیط GIS تهیه و کلاس بندی شد. وزن دهی به معیارها با استفاده از منطق فازی و مدل تحلیل سلسله مراتبی صورت گرفته و نقشه نهایی پهنه بندی خطر زلزله در چهار کلاس پهنه های با خطر پائین، خطر متوسط، خطر بالا و خطر خیلی بالا به دست آمد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد که بخش عمده ای از محدوده شهرستان طارم و سکونتگاه های روستایی منطقه در پهنه های با خطر بالا (٤٥/۷ درصد) و خیلی بالا (١٤/۷ درصد) قرار گرفته است. با توجه به پهنه های خطر بالقوه، ضروری است تا محل مناسبی برای اسکان اضطراری در منطقه مکان یابی و تجهیز شود. الگوریتم ماشین یکی از جدیدترین روش های است، که بر پایه تئوری یادگیری آماری بنا نهاده شده است (یمانی و همکاران، ۱۳۹۱). الگوریتم SVM برای ارزیابی و آزمون مجموعه ای از داده ها مورد استفاده قرار می گیرد(Yao et al, 2008). این مدل در سال های اخیر به دلیل عملکرد خوب طبقه بندی و قابلیت تحمل خطا و تعمیم مناسب، توجه زیادی را به خود جلب کرده است(Wang and Brenning,2021; Zhao and Zhao,2021). با پیشرفت تکنولوژی و افزایش حجم داده های لرزه نگاری و مکانی، استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین برای تحلیل پیچیدگی های پدیده های لرزه ای و بهبود دقت پهنه بندی لرزه خیزی اهمیت فزاینده ای یافته است برای مثال، یمانی و همکاران (۱۳۹۱) خطر وقوع زمین لغزش را در حوضه درکه تهران با استفاده از الگوریتم های مدل ماشین بردار پشتیبانی پهنه بندی کردند. نتیجه مطالعه نشان داد بین توابع اجرا شده، تابع حلقوی به خاطر انطباق بیشتر با واقعیت، بهترین عملکرد را دارد. الگوریتم ها قادر هستند روابط غیرخطی پیچیده بین پارامترهای ورودی (مانند موقعیت مکانی، فاصله از گسل، بزرگی زلزله های گذشته) و خروجی (مانند شدت لرزه خیزی یا احتمال وقوع زلزله) را مدل سازی کنند. احمدی و همکاران(۱۳۹٤) با استفاده از مدل SVM پهنه های مستعد زمین لرزه آزاد راه خرم آباد- پل زال را شناسایی کردند. نتیجه نشان داد تابع چند جمله ای در شناسایی سطوح مستعد دقت بیشتری داشته است. ماجدی وحسین زاده(۱۳۹۷) در مقاله ای با عنوان پهنه بندی مناطق زلزله خیز با استفاده از مدل AHP در محیط GIS در شهرستان کرمانشاه پرداخته اند. دراین تحقیق، ابتدا پس از بررسی ادبیات پژوهش و مطالعات کتابخانه ای، ۸ عامل شامل: شیب دامنه، ارتفاع از سطح دریا، بارندگی، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از شبکه زهکشی، کاربری اراضی و سنگ شناسی به عنوان عوامل مؤثر در وقوع زمین لرزه های منطقه تشخیص داده شدند. سپس لایه های اطلاعاتی این عوامل در محیط GIS تهیه شده و وزن کلاس های هر کدام از عوامل با روش تحلیل سلسله مراتبی تعیین می گردد. نتایج این پژوهش نشان می دهد، روش AHP

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

به دلیل برخورداری از متغیرهای بیشتر و کلاس بندی اصولی و بدون اعمال نظر مستقیم کارشناسان نسبت به روش های دیگر برتر بوده و از دقت بیش تری برخوردار است. این پژوهش نشان دهنده اهمیت استفاده از تکنیک های نوین یادگیری ماشین و GIS در بهبود دقت و کارایی پهنه بندی زلزله ها، شناسایی الگوهای زلزله خیزی و نقشه مناطق آسیب پذیر در طول زمان به منظور ارائه راهکارهایی برای کاهش خطرات ناشی از زلزله در استان کرمانشاه است و می تواند نقشی کلیدی در ارتقاء درک ما از الگوهای زمین لرزه خیزی و تأثیرات آن بر مناطق پر خطر ایفا کند.

۲- منطقه مورد مطالعه

استان کرمانشاه یکی از مهم‌ترین مناطق غرب ایران است که با وسعتی حدود ۲۵ هزار کیلومتر مربع در امتداد رشته کوه های زاگرس قرار گرفته و از شمال به کردستان، از شرق به همدان، از جنوب شرق به لرستان و از غرب به کشور عراق محدود می شود. این استان به سبب قرارگیری در مسیرهای تاریخی و تجاری و همچنین مجاورت با مرز رسمی ایران و عراق، از گذشته تاکنون نقش ارتباطی و راهبردی مهمی در کشور داشته است. توپوگرافی کرمانشاه عمدتاً کوهستانی است و دشت های حاصلخیزی مانند دشت کرمانشاه و سرپل‌ذهاب در میان ارتفاعات آن شکل گرفته اند. رودخانه هایی همچون قره سو و الوند در کنار بارش نسبتاً مناسب، بخش هایی از استان را مستعد کشاورزی کرده اند. آب و هوای منطقه معتدل کوهستانی است که زمستان های سرد و بارانی و تابستان های نسبتاً معتدل را رقم می‌زند. جمعیت استان حدود دو میلیون نفر است و در شهرها و روستاهای متعددی مانند کرمانشاه، اسلام آباد غرب، پاوه، جوانرود، کنگاور و سرپل ذهاب پراکنده اند. در مجموع، ویژگی های جغرافیایی، اقلیمی، فرهنگی و اقتصادی کرمانشاه آن را به منطقه‌ای ارزشمند برای مطالعات محیطی، اجتماعی و توسعه ای تبدیل کرده است(شکل ۱).



نگاره۱: نقشه موقعیت جغرافیایی استان کرمانشاه

۳- روش تحقیق

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهش
«ا ط م»

در این پژوهش با رویکردی کاربردی و در قالب یک مطالعه کمی، تلاش شده است تا با استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین نقشه مخاطره زلزله تهیه شود. در گام نخست، با مرور جامع مطالعات پیشین و بررسی منابع علمی مرتبط، تعداد ۱۰ پارامتر کلیدی مؤثر(ارتفاع، انحناء، شدت زلزله های گذشته، تراکم گسل، زمین شناسی، شیب، عمق زلزله های رخ داده، فاصله از گسل، انحناء سطح، انحناء مقطع) انتخاب گردید. پس از استخراج لایه های اطلاعاتی مربوط به این پارامترها، تمامی داده‌ها به سیستم مختصات UTM منطقه ۳۸ (UTM Zone 38) تبدیل شدند و با یکسان سازی اندازه پیکسل، دقت مکانی و هندسی لایه های اطلاعاتی تضمین گردید. در گام بعدی، داده های مربوط به رخداد زمین لرزه ها از پایگاه های داده معتبر و همچنین وب سایت ESRI استخراج شد. در مجموع تعداد ۲۰۷ نقطه مربوط به وقوع زلزله در محدوده مورد مطالعه جمع‌آوری گردید و به منظور ایجاد تعادل در داده ها، تعداد ۲۰۷ نقطه شاهد فاقد رخداد زلزله نیز به صورت تصادفی در منطقه انتخاب شد. بدین ترتیب مجموعه ای شامل ٤١٤ نقطه نمونه برای آموزش و ارزیابی مدل های یادگیری ماشین فراهم شد. پس از آماده‌سازی پارامترها و نقاط نمونه، تمامی داده ها با استفاده از زبان برنامه نویسی پایتون در محیط نرم‌افزار Spyder پردازش و مدل سازی شدند. در این مرحله، مختصات نقاط به همراه مقادیر استخراج شده از ۱۰ پارامتر مؤثر به عنوان داده های ورودی به الگوریتم های یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی (Random Forest) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) وارد شدند تا الگوی فضایی مرتبط با وقوع زلزله شناسایی شده و نقشه نهایی مخاطره زلزله تولید گردد. الگوریتم جنگل تصادفی[2] به عنوان یکی از روش های یادگیری جمعی مبتنی بر درخت تصمیم در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. این الگوریتم با ایجاد تعداد زیادی درخت تصمیم و ترکیب نتایج آن ها از طریق رأی گیری، موجب افزایش دقت پیش‌بینی و کاهش مشکل بیش برازش در مدل می شود. علاوه بر این، Random Forest امکان ارزیابی میزان اهمیت هر یک از متغیرهای ورودی را فراهم می‌کند که از طریق آن می‌توان نقش نسبی پارامترهای مختلف در وقوع زلزله را بررسی و تحلیل کرد. همچنین در این پژوهش از مدل رگرسیون بردار پشتیبان[3] یعنی SVR استفاده شد. این الگوریتم یکی از روش های قدرتمند یادگیری ماشین برای مدل سازی روابط پیچیده و غیرخطی بین متغیرها محسوب می شود. SVR با بهره گیری از توابع هسته (Kernel Functions) قادر است الگوهای پنهان در داده های فضایی را شناسایی کرده و با بیشینه سازی حاشیه اطمینان و کمینه سازی خطای تعمیم، پیش بینی قابل اعتمادی از احتمال وقوع پدیده مورد مطالعه ارائه دهد. به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌ها، مجموعه داده‌ها به سه بخش آموزش، اعتبارسنجی و آزمون با نسبت های ۷۰ درصد، ۱۵ درصد و ۱۵ درصد تقسیم شدند. این تقسیم بندی با استفاده از روش نمونه برداری طبقه بندی شده (Stratified Sampling) انجام شد تا نسبت کلاس های وقوع و عدم وقوع زلزله در هر یک از زیر مجموعه ها حفظ گردد. پس از آموزش مدل ها، تحلیل اهمیت ویژگی ها برای شناسایی میزان تأثیر هر یک از پارامترها بر وقوع زلزله انجام شد و در نهایت نقشه‌های احتمال یا مخاطره زلزله برای منطقه مورد مطالعه تولید گردید. در پایان، به منظور تحلیل فضایی نتایج و ارائه تصویر دقیق تری از وضعیت خطر در سطح منطقه، از ابزار Zonal Statistics در محیط GIS استفاده شد. با بهره‌گیری از این ابزار، میانگین مقدار مخاطره زلزله برای هر یک از شهرستان های استان کرمانشاه محاسبه و نقشه نهایی میانگین خطر در سطح شهرستان ها استخراج گردید. این نقشه می تواند مبنایی

[2] Random Forest
[3] Support Vector Regression

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهش
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

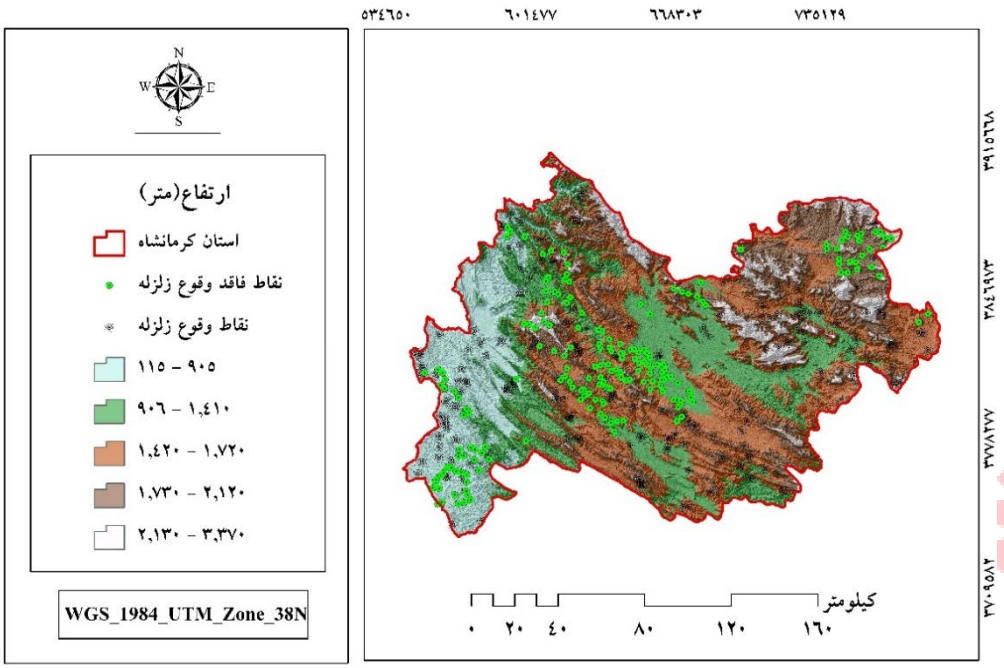
برای برنامه ریزی های مدیریتی و تصمیم گیری در زمینه کاهش خطرپذیری و مدیریت بحران در منطقه مورد مطالعه باشد.



نگاره۲: فلوچارت روش تحقیق

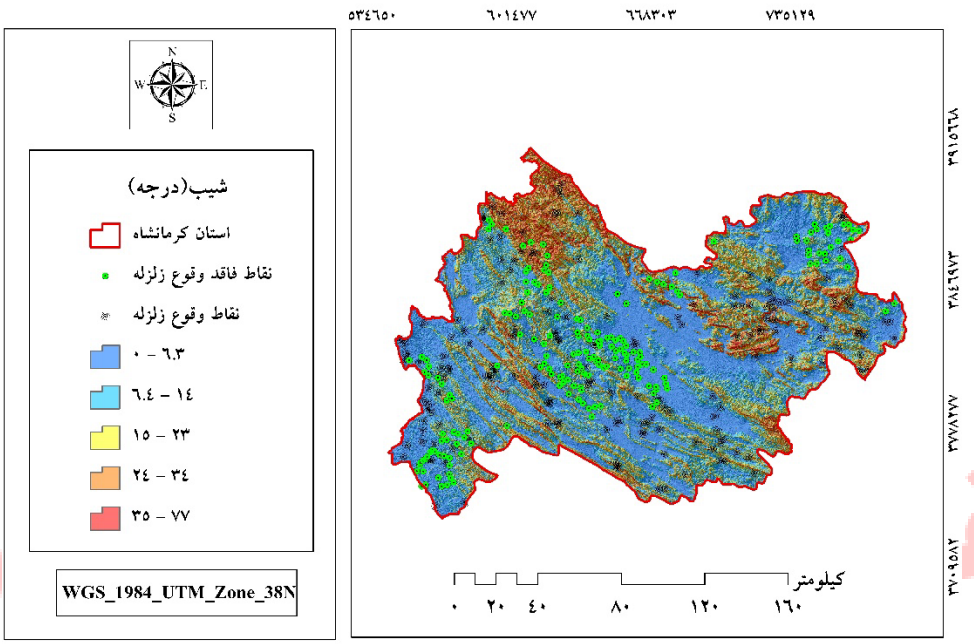
٤- یافته های پژوهش

در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل داده ها و مدل سازی انجام شده در پژوهش حاضر ارائه و تفسیر می‌شود. به منظور ارزیابی خطر وقوع زمین لرزه در استان کرمانشاه، مجموعه‌ای از عوامل مؤثر شامل متغیرهای زمین شناسی، لرزه زمین ساختی و مورفومتری مورد بررسی قرار گرفت و با بهره‌گیری از روش‌های یادگیری ماشین، الگوی فضایی خطر در منطقه مطالعه شناسایی شد. نگاره های ۳ و ٤ ارتفاع و شیب منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.

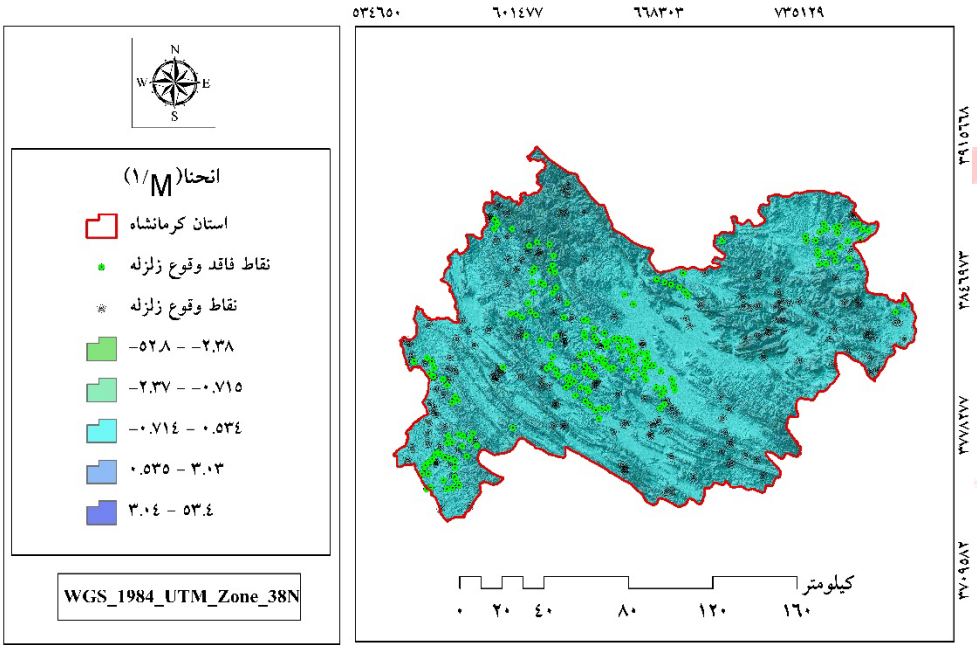


نگاره۳: نقشه ارتفاع استان کرمانشاه

الگوی ارتفاع در استان کرمانشاه تحت تأثیر مستقیم ساختار چین خورده زاگرس قرار دارد و به طور کلی روندی ناهموار و کوهستانی را نشان می‌دهد. در بخش های غربی و شمال غربی استان، به ویژه در نواحی پاوه، جوانرود و ثلاث باباجانی، ارتفاعات قابل توجهی مشاهده می‌شود که بخشی از رشته کوه های زاگرس مرتفع را تشکیل می دهند و ارتفاع آنها در بسیاری از نقاط به بیش از ۲۰۰۰ متر از سطح دریا می‌رسد. در مقابل، هرچه به سمت شرق و جنوب شرق استان حرکت می کنیم، ارتفاع به تدریج کاهش یافته و دشت های نسبتاً هموارتری مانند دشت کرمانشاه، هرسین و کنگاور شکل می‌گیرد. این تغییرات ارتفاعی علاوه بر ایجاد تنوع چشمگیر در سیمای ژئومورفولوژیک منطقه، در شکل‌گیری الگوی اقلیمی و پوشش گیاهی نیز نقش مهمی دارد، به طوریکه مناطق مرتفع تر معمولاً بارش بیشتری دریافت کرده و دارای پوشش گیاهی متراکم تر هستند، در حالی که نواحی کم ارتفاع تر با اقلیم نسبتاً خشک تر و فعالیت های کشاورزی گسترده تر شناخته می شوند.(نگاره ٤) الگوی شیب در استان کرمانشاه را نشان داده است که به طور مستقیم از توپوگرافی کوهستانی زاگرس تبعیت می کند و نشان دهنده تمرکز شیب های زیاد در نواحی غربی و شمال غربی استان است. در این مناطق، به دلیل حضور رشته کوه های مرتفع و دره های عمیق، شیب دامنه ها به طور قابل توجهی افزایش یافته و در بسیاری از نقاط به بیش از ٣٤ درجه می‌رسد. در مقابل، مناطق مرکزی و شرقی استان شامل دشت های کرمانشاه، اسلام آباد غرب، هرسین و کنگاور دارای شیب های ملایم تر و سطوح نسبتاً هموار هستند. این توزیع فضایی شیب نقش مهمی در شکل گیری فرایند های ژئومورفولوژیک و هیدرولوژیک منطقه دارد، از نظر مخاطرات زمین‌شناسی نیز مناطق دارای شیب زیاد در برابر ناپایداری دامنه‌ها و وقوع رانش زمین حساس‌تر هستند.



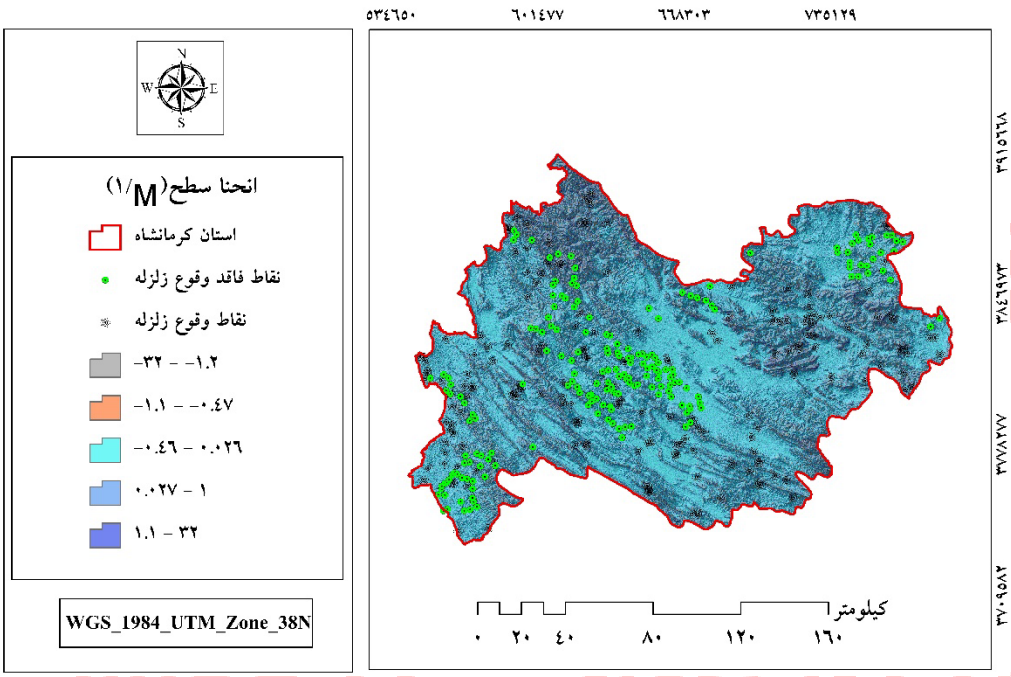
نگاره٤: نقشه شیب استان کرمانشاه



نگاره٥: نقشه انحنا استان کرمانشاه

نقشه شاخص انحنا بیانگر شکل هندسی سطح زمین و نحوه تغییرات آن در مقیاس محلی است و می تواند نواحی محدب، مقعر و نسبتاً هموار را از یکدیگر تفکیک کند. در استان کرمانشاه، الگوی انحنا به شدت تحت تأثیر ساختارهای چین خورده و ناهمواری های زاگرس قرار دارد، به‌گونه‌ای که در مناطق کوهستانی غرب و شمال غرب استان، تغییرات سریع توپوگرافی باعث ایجاد مقادیر بالاتر انحنا شده است. در این مناطق، ترکیبی از سطوح محدب در خط الرأس ها و سطوح مقعر در دره ها دیده می شود که بیانگر فرایند های فعال فرسایش و جابجایی رسوبات است. در مقابل، دشت های مرکزی و شرقی استان دارای مقادیر انحنای کمتر و سطوح نسبتاً یکنواخت هستند. از دیدگاه

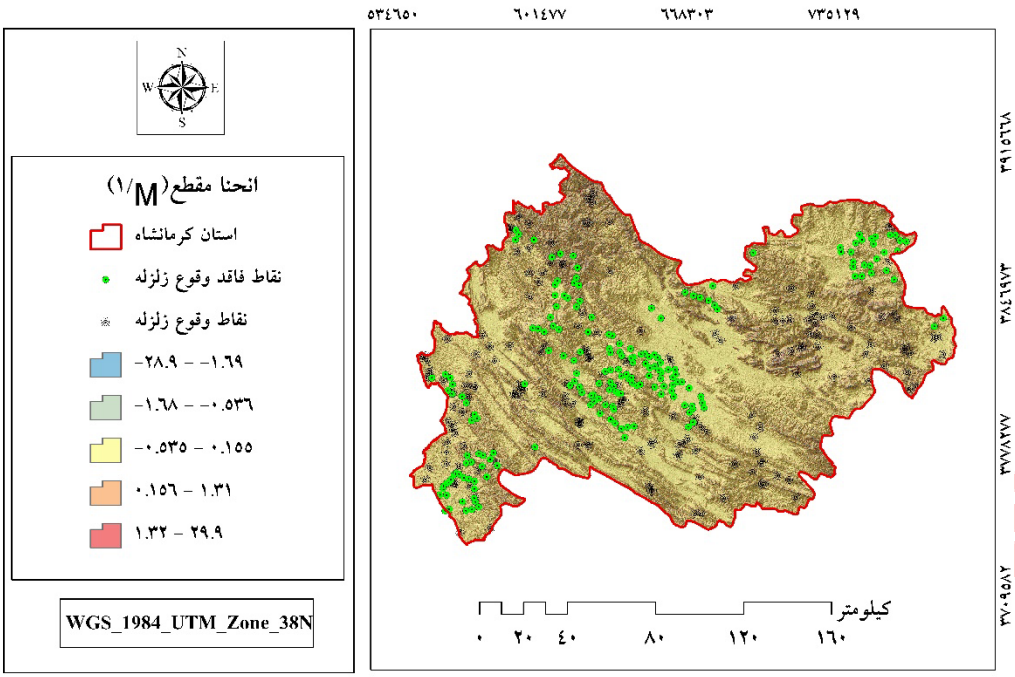
ژئومورفولوژیک، نواحی مقعر معمولاً محل تجمع آب و رسوبات بوده و در بسیاری از موارد دارای رسوبات نرم و آبرفتی هستند، در حالی که نواحی محدب بیشتر در بخش های مرتفع و خط الراس ها مشاهده می شوند. این ویژگی ها می تواند در تحلیل پایداری دامنه ها و همچنین بررسی نحوه پاسخ زمین به امواج لرزه ای نقش مهمی ایفا کند(نگاره ۵)



نگاره٦: نقشه انحنا سطح استان کرمانشاه

نقشه انحنای سطحی الگوی خمیدگی سطح زمین در راستای افقی را نشان می‌دهد و بیانگر نحوه واگرایی یا همگرایی جریان های سطحی در سطح زمین است. در استان کرمانشاه، مقادیر بالای انحنای سطحی عمدتاً در مناطق کوهستانی غربی و شمال غربی مشاهده می شود، جایی که تغییرات سریع در جهت شیب و وجود ناهمواری های پیچیده باعث ایجاد الگوهای متنوعی از خمیدگی سطح شده است. در این نواحی، وجود سطوح محدب و مقعر متوالی نشان دهنده فعالیت شدید فرایند های فرسایشی و تکتونیکی است. در مقابل، در بخش های مرکزی و شرقی استان که شامل دشت های نسبتاً هموار هستند، مقادیر انحنای سطحی کاهش یافته و خطوط توپوگرافی یکنواخت تر می شوند. از نظر هیدرولوژیکی، مناطق با انحنای مقعر تمایل بیشتری به تجمع جریان های سطحی دارند، در حالی که در مناطق محدب جریان ها از یکدیگر دور می‌شوند. این ویژگی‌ها در بررسی فرایندهای فرسایش، توسعه شبکه زهکشی و همچنین تحلیل پایداری دامنه ها در هنگام وقوع زمین لرزه اهمیت قابل توجهی دارند(نگاره ٦).

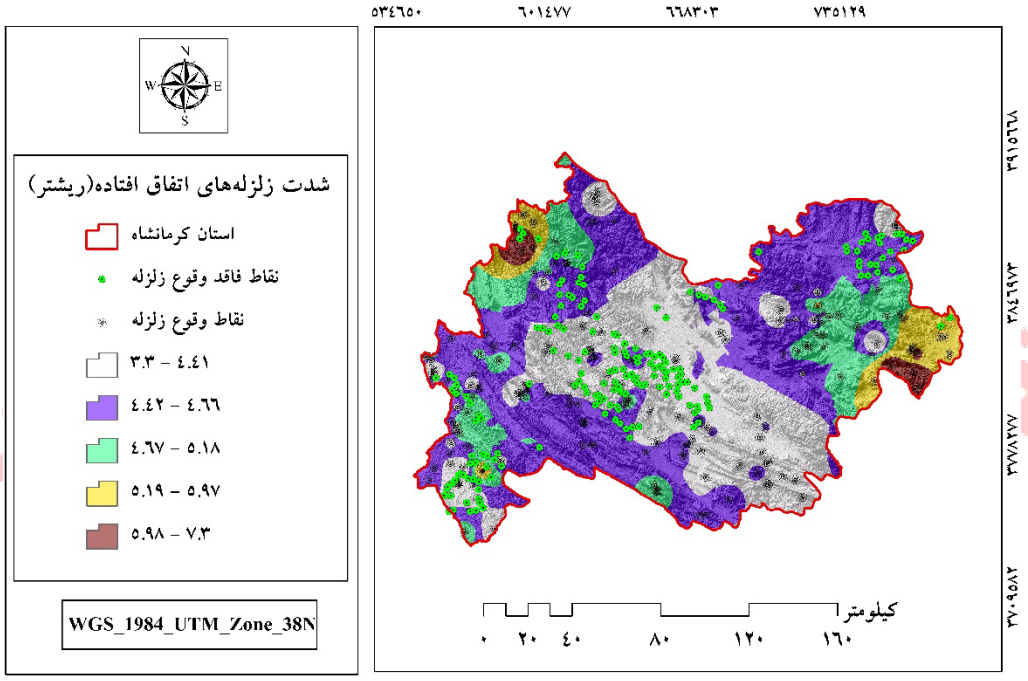
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »



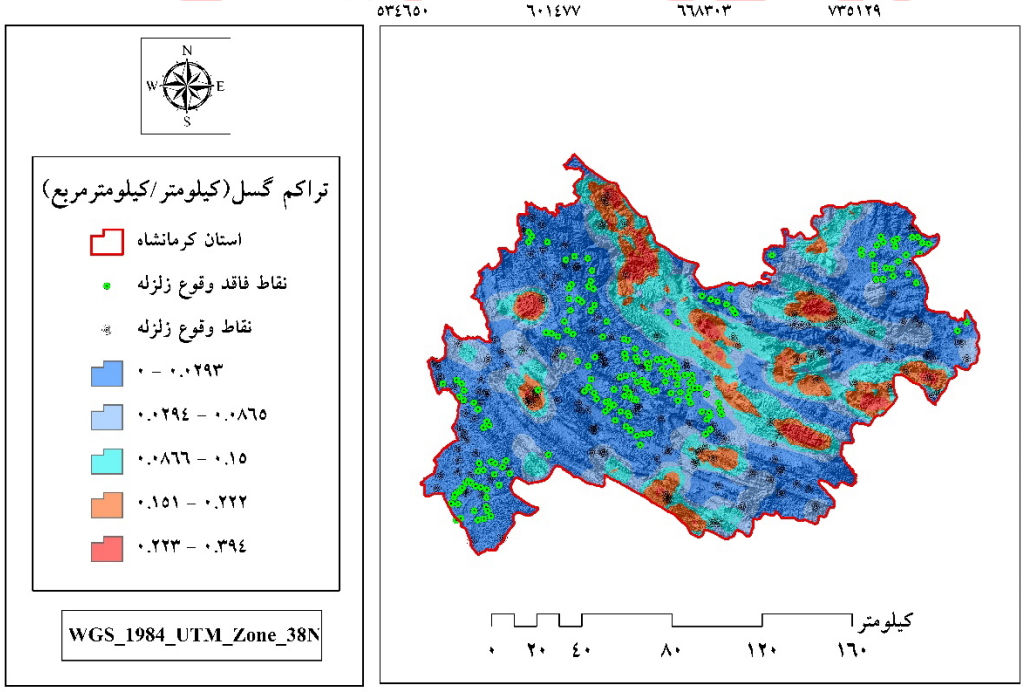
نگاره۷: نقشه انحنا مقطع استان کرمانشاه

انحنای مقطع بیانگر تغییرات شکل سطح زمین در راستای شیب اصلی دامنه است و می تواند نشان دهد که یک دامنه در امتداد شیب خود حالت محدب یا مقعر دارد. در استان کرمانشاه، الگوی انحنای مقطع ارتباط نزدیکی با ساختارهای کوهستانی زاگرس دارد و در مناطق مرتفع غربی و شمال غربی استان تنوع بیشتری از مقادیر انحنا مشاهده می‌شود. در این مناطق، دامنه های محدب در بخش های بالایی کوه ها و دامنه های مقعر در قسمت های پایینی و دره ها دیده می شوند که نشان دهنده فعالیت فرایند های فرسایشی و انتقال رسوبات است. در مقابل، در دشت های مرکزی و شرقی استان، به دلیل کاهش شیب و یکنواختی نسبی توپوگرافی، مقادیر انحنای مقطع نیز کمتر بوده و دامنه ها حالت ملایم تری دارند. بررسی این شاخص در مطالعات ژئومورفولوژی و مخاطرات طبیعی اهمیت زیادی دارد، زیرا شکل مقطع دامنه ها می تواند بر پایداری آنها تأثیر بگذارد و در هنگام وقوع زمین لرزه، دامنه های دارای انحنای نامناسب بیشتر مستعد لغزش و حرکات توده ای خواهند بود(نگاره ۷). نقشه شدت زمین لرزه ها بیانگر میزان تأثیر و قدرت لرزش های ثبت شده در نقاط مختلف استان کرمانشاه است و می‌تواند الگوی فضایی نواحی با لرزه خیزی بیشتر را مشخص کند. با توجه به موقعیت تکتونیکی استان کرمانشاه در کمربند فعال زاگرس، این منطقه یکی از نواحی لرزه خیز کشور محسوب می شود. در این نقشه معمولاً شدت های بالاتر زمین لرزه در بخش های غربی و شرقی استان مشاهده می‌شود، نواحی ای که به گسل های فعال زاگرس نزدیک تر هستند و فعالیت های تکتونیکی در آنها بیشتر است. شهرستان هایی مانند سرپل ذهاب، کنگاور و ثلاث باباجانی به دلیل نزدیکی به گسل های فعال و تجربه زمین لرزه های تاریخی، در محدوده شدت های بالاتر قرار می گیرند. در مقابل، بخش های مرکزی استان که فاصله بیشتری از برخی گسل های اصلی دارند، معمولاً شدت های کمتری از لرزش زمین را نشان می‌دهند. تحلیل این نقشه در

مطالعات پهنه بندی خطر زلزله اهمیت زیادی دارد، زیرا نشان می دهد کدام مناطق بیشتر در معرض لرزش های شدید قرار دارند و بنابراین نیازمند برنامه ریزی دقیق تر در زمینه مقاوم سازی سازه ها و مدیریت بحران هستند(نگاره ۸).



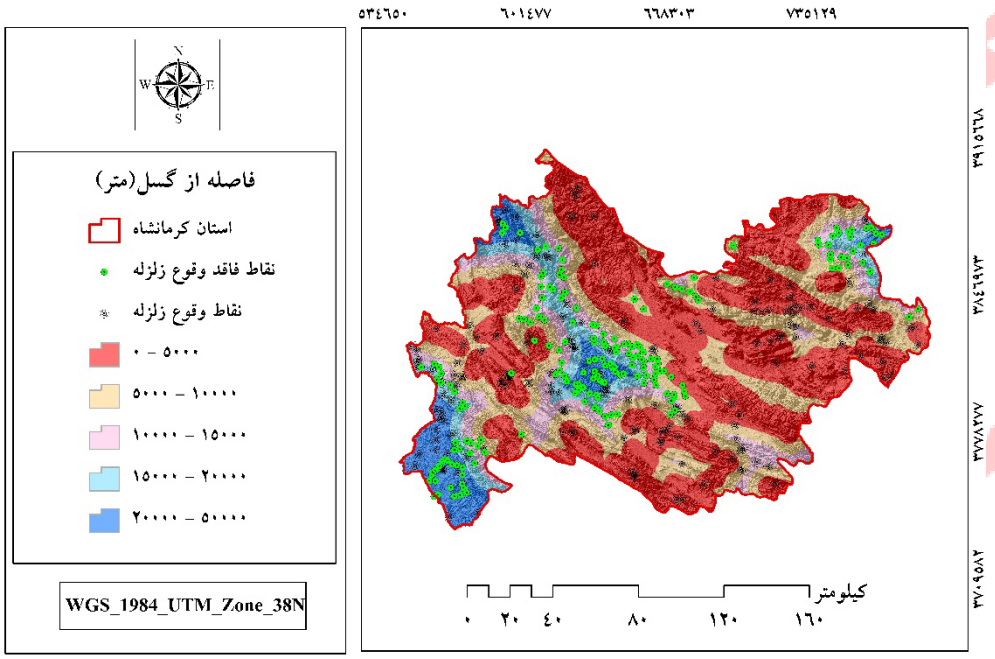
نگاره۸: نقشه شدت زلزله‌های استان کرمانشاه



نگاره۹: نقشه تراکم گسل‌های استان کرمانشاه

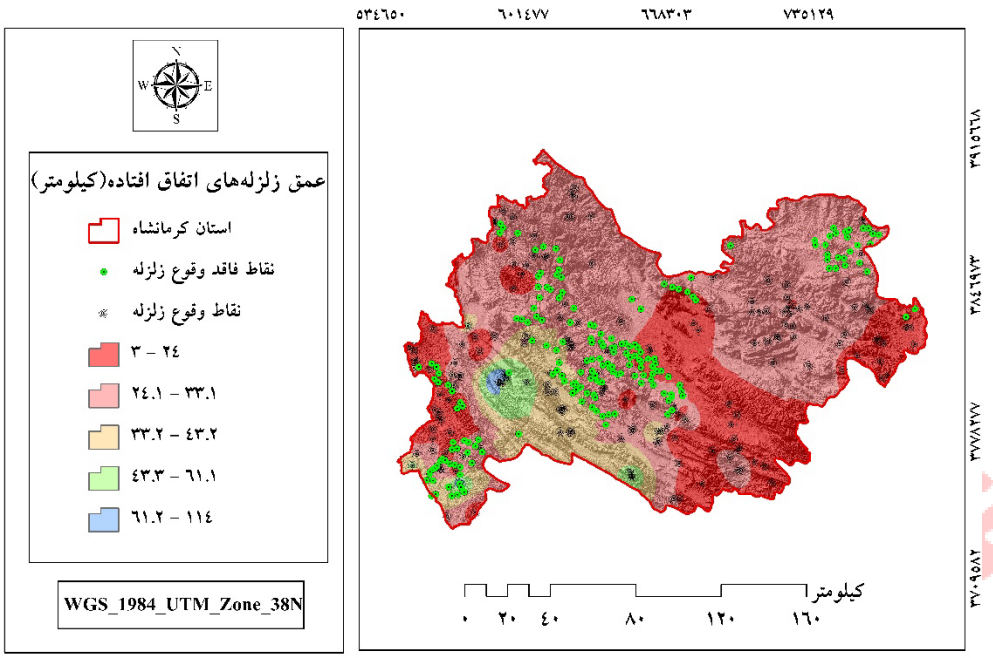
نقشه تراکم گسل‌ها میزان تمرکز و فراوانی گسل های زمین شناسی را در نقاط مختلف استان نشان می‌دهد. استان کرمانشاه به دلیل قرارگیری در زون چین‌خورده و رانده زاگرس، دارای ساختارهای تکتونیکی فراوانی است که بخش

مهمی از آنها را گسل ها تشکیل می دهند. در این نقشه، بیشترین تراکم گسل ها در بخش های غربی و شمال غربی استان مشاهده می شود، جایی که فعالیت های تکتونیکی شدیدتر بوده و چین خوردگی ها و شکستگی های زمین ساختی فراوانی وجود دارد. این نواحی از نظر لرزه خیزی نیز اهمیت زیادی دارند، زیرا تمرکز بالای گسل ها می تواند نشان دهنده احتمال بالاتر رخداد زمین لرزه باشد. در مقابل، در برخی بخش های شرقی و برخی دشت های مرکزی استان تراکم گسل ها کمتر است و ساختارهای زمین شناسی نسبتاً ساده تری مشاهده می شود. بررسی تراکم گسل ها در مطالعات خطر زمین لرزه بسیار مهم است، زیرا مناطقی که دارای تراکم گسل بالاتری هستند، معمولاً پتانسیل بیشتری برای وقوع زمین لرزه های آینده دارند و در نتیجه باید در برنامه ریزی های عمرانی و توسعه شهری مورد توجه ویژه قرار گیرند(نگاره ۹).

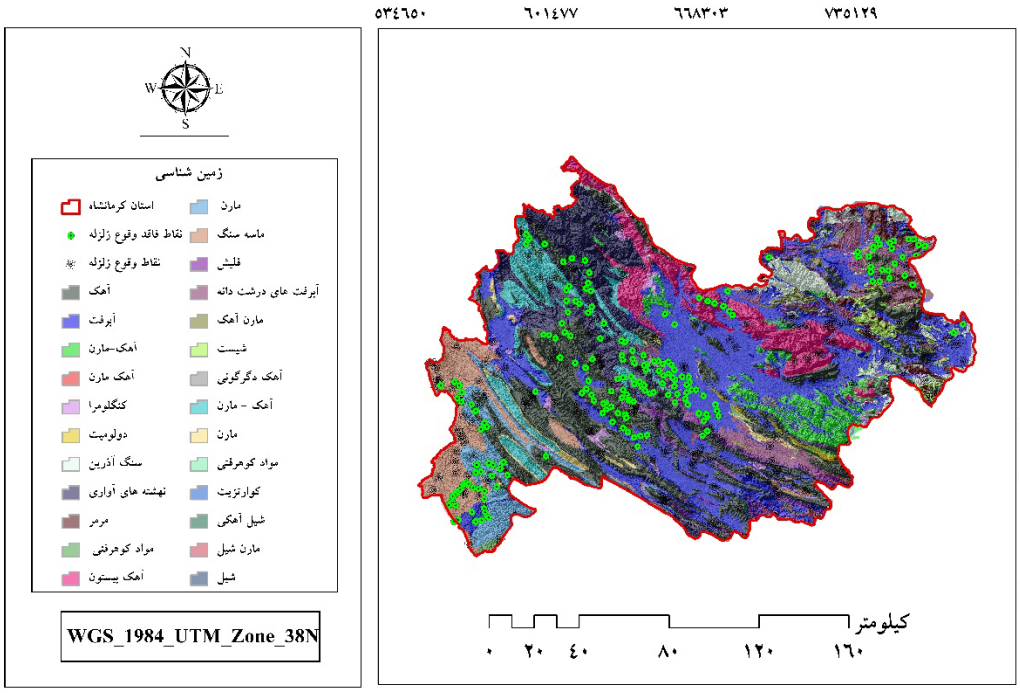


نگاره۱۰: نقشه فاصله از گسل‌های استان کرمانشاه

نقشه فاصله از گسل ها یکی از مهم ترین لایه های مورد استفاده در تحلیل خطر زمین لرزه است، زیرا فاصله مکانی هر نقطه از گسل های فعال می تواند نقش مهمی در شدت تأثیر زمین لرزه ها داشته باشد. در استان کرمانشاه، بسیاری از مناطق به دلیل وجود شبکه ای از گسل های فعال در فاصله نسبتاً کمی از این ساختارهای تکتونیکی قرار دارند. در این نقشه، مناطقی که فاصله کمتری از گسل ها دارند به عنوان نواحی با خطر بالقوه بیشتر شناخته می شوند، زیرا در صورت فعال شدن گسل، این مناطق بیشترین تأثیر را از امواج لرزه ای دریافت خواهند کرد. چنین شرایطی به ویژه در نواحی غربی استان و مناطق نزدیک به مرز ایران و عراق مشاهده می‌شود که در نزدیکی برخی گسل های فعال زاگرس قرار دارند. در مقابل، مناطقی که فاصله بیشتری از گسل ها دارند، معمولاً خطر کمتری از نظر تأثیر مستقیم گسلش تجربه می‌کنند. تحلیل این نقشه می‌تواند در تعیین نواحی مناسب برای توسعه شهری، احداث زیر ساخت ها و همچنین مدیریت ریسک زلزله نقش بسیار مهمی داشته باشد(نگاره ۱۰).



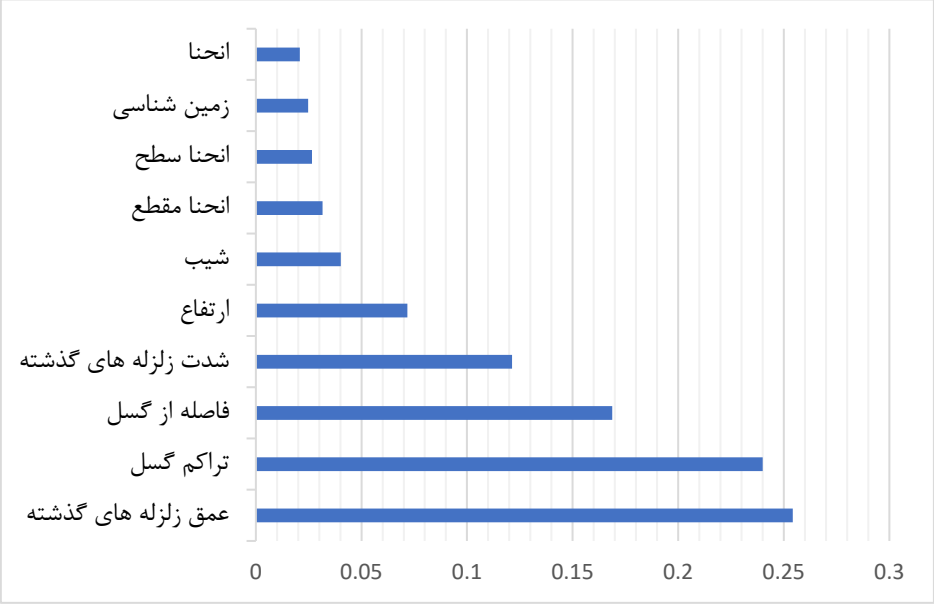
نگاره۱۱: نقشه عمق زلزله‌های اتفاق افتاده استان کرمانشاه



نگاره۱۲: نقشه زمین شناسی استان کرمانشاه

نقشه عمق زمین لرزه ها اطلاعاتی درباره عمق کانونی زمین لرزه های ثبت شده در استان کرمانشاه ارائه می‌دهد. عمق زمین لرزه یکی از عوامل مهم در تعیین میزان خسارت و شدت لرزش در سطح زمین است. به طور کلی، زمین لرزه هایی که در عمق کم‌تری رخ می‌دهند، معمولاً تأثیر بیشتری بر سطح زمین داشته و خسارات بیشتری ایجاد می‌کنند، در حالی که زمین لرزه های عمیق تر ممکن است در سطح زمین با شدت کمتری احساس شوند. در استان کرمانشاه، بسیاری از زمین لرزه ها در عمق های کم تا متوسط رخ می دهند که این موضوع با ویژگی های تکتونیکی زاگرس و

فعال بودن گسل های منطقه مرتبط است. در برخی نواحی، تمرکز زمین لرزه های کم عمق می تواند نشان دهنده فعالیت بالای گسل های سطحی باشد. بررسی الگوی توزیع عمق زمین لرزه ها به پژوهشگران کمک می‌کند تا درک بهتری از رفتار لرزه‌ای منطقه به دست آورند و بتوانند مناطق با خطر بیشتر را شناسایی کنند(نگاره ۱۱). نقشه زمین شناسی استان کرمانشاه بیانگر پراکندگی واحد های سنگی و سازند های زمین شناسی مختلف در سطح استان است. این استان به دلیل قرارگیری در کمربند چین‌خورده زاگرس دارای تنوع زمین‌شناسی قابل توجهی است و واحد های سنگی مختلفی از دوره های زمین شناسی متفاوت در آن مشاهده می‌شود. در بسیاری از مناطق کوهستانی استان، سازندهای آهکی و رسوبی مربوط به دوره های مزوزوئیک و سنوزوئیک دیده می شوند که در اثر نیروهای تکتونیکی چین خورده و گسل خورده اند. در مقابل، در دشت ها و مناطق کم ارتفاع تر، رسوبات آبرفتی جوان تر غالب هستند که در اثر فرایند های فرسایش و رسوب گذاری شکل گرفته اند. نوع و ویژگی‌های این واحدهای زمین‌شناسی نقش مهمی در رفتار زمین در هنگام وقوع زمین لرزه دارد(نگاره ۱۲).

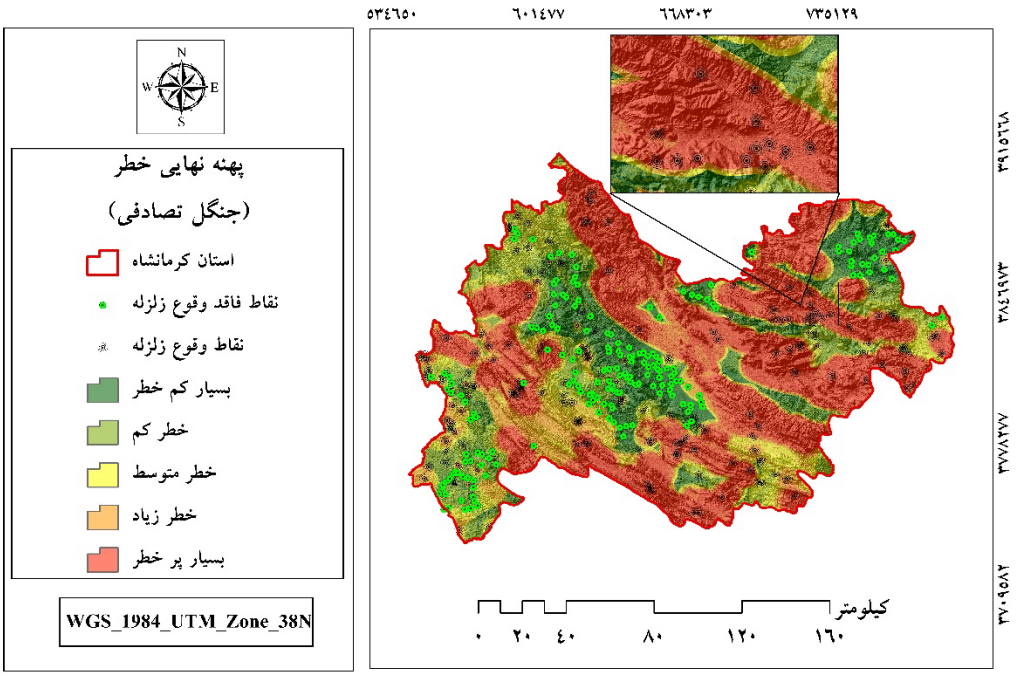


نگاره۱۳: نمودار اهمیت ویژگی

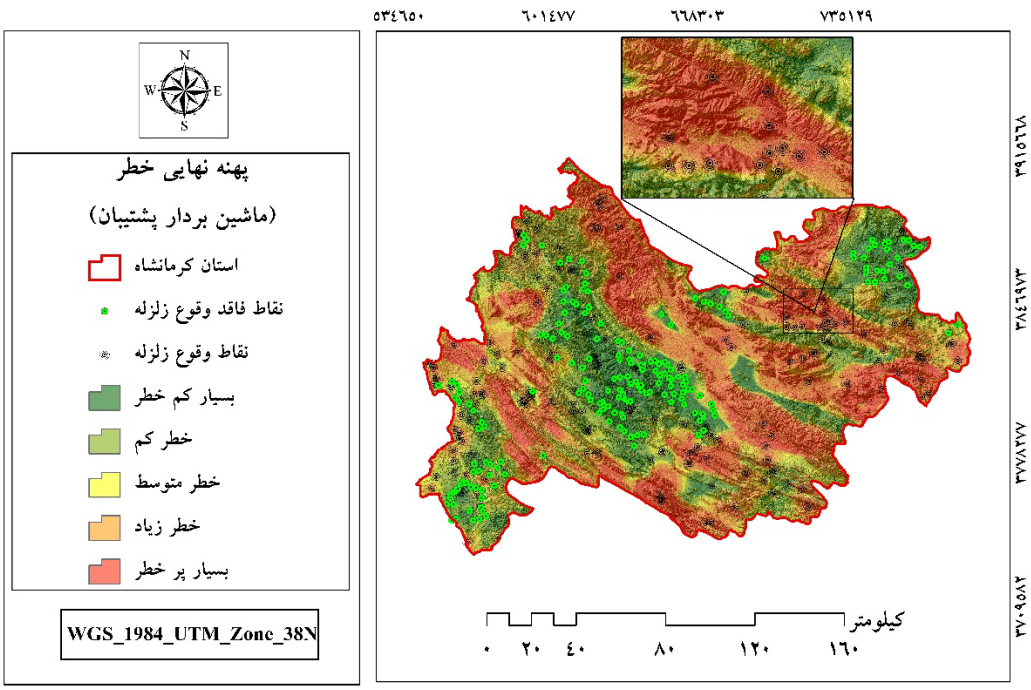
نگاره (۱۳) نمودار اهمیت ویژگی ها را در مدل مورد استفاده برای پهنه بندی خطر زمین لرزه نشان می دهد. این مقادیر اهمیت با استفاده از الگوریتم رندم فارست (Random Forest - RF) محاسبه شده اند. در این روش، میزان تأثیر هر متغیر بر عملکرد مدل و دقت پیش‌بینی آن سنجیده می‌شود. طول هر میله بیانگر میزان تأثیر آن متغیر در پیش بینی یا مدل سازی خطر است، هرچه مقدار اهمیت بیشتر باشد، نقش آن عامل در تعیین مناطق پرخطر بیشتر است. در این نمودار بیشترین اهمیت مربوط به عمق زلزله های گذشته است که مقدار آن حدود ۰/۲۶ برآورد شده است. این موضوع نشان می‌دهد که توزیع فضایی عمق زمین لرزه ها یکی از تعیین کننده ترین عوامل در شناسایی نواحی مستعد لرزه خیزی است. در بسیاری از مناطق لرزه خیز، تغییرات عمق کانونی می تواند نشان دهنده فعالیت ساختاری و وضعیت تنش های زمین ساختی باشد، بنابراین این متغیر نقش مهمی در مدل سازی خطر ایفا می کند. پس از آن

تراکم گسل ها با مقداری در حدود ۰/۲٤ قرار دارد. تراکم بالای گسل ها معمولاً نشان دهنده شدت تغییر شکل های زمین ساختی و وجود سامانه های گسلی فعال است. بنابراین مناطقی که دارای شبکه متراکم تری از گسل ها هستند، به طور بالقوه استعداد بیشتری برای وقوع زمین لرزه دارند. متغیر مهم بعدی فاصله از گسل است که اهمیت آن حدود ۰/۱۷ برآورد شده است. این عامل بیان می‌کند که هرچه فاصله از گسل های فعال کمتر باشد، احتمال وقوع یا تأثیر پذیری از زمین لرزه بیشتر خواهد بود. به همین دلیل فاصله از گسل یکی از پارامترهای اصلی در اغلب مطالعات پهنه بندی خطر زمین لرزه محسوب می شود. در مرتبه بعد شدت زلزله های گذشته با مقدار تقریبی ۰/۱۲ قرار دارد. این متغیر نشان دهنده الگوی تاریخی رخداد زمین لرزه ها در منطقه است و می تواند در شناسایی نواحی با سابقه لرزه خیزی بیشتر مؤثر باشد. از میان عوامل مورفومتری، ارتفاع با اهمیتی حدود ۰/۰۷ تأثیر متوسطی در مدل دارد. در مقابل، شیب، انحنای مقطع، انحنای سطح و انحنای پلان دارای مقادیر اهمیت بسیار کمتری هستند و نقش آنها در پیش بینی خطر زمین لرزه محدودتر است. این موضوع نشان می دهد که پارامتر های توپوگرافی نسبت به عوامل لرزه زمین ساختی تأثیر کمتری در مدل داشته اند. در نهایت زمین شناسی نیز در این نمودار اهمیت نسبتاً پایینی را نشان می‌دهد. با وجود اینکه نوع سازند های زمین شناسی در برخی مطالعات نقش مهمی در پاسخ لرزه ای زمین دارد، در این مدل تأثیر آن در مقایسه با پارامتر های مرتبط با گسل ها و ویژگی های لرزه ای کمتر بوده است. به طور کلی، نتایج این نمودار که بر اساس تحلیل اهمیت ویژگی‌ها در مدل رندم فارست (RF) به دست آمده است، نشان می دهد که عوامل لرزه زمین ساختی (عمق زمین لرزه ها، تراکم گسل و فاصله از گسل) بیشترین نقش را در تعیین الگوی خطر زمین‌لرزه در منطقه مورد مطالعه داشته اند، در حالی که عوامل مورفومتری سطح زمین تأثیر کمتری در عملکرد مدل داشته اند. این الگو با ماهیت زمین ساختی استان کرمانشاه که در کمربند فعال زاگرس قرار دارد، همخوانی قابل توجهی دارد.

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اطلا
پهر)»



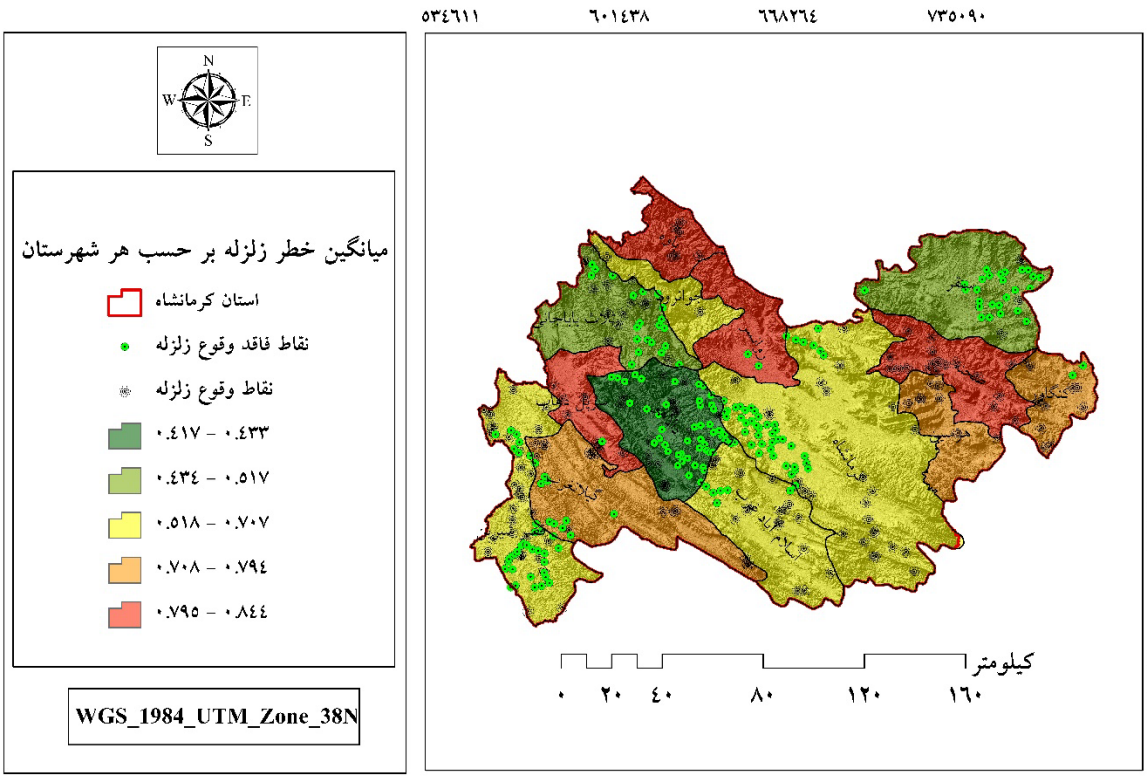
نگاره۱٤: نقشه نهایی خطر زلزله خیزی استان کرمانشاه با استفاده از روش جنگل تصادفی



نگاره۱۵: نقشه نهایی خطر زلزله خیزی استان کرمانشاه با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان

نگاره(۱٤)، پهنه نهایی خطر وقوع زلزله در استان کرمانشاه را بر اساس مدل جنگل تصادفی (RF) نمایش می دهد. در این نقشه، مجموعه ای از پارامتر های مؤثر مانند فاصله از گسل ها، تراکم گسل، شدت و عمق زمین لرزه ها، ویژگی های زمین شناسی و پارامترهای توپوگرافی به طور همزمان در یک مدل یادگیری ماشین تحلیل شده و نتیجه آن به صورت طبقات مختلف خطر ارائه شده است. در این مدل نواحی نزدیک به گسل‌های فعال و مناطقی که سابقه لرزه خیزی بیشتری دارند، در کلاس های خطر بالا و بسیار بالا قرار می گیرند. در استان کرمانشاه نیز بخش های غربی و شمال غربی استان، به دلیل وجود گسل های فعال و رخداد زمین لرزه های تاریخی، در طبقات خطر بالاتر قرار گرفته اند. در مقابل، مناطق دورتر از گسل ها و بخش هایی از دشت های مرکزی استان در طبقات خطر متوسط یا کم خطر قرار گرفته اند. استفاده از مدل جنگل تصادفی در این نوع مطالعات به دلیل توانایی بالای آن در مدل سازی روابط غیر خطی بین متغیرها، می تواند نتایج دقیق تری نسبت به بسیاری از روش‌های سنتی ارائه دهد. نگاره(۱۵) نیز پهنه نهایی خطر وقوع زلزله در استان کرمانشاه را با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) نشان می‌دهد. این مدل یکی از روش های قدرتمند در یادگیری ماشین است که با تعیین مرزهای تصمیم در فضای چند بعدی متغیرها، مناطق مختلف را در کلاس های خطر طبقه بندی می کند. اگرچه الگوی کلی خطر در این نقشه مشابه نتایج حاصل از مدل جنگل تصادفی است، اما تفاوت هایی در نحوه تفکیک طبقات خطر مشاهده می شود. به طور معمول، مدل SVM می تواند مرزهای مشخص تری بین کلاس ها ایجاد کند و در برخی مناطق نسبت به تغییرات داده‌ها حساس‌تر عمل کند. مقایسه نقشه های به دست آمده از دو مدل RF و SVM می تواند دید بهتری نسبت به میزان قطعیت نتایج فراهم کند. مناطق غربی و شمال غربی که در هر دو مدل در طبقه خطر بالا قرار گرفته‌اند، از اطمینان بیشتری

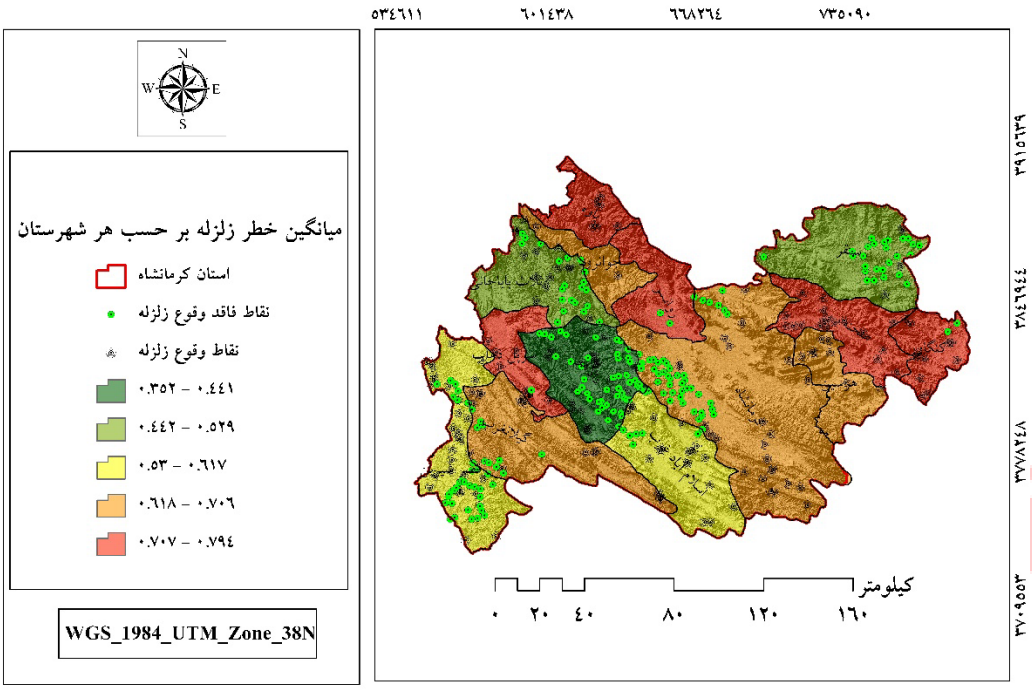
در ارزیابی خطر برخوردار هستند و به عنوان مناطق اولویت دار برای اقدامات مدیریتی و مقاوم سازی شناخته می شوند.



نگاره١٦: نقشه میانگین خطر زلزله خیزی شهرستان های استان با استفاده از روش جنگل تصادفی

نگاره(١٦)، میانگین خطر وقوع زلزله در هر شهرستان استان کرمانشاه را بر اساس نتایج مدل جنگل تصادفی (RF) نمایش می دهد. در این نقشه، نتایج پهنه بندی خطر که در مقیاس سلولی یا پیکسلی محاسبه شده اند، در سطح واحد های اداری یعنی شهرستان ها تجمیع شده و میانگین خطر برای هر شهرستان محاسبه شده است. این کار باعث می‌شود نتایج مدل برای برنامه ریزی مدیریتی و تصمیم گیری های اجرایی قابل فهم تر شوند. بر اساس این نوع تحلیل، شهرستان هایی که در نزدیکی گسل های فعال و مناطق با لرزه خیزی بالا قرار دارند، میانگین خطر بیشتری خواهند داشت. به طور معمول شهرستان هایی مانند سرپل ذهاب، روانسر ، پاوه و صحنه در رده های خطر بسیار زیاد قرار دارند، در حالی که شهرستان های ثلاث باباجانی، سنقر و صحنه در میانگین خطر کمتری قرار دارند. همچنین شهرستان های کرمانشاه، اسلام آباد غرب، قصر شیرین و جوانرود در خطر متوسط و شهرستان های کنگاور، هرسین و گیلان غرب نیز در خطر زیاد قرار دارند. همچنین این نقشه می تواند در تعیین اولویت های مدیریت بحران، برنامه ریزی شهری و تخصیص منابع برای مقاوم سازی زیر ساخت ها بسیار مفید باشد.

نسرین سینی پژوهش
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

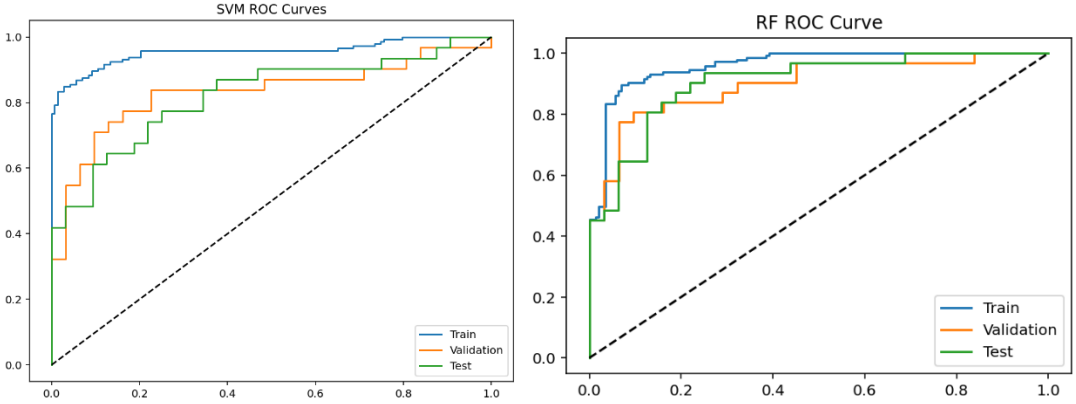


نگاره۱۷: نقشه میانگین خطر زلزله خیزی شهرستان های استان با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان

نگاره (۱۷)، میانگین خطر وقوع زمین لرزه در هر یک از شهرستان های استان کرمانشاه را بر اساس مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) نشان می‌دهد. این نقشه از نظر ساختار و نحوه نمایش نتایج مشابه نگاره(١٤)، با این تفاوت که مقادیر خطر در آن بر پایه خروجی مدل SVM محاسبه شده‌اند. در تهیه این نقشه، مقادیر خطر به دست آمده در سطح پیکسل ها در محدوده هر شهرستان میانگین‌گیری شده و به صورت یک شاخص کلی از میزان خطر برای هر شهرستان نمایش داده شده است. مقایسه نتایج این نقشه با نقشه میانگین خطر حاصل از مدل جنگل تصادفی (RF) نشان می‌دهد که هر دو مدل در شناسایی برخی از شهرستان های پرخطر استان همخوانی قابل توجهی دارند. بر اساس نتایج به دست آمده، شهرستان های سرپل ذهاب، روانسر، پاوه و صحنه در هر دو مدل در طبقه خطر بسیار بالا قرار گرفته اند. این همگرایی نتایج نشان دهنده آن است که این مناطق از نظر شرایط لرزه زمین ساختی و عوامل مؤثر بر وقوع زمین لرزه، بیشترین پتانسیل خطر را در سطح استان دارند. بنابراین می توان این شهرستان ها را به عنوان نواحی دارای اولویت در برنامه ریزی های مدیریت بحران، کاهش خطر پذیری و اقدامات پیشگیرانه در برابر زمین لرزه در نظر گرفت. همچنین همخوانی نتایج دو مدل یادگیری ماشین نشان می‌دهد که ارزیابی انجام شده از قابلیت اطمینان مناسبی برخوردار است و می‌تواند مبنای مناسبی برای تصمیم گیری در مدیریت مخاطرات طبیعی در استان کرمانشاه فراهم کند.

جدول۱: مقادیر AUC جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان

جنگل تصادفی	ماشین بردار پشتیبان
آموزش (Training) = ۰/۹۵۹	آموزش (Training) = ۰/۹۵۹
اعتبارسنجی (Validation) = ۰/۸۹۹	اعتبارسنجی (Validation) = ۰/۸۳۱
آزمون (Testing) = ۰/۹۰۶	آزمون (Testing) = ۰/۸۲۳



نگاره۱۸: نمودار ROC مدل جنگل تصادفی

نگاره۱۹: نمودار ROC مدل ماشین بردار پشتیبان

جدول(۱)، نتایج ارائه شده مقادیر AUC مربوط به دو مدل یادگیری ماشین شامل ماشین بردار پشتیبان (SVM) و جنگل تصادفی (RF) را در سه مرحله آموزش، اعتبار سنجی و آزمون نشان می دهد. شاخص AUC که از منحنی ROC به دست می آید، معیاری برای سنجش توانایی مدل در تفکیک کلاس ها و پیش بینی صحیح داده ها است. مقادیر این شاخص بین صفر تا یک قرار می‌گیرد و هرچه مقدار آن به عدد یک نزدیک تر باشد، نشان دهنده عملکرد بهتر مدل است. بر اساس جدول، مقدار AUC در مرحله آموزش برای هر دو مدل برابر با ۰/۹۵۹ است. این موضوع نشان می‌دهد که هر دو الگوریتم توانسته اند الگوهای موجود در داده های آموزشی را با دقت بالایی شناسایی کنند و روابط میان متغیرهای مؤثر و وقوع زمین‌لرزه را به خوبی یاد بگیرند. در مرحله اعتبار سنجی تفاوت عملکرد دو مدل آشکارتر می‌شود. مقدار AUC برای مدل ماشین بردار پشتیبان ۰/۸۳۱ و برای مدل جنگل تصادفی ۰/۸۹۹ است. این اختلاف نشان می‌دهد که مدل جنگل تصادفی در تعمیم الگوهای یاد گرفته شده به داده های جدید عملکرد بهتری داشته و از پایداری بیشتری برخوردار است. در مرحله آزمون نیز همین روند مشاهده می‌شود. مقدار AUC برای مدل ماشین بردار پشتیبان ۰/۸۲۳ و برای مدل جنگل تصادفی ۰/۹۰۶ گزارش شده است. این نتیجه بیانگر آن است که مدل جنگل تصادفی در پیش بینی داده های ناشناخته عملکرد دقیق تری دارد و توانایی بیشتری در شناسایی صحیح مناطق مستعد خطر زمین لرزه نشان می دهد. نمودارهای ROC نیز این نتایج را به صورت گرافیکی نمایش می دهند. در این نمودارها محور افقی بیانگر نرخ مثبت کاذب و محور عمودی نشان دهنده نرخ مثبت واقعی است و خط قطری نشان دهنده عملکرد تصادفی مدل است. هرچه منحنی ROC به گوشه بالا و سمت چپ نمودار نزدیک‌تر باشد، عملکرد مدل بهتر ارزیابی می شود. در نگاره(۱۹)، نمودار ROC مربوط به مدل ماشین بردار پشتیبان مشاهده می شود که منحنی های مربوط به داده های آموزش، اعتبار سنجی و آزمون در فاصله مناسبی از خط تصادفی قرار دارند که نشان دهنده عملکرد قابل قبول مدل است. با این حال فاصله میان منحنی آموزش و منحنی‌های اعتبارسنجی و

آزمون نشان می‌دهد که عملکرد مدل در داده های جدید کمی کاهش یافته است. در مقابل، در نگاره(۱۸)، نمودار ROC مربوط به مدل جنگل تصادفی منحنی‌ها به بخش بالایی نمودار نزدیک‌تر هستند و فاصله آن‌ها از خط تصادفی بیشتر است. همچنین همپوشانی نسبی منحنی‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون نشان می‌دهد که این مدل از پایداری بیشتری برخوردار بوده و توانسته است الگوهای داده را با دقت بیشتری به داده های جدید تعمیم دهد. به طور کلی، تحلیل همزمان جدول مقادیر AUC و نمودارهای ROC نشان می‌دهد که هر دو مدل عملکرد مناسبی در پیش بینی خطر زمین لرزه دارند، اما مدل جنگل تصادفی با مقادیر AUC بالاتر در مراحل اعتبارسنجی و آزمون و همچنین شکل مطلوب‌تر منحنی ROC، عملکرد دقیق تر و قابل اعتماد تری نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان ارائه داده است. بنابراین در این پژوهش، مدل جنگل تصادفی کارایی بیشتری در پهنه بندی خطر زمین لرزه در استان کرمانشاه نشان می دهد.

مقاله در نوبت انتشار

نشریه علمی پژوهشی

«اطلاعات جغرافیایی(سپهر)»

جدول۲: آمار توصیفی متغیرهای عددی در طبقات مختلف خطر

متغیر	آمار	خیلی کم‌خطر	کم خطر	خطر متوسط	خطر زیاد	خطر بسیار زیاد
ارتفاع	حداقل	۱۴۰	۱۲۲	۱۱۵	۱۱۷	۱۲۹
	حداکثر	۳۲۴۶	۳۲۵۰	۳۳۰۷	۳۳۶۸	۳۳۶۷
	میانگین	۱۵۵۲/۸۵	۱۲۸۶/۸۵	۱۲۹۲/۶۲	۱۳۹۳/۱۷	۱۵۲۳/۵۵
	انحراف معیار	۴۲۷/۷۱	۵۹۰/۲	۵۷۵/۴	۵۰۳/۴	۴۳۴/۵
شیب	حداقل	۰	۰	۰	۰	۰
	حداکثر	۵۲/۹۸	۷۰/۴۱	۷۶/۷۰	۷۶/۷	۷۵/۸
	میانگین	۸/۷۵	۱۱/۷	۱۲/۸	۱۱/۱۶	۱۲/۹۱
	انحراف معیار	۷/۱۳	۹/۶۲	۱۱/۵۷	۱۱/۰۶	۱۰/۸۶
شدت زمین‌لرزه	حداقل	۳/۵۵	۳/۵	۳/۵	۳/۳۳	۳/۳۰
	حداکثر	۷/۳	۷/۳	۷/۳	۷/۳	۶/۷
	میانگین	۴/۴۹۶	۴/۵۸۹	۴/۶۴۶	۴/۵۵۳	۴/۵۸۹
	انحراف معیار	۰/۲۷۸	۰/۳۹۵	۰/۴۶۳	۰/۳۹۰	۰/۳۹۲
تراکم گسل	حداقل	۰	۰	۰	۰	۰
	حداکثر	۰/۰۲۴۱	۰/۲۲۰۶	۰/۲۵۸۲	۰/۳۹۳۸	۰/۳۹۳۹
	میانگین	۰/۰۰۰۰۰۹	۰/۰۰۱۱۸۰	۰/۰۱۰۳۵۶	۰/۰۵۱۴۰۶	۰/۱۲۶۰۵۳
	انحراف معیار	۰/۰۰۰۲۷۸	۰/۰۰۵۰۷۸	۰/۰۲۳۴۵۶	۰/۰۵۱۲۷۶	۰/۰۶۳۳۸۲
فاصله از گسل	حداقل	۱۰۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰
	حداکثر	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰
	میانگین	۱۹۵۱۴/۷۸	۱۹۲۸۰/۹	۱۵۵۸۶	۹۰۶۸/۴	۵۱۶۶/۱
	انحراف معیار	۱۳۲۴۱	۱۴۲۸۰	۱۲۹۸۳	۹۴۳۷	۱۴۱۰
عمق زمین لرزه	حداقل	۸/۵	۸	۵/۷۹	۳/۷۶	۳
	حداکثر	۷۵/۴۹	۸۵–۵۶	۱۰۴/۰۹	۱۱۴/۳	۱۱۴/۴
	میانگین	۲۹	۲۸/۵۵	۲۷/۸۳	۲۸/۲۳	۲۷/۹۹
	انحراف معیار	۴/۴۱	۶/۷	۸/۸۳	۱۰/۱۰	۸/۱۹
انحنا سطح	حداقل	–۲/۰۶	–۳/۱۴	–۲۷/۲	–۲۸/۵	–۳۱/۶
	حداکثر	۱/۸۷	۶/۸	۲۸/۲	۲۸/۷	۳۱/۹
	میانگین	۰/۰۱۶	–۰/۰۰۲	۰/۰۲۴	۰/۰۷۵	–۰/۰۲۳
	انحراف معیار	۰/۳۱۸	۰/۴۴۹	۰/۶۴۴	۰/۵۷۳	۰/۵۷۲
انحنا مقطع	حداقل	–۲/۹۵	–۵/۰۲	–۲۸/۹	–۲۴/۸۸	–۲۶/۸۱
	حداکثر	۲/۲۵	۵/۲۹	۲۹/۹	۲۸/۲۱	۲۷/۶
	میانگین	۰/۰۳۵	۰/۰۲۷	۰/۰۱۴	–۰/۰۴۰	–۰/۰۱۵
	انحراف معیار	۰/۳۹۳	۰/۵۳۲	۰/۷۹۷	۰/۷۲۲	۰/۶۸۴
انحنا	حداقل	–۳/۵	–۵/۸	–۴۸/۶	–۵۲/۷	–۵۱
	حداکثر	۳/۷۸	۸/۹۹	۵۳/۴۳	۵۰/۳۰	۴۹/۷
	میانگین	–۰/۰۱۹	–۰/۰۳۰	۰/۰۱۰	۰/۱۱۵	–۰/۰۳۸
	انحراف معیار	۰/۶۲۱	۰/۸۵۲	۱/۲	۱/۱	۱/۱

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

بررسی آماری پارامترهای مؤثر بر پهنه بندی خطر لرزه ای در پنج طبقه خطر شامل خیلی کم خطر، کم خطر، خطر متوسط، خطر زیاد و خطر بسیار زیاد، تفاوت های قابل توجهی را در توزیع برخی از متغیرهای ورودی نشان می دهد(جدول۲). نتایج بیانگر آن است که الگوی تغییرات پارامترها در طبقات مختلف یکسان نیست و برخی متغیرها روند مشخص تری با افزایش سطح خطر نشان می دهند، در حالی که برخی دیگر رفتار غیرخطی یا نوسانی دارند. از نظر ارتفاع، میانگین ارتفاع در طبقه خیلی کم خطر ۱۵۵۲/۸ متر بوده و در طبقه کم خطر به ۱۲۸٦/۸۵متر کاهش یافته است. سپس این مقدار در طبقه خطر متوسط به ۱۲۹۲/٦۲متر، در طبقه خطر زیاد به ۱۳۹۳/۱۷ متر و در طبقه خطر بسیار زیاد به ۱۵۲۳/۵۵متر افزایش می یابد. بنابراین، ارتفاع در محدوده مورد مطالعه روند یکنواختی با افزایش خطر نشان نمی دهد. همچنین، دامنه تغییرات ارتفاع در تمام طبقات نسبتاً زیاد است که نشان می‌دهد طبقات مختلف خطر در محدوده وسیعی از ارتفاعات پراکنده شده‌اند. بر این اساس، ارتفاع به تنهایی نمی‌تواند روند افزایش خطر را توضیح دهد. شیب نسبت به ارتفاع الگوی مشخص تری نشان می دهد. میانگین شیب از ۸/۷۵ درجه در طبقه خیلی کم خطر به ۱۱/۷۱ درجه در طبقه کم خطر و ۱۲/۸٤درجه در طبقه خطر متوسط افزایش یافته است. در طبقه خطر زیاد میانگین شیب به ۱۱/۱٦درجه کاهش یافته، اما در طبقه خطر بسیار زیاد دوباره به ۱۲/۹۱ درجه افزایش پیدا کرده است. در مجموع، طبقات خطر متوسط و بسیار زیاد دارای میانگین شیب بالاتری نسبت به طبقه خیلی کم خطر هستند. این الگو نشان می دهد که مناطق دارای شیب بیشتر در بخشی از پهنه های با خطر بالاتر حضور بیشتری دارند، اگرچه رابطه بین شیب و طبقات خطر کاملاً خطی و یکنواخت نیست. در مورد شدت زمین‌لرزه، میانگین مقدار شدت از ٤/٤۹ در طبقه خیلی کم خطر به ٤/۵۸ در طبقه کم خطر و ٤/٦٤ در طبقه خطر متوسط افزایش می یابد. پس از آن، میانگین شدت در طبقه خطر زیاد به ٤/۵۵ کاهش یافته و در طبقه خطر بسیار زیاد به ٤/۵۸ می رسد. بیشترین میانگین مربوط به طبقه خطر متوسط است و اختلاف مقادیر میانگین بین طبقات نسبتاً محدود است. بنابراین، در داده های مورد بررسی، شدت زمین لرزه الگوی افزایشی یکنواختی از خیلی کم خطر تا بسیار زیاد نشان نمی‌دهد. با این حال، پراکندگی مقادیر شدت در طبقات خطر متوسط تا بسیار زیاد بیشتر از طبقه خیلی کم خطر است. یکی از واضح ترین الگوها مربوط به تراکم گسل است. میانگین تراکم گسل از ۰/۰۰۰۰۰۹ در طبقه خیلی کم‌خطر به ۰/۰۰۱۱۸۰ در طبقه کم خطر، ۰/۰۱۰۳۵ در طبقه خطر متوسط، ۰/۰۵۱٤۰ در طبقه خطر زیاد و ۰/۱۲٦۰۵۳ در طبقه خطر بسیار زیاد افزایش می یابد. این افزایش پیوسته و قابل توجه نشان می دهد که با حرکت از طبقات خطر پایین به سمت طبقات خطر بالاتر، مقادیر تراکم گسل به طور مشخص افزایش پیدا می کند. بیشترین مقدار میانگین تراکم گسل در طبقه خطر بسیار زیاد مشاهده شده است، در حالی که کمترین مقدار مربوط به طبقه خیلی کم خطر است. بنابراین، در توصیف فضایی نتایج، تراکم گسل یکی از متغیرهایی است که بیشترین تفاوت را بین طبقات خطر نشان می‌دهد. فاصله از گسل نیز روندی کاملاً معکوس با تراکم گسل دارد. میانگین فاصله از گسل در طبقه خیلی کم خطر ۱۹۵۱٤/۷۸ متر و در طبقه کم خطر ۱۹۲۸۰/۹٤ متر است. این مقدار در طبقه خطر متوسط به ۱۵۵۸٦/۰٦ متر کاهش یافته و در طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد به ترتیب به ۹۰٦۸/٤۵ و ۵۱۱٦/۱۸ متر می رسد. بنابراین، طبقات خطر بالاتر به طور توصیفی در فاصله کمتری از گسل ها قرار گرفته اند. به ویژه، اختلاف میانگین فاصله بین طبقه خیلی کم خطر و طبقه بسیار زیاد قابل توجه است. هم زمانی افزایش تراکم گسل و کاهش فاصله از گسل در طبقات خطر بالاتر، یکی از مهم ترین الگوهای موجود در نتایج آماری است. برای عمق زمین لرزه، میانگین مقادیر بین ۲۷/۸۳ تا ۲۹ تغییر می کند. بیشترین

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهش
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

میانگین مربوط به طبقه خیلی کم خطر و کمترین میانگین مربوط به طبقه خطر متوسط است. اختلاف میانگین ها نسبتاً محدود است و روند مشخصی از افزایش یا کاهش با طبقات خطر مشاهده نمی شود. با این حال، انحراف معیار از ٤/٤١ در طبقه خیلی کم خطر به ٦/٧ در طبقه کم خطر، ٨/٨ در طبقه خطر متوسط و ١٠/١ در طبقه خطر زیاد افزایش می یابد و در طبقه بسیار زیاد به ٨/١٩ می رسد. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه میانگین عمق زمین لرزه بین طبقات تفاوت زیادی ندارد، پراکندگی مقادیر عمق در طبقات خطر بالاتر بیشتر است. برای شدت زلزله های گذشته، میانگین مقادیر از ٤/٤٩ در کلاس خطر ١ به ٤/٥٨ در کلاس خطر ٢ و ٤/٦٤ در کلاس خطر ٣ افزایش یافته است. در کلاس خطر ٤ مقدار میانگین به ٤/٥٥ کاهش جزئی داشته و در کلاس خطر ٥ مجدداً به ٤/٥٨ رسیده است. بنابراین، بیشترین میانگین شدت زلزله های گذشته در کلاس خطر ٣ مشاهده می شود، در حالی که اختلاف میانگین بین کلاس های مختلف نسبتاً محدود است. انحراف معیار نیز از ٠/٢٧٨ در کلاس خطر ١ به ٠/٤٦٣ در کلاس خطر ٣ افزایش یافته و در کلاس های بعدی در حدود ٠/٣٩ باقی مانده است. پارامترهای انحنا، انحنا سطح و انحنا مقطع عمدتاً میانگین هایی نزدیک به صفر دارند. میانگین انحنا از ٠/٠١٩ - در طبقه خیلی کم خطر به ٠/٠٣٠- در طبقه کم خطر، ٠/٠١٠ در طبقه خطر متوسط و ٠/١١٥ در طبقه خطر زیاد تغییر کرده و در طبقه بسیار زیاد به ٠/٠٣٨- می رسد. در انحنا سطح نیز میانگین مقادیر بین ٠/٠٢٣ تا ٠/٠٧٥- تغییر می کند. انحنا مقطع نیز میانگین هایی بین ٠٤٠/ تا ٠/٠٣٥- دارد. بنابراین، هیچ یک از این سه پارامتر بر اساس میانگین، روند یکنواختی در جهت افزایش طبقه خطر نشان نمی دهند.

جدول٣: وضعیت زمین شناسی در طبقات مختلف خطر

طبقه خطر	واحد زمین شناسی غالب	کد زمین شناسی غالب	تعداد واحدهای زمین شناسی موجود
خیلی کم‌خطر	نهشته‌های آواری	٨	٢١
کم‌خطر	آهک	١	٢٤
خطر متوسط	آهک	١	٢٥
خطر زیاد	آبرفت	٢	٢٥
خطر بسیار زیاد	آبرفت	٢	٢٥

نتایج مربوط به توزیع واحدهای زمین شناسی در طبقات مختلف خطر نشان می‌دهد که نوع واحد غالب زمین شناسی در پهنه های با سطوح مختلف خطر متفاوت است(جدول٣). در طبقه خیلی کم خطر، واحد زمین شناسی غالب «نهشته های آواری» با کد ٨ است. در طبقات کم خطر و خطر متوسط، «آهک» با کد ١ به عنوان واحد غالب شناسایی شده است. در مقابل، در طبقات خطر زیاد و خطر بسیار زیاد «آبرفت» با کد ٢ بیشترین فراوانی را دارد. این تغییر در واحد غالب زمین شناسی بین طبقات خطر، نشان دهنده تفاوت در شرایط زمین شناسی پهنه های مختلف خطر است. به طور مشخص، با حرکت از طبقات خطر پایین‌تر به سمت طبقات خطر بالاتر، واحد غالب از نهشته های آواری در طبقه خیلی کم خطر، به آهک در طبقات کم خطر و خطر متوسط و سپس به آبرفت در طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد تغییر می‌کند. بنابراین، در پهنه بندی حاصل از مدل، حضور آبرفت در طبقات بالاتر خطر بیشتر مشاهده می شود. از نظر تنوع زمین شناسی نیز تفاوت مشخصی بین طبقات وجود دارد. در طبقه خیلی کم خطر ٢١ واحد زمین شناسی مختلف مشاهده شده است، در حالی که این تعداد در طبقه کم خطر به ٢٤ واحد افزایش یافته و در طبقات خطر

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

متوسط، خطر زیاد و خطر بسیار زیاد هر ۲۵ واحد زمین‌شناسی موجود در منطقه را شامل می شوند. این الگو نشان می دهد که طبقات خطر بالاتر از نظر حضور انواع واحد های زمین شناسی، تنوع بیشتری دارند و تقریباً تمام واحد های زمین شناسی منطقه در این طبقات حضور دارند. در طبقه خیلی کم خطر، علاوه بر غالب بودن نهشته های آواری، کد ٢٤ یعنی «مارن شیل» به عنوان واحد با کمترین فراوانی در خروجی آماری ثبت شده است. در طبقه کم خطر، آهک واحد غالب و کد ٤ «آهک مارن» واحد کم فراوان تر است. در طبقه خطر متوسط، آهک غالب بوده و کد ۲۱ «مواد کوهرفتی» به عنوان واحد کم فراوان تر ثبت شده است. در طبقه خطر زیاد، آبرفت غالب بوده و کد ۲۱ کمترین فراوانی را دارد، در حالی که در طبقه خطر بسیار زیاد، آبرفت غالب و کد ۲۲ «کوارتزیت» کمترین فراوانی را نشان می دهد. در مجموع، نتایج زمین شناسی نشان می دهد که واحد غالب زمین شناسی در طبقات مختلف خطر تغییر می کند، به طوری که نهشته های آواری در طبقه خیلی کم خطر، آهک در طبقات کم خطر و خطر متوسط و آبرفت در طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد غالب است. همچنین، افزایش تعداد واحد های زمین شناسی از ۲۱ واحد در طبقه خیلی کم خطر به ۲۵ واحد در طبقات خطر متوسط تا بسیار زیاد، بیانگر افزایش تنوع زمین شناسی در طبقات بالاتر خطر است.

۵- نتیجه گیری

یافته های پژوهش حاضر نشان می دهد که به کارگیری همزمان سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و الگوریتم های یادگیری ماشین، به ویژه جنگل تصادفی (RF) و ماشین بردار پشتیبان (SVM)، می‌تواند دقت و کارایی پهنه بندی خطر زمین لرزه در استان کرمانشاه را به طور معناداری ارتقاء دهد. این نتیجه با جهت گیری کلی مطالعات پیشین که بر ضرورت عبور از روش های صرفاً کلاسیک و بهره گیری از رویکردهای نوین داده محور در ارزیابی مخاطرات لرزه ای تأکید داشته اند، همسو است، اما در عین حال، چند نکته مهم و متمایز را نیز آشکار می‌کند. نتایج تحلیل آماری متغیرهای ورودی نیز نشان داد که تراکم گسل با افزایش طبقه خطر روند افزایشی مشخصی داشته، در حالی که فاصله از گسل در طبقات خطر بالاتر کاهش یافته است. همچنین، تغییر واحد غالب زمین شناسی از نهشته های آواری و آهک در طبقات پایین تر به آبرفت در طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد، نقش عوامل زمین‌شناسی و لرزه زمین ساختی را در الگوی فضایی خطر تأیید می‌کند. بر اساس نتایج کمی مدل سازی، هر دو الگوریتم RF و SVM در مرحله آموزش، دقت بالایی را در تشخیص الگوی لرزه خیزی از خود نشان داده اند (مقدار AUC حدود ۰/۹۵۹ برای هر دو مدل)، که بیانگر توانایی قابل توجه آنها در یادگیری روابط پیچیده بین متغیرهای زمین شناسی، لرزه زمین ساختی و مورفومتری با وقوع زمین لرزه است. این یافته با مطالعاتی نظیر یمانی و همکاران (۱۳۹۱)، احمدی و همکاران (١٣٩٤)، که عملکرد موفق SVM را در مدل سازی روابط غیر خطی و پهنه بندی خطر (زمین لغزش و زلزله) گزارش کرده اند، سازگار است. با این حال، تمایز اصلی پژوهش حاضر با بسیاری از کارهای پیشین در آن است که علاوه بر SVM، مدل جنگل تصادفی نیز به صورت مستقیم و مقایسه ای به کار گرفته شده است. نتایج اعتبارسنجی و آزمون نشان می‌دهد که RF نسبت به SVM در تعمیم الگوهای آموخته شده به داده های جدید عملکرد بهتری دارد، به گونه ای که مقدار AUC در مرحله اعتبار سنجی برای SVM حدود ۰/۸۳۱ و برای RF حدود ۰/۸۹۹، و در مرحله آزمون برای SVM حدود ۰/۸۲۳ و برای RF حدود ۰/۹۰٦ به دست آمده است. این

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

تفاوت نشان می دهد که اگرچه SVM در بسیاری از مطالعات پیشین به عنوان مدلی کارآمد و دقیق معرفی شده، اما در شرایط داده ای و ساختار لرزه خیزی استان کرمانشاه، مدل RF توانسته است با پایداری بیشتر و حساسیت بالاتر نسبت به کلاس های خطر، نقشه ای بهتری از توزیع فضایی خطر ارائه دهد. مطالعاتی مانند یمانی و همکاران (۱۳۹۱) و احمدی و همکاران (۱۳۹٤) بر روی زمین لغزش ها و پهنه های مستعد زلزله نشان داده اند که انتخاب تابع کرنل مناسب در SVM (مانند RBF یا Polynomial) نقش مهمی در بهبود دقت مدل دارد و در برخی موارد، SVM نسبت به روش های تصمیم گیری چند معیاره (مانند AHP) یا روش های کلاسیک تر عملکرد برتری داشته است. همچنین در کارهایی نظیر جلالیان و دادگر (۱۳۹٤) و ماجدی و حسین زاده (۱۳۹۷)، مدل های مبتنی بر AHP در محیط GIS برای پهنه بندی آسیب پذیری و خطر زلزله در کرمانشاه استفاده شده و نتایج مطلوبی گزارش شده است. مقایسه نتایج این پژوهش با آن مطالعات نشان می دهد که رویکرد مبتنی بر یادگیری ماشین، به‌ویژه RF، قادر است ضمن استفاده از همان داده های مکانی پایه (گسل ها، لیتولوژی، شیب، ارتفاع و ...)، با بهره‌گیری از ساختارهای غیرخطی و در نظر گرفتن برهمکنش پیچیده متغیرها، دقت ارزیابی خطر را فراتر از روش های وزن دهی ذهنی و سلسله مراتبی ارتقاء دهد. به لحاظ فضایی، نقشه های نهایی پهنه بندی خطر حاصل از RF و SVM نشان می‌دهند که مناطق با خطر بالا و بسیار بالا عمدتاً در محدوده های هم راستا با ساختار چین خورده و رانده زاگرس، در مجاورت گسل های اصلی و در نواحی با شیب و ارتفاع قابل توجه متمرکز شده اند. این الگوی فضایی با شواهد زمین شناسی و لرزه زمین ساختی منطقه و همچنین با نتایج مطالعاتی که قبلاً با روش های AHP یا مدل های تک متغیره در کرمانشاه و سایر مناطق لرزه خیز ایران انجام شده اند، همخوان است. با این وجود، مدل RF در مقایسه با SVM تفکیک پذیری بهتری میان کلاس های خطر متوسط، بالا و خیلی بالا ارائه کرده و با کاهش نرخ خطای طبقه بندی، تصویر شفاف تری از پهنه های اولویت دار برای مدیریت بحران و برنامه ریزی کاربری زمین فراهم آورده است. در نهایت، می توان گفت پژوهش حاضر با بهره‌گیری از ترکیب GIS و دو الگوریتم قدرتمند RF و SVM، ضمن تأیید نتایج کلی مطالعات پیشین در خصوص اهمیت عوامل زمین شناسی و لرزه زمین ساختی در شکل گیری پهنه های پرخطر، گامی فراتر برداشته و نشان داده است که مدل جنگل تصادفی، در شرایط منطقه‌ای استان کرمانشاه، ابزاری دقیق تر و قابل اعتمادتر برای پهنه بندی خطر زمین لرزه است. این نتیجه می‌تواند مبنای مهمی برای برنامه ریزی توسعه شهری و روستایی، مکان یابی زیر ساخت های حیاتی، و تدوین سیاست های کاهش خطر پذیری و مدیریت بحران در یکی از لرزه خیزترین استان های کشور باشد.

با وجود نتایج حاصل از به کارگیری مدل های یادگیری ماشین در پهنه بندی خطر لرزه ای استان کرمانشاه، این پژوهش با برخی محدودیت ها همراه بوده است. نخست، دقت نتایج تا حد زیادی به کیفیت، تعداد و نحوه توزیع مکانی داده های تاریخی زمین لرزه ها وابسته است. ثبت ناقص برخی رخداد های گذشته، تفاوت در دقت مکانی و زمانی داده های لرزه ای و همچنین محدودیت تعداد رخدادهای مورد استفاده می تواند بر شناسایی الگوی مکانی خطر و عملکرد مدل های پیش بینی اثرگذار باشد. از این رو، افزایش تعداد رخدادهای ثبت شده و استفاده از پایگاه های داده لرزه ای با پوشش زمانی و مکانی مناسب تر می تواند به بهبود قابلیت تعمیم مدل ها کمک کند. دوم، عملکرد مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) به انتخاب و تنظیم مناسب پارامترهای مدل وابسته است. پارامترهایی

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهش
« اطلاعات جغرافیایی (سپهر) »

مانند نوع تابع هسته، مقدار پارامتر جریمه C و پارامتر gamma می توانند تأثیر قابل توجهی بر مرز تصمیم و در نتیجه عملکرد مدل داشته باشند. بنابراین، نتایج حاصل از SVM باید با توجه به تنظیمات پارامترهای مورد استفاده تفسیر شود و در مطالعات آینده می توان با استفاده از روش های بهینه سازی پارامترها و اعتبارسنجی دقیق تر، عملکرد این مدل را بررسی کرد. همچنین، استفاده از داده های مکانی با ماهیت، مقیاس و دقت متفاوت می تواند بر نتایج نهایی پهنه بندی اثر گذار باشد. در پژوهش های آینده، استفاده از داده های با تفکیک مکانی بالاتر، مجموعه داده های لرزه ای کامل تر و روش های پیشرفته تر برای تنظیم و بهینه سازی مدل ها می تواند به افزایش دقت و قابلیت تعمیم نتایج کمک کند.

تعارض منافع: در این پژوهش، حامی مالی و تعارض منافع وجود ندارد.

مقاله در نوبت انتشار

References:

1-Abdullah, G.M.S., Abd El Aal, A., Al Saiari, M., Radwan, A.E. (2023). Sustainable impact of coarse aggregate crushing waste (CACW) in decreasing carbon footprint and enhancing geotechnical properties of silty sand soil. Appl. Sci. https://doi.org/ 10.3390/app131910930.

2-Adib, A. (2016). Site classification using natural frequency base on seismic data and suggestions for application in Iranian Building Code. Case study Ardakan City. J. Earth Space Phys. 42, 75–88. https://doi.org/10.22059/jesphys.2016.54998.

3- Ahmadi, A., & Rahmati, M. (2015). Application of quantitative geomorphometric indices in identifying landslide-prone areas using the SVM model (Case study: Khorramabad-Pol-e Zal freeway). Quantitative Geomorphological Research, Year 4(3), pp. 197-213. (In Persian)

4- Akbari, M. (2015). Strategic management of natural hazards based on a systematic approach (Case study: Desertification risk management). The 6th International Conference on Comprehensive Crisis Management. (In Persian)

5-Gong, Z., et al. (2024). The 2023 M_w7.7 Pazarcik earthquake caused a reversal in vertical motion along the SW branch of the East Anatolian fault. J. Struct. Geol. 184, 105172. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2024.105172.

6- Ghasemian, B., Abedini, M., Roostaei, S., & Shirazadi, A. (2017). Landslide susceptibility assessment using the support vector machine algorithm (Case study: Kamyaran County, Kurdistan Province). Quantitative Geomorphological Research, Year 6(3), pp. 15-36. (In Persian).

7-Gholami Rad, Z. Behrouzi Banbidi, K. (2009). Establishment of rural settlements in Kermanshah province in relation to faults using GIS. Quarterly Journal of New Thoughts in Geographical Sciences, 1(1), 21-30. (In Persian).

8-Jalalian, H. Dadgar, H .(2015). Zoning vulnerability of rural settlements to earthquakes using the AHP model in GIS environment (Case study: Chorzaq district of Tarom county). Quarterly Journal of Geography and Environmental Planning, 26(3), 29-42. (In Persian).

9- Kashani Asl, A. (2016). Application of fuzzy logic in analyzing the vulnerability of urban physical spaces against earthquakes (Case study: Ahar city). National Conference on Construction in Earthquake-Prone Regions in Memory of the Arasbaran Earthquake. (In Persian).

نشریه علمی پژوهش
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»

10-Masson, F., Saad, O.M., Zaher, M.A., Song, X. (2025). Overview of the focus issue on enhancing earthquake research through geomagnetic and seismic data analysis. Earthq. Sci. 38, 134–135. https://doi.org/10.1016/j.eqs.2025.01.001.

11-Majedi, M. R. Hosseinzadeh, M. R .(2018). Zoning of earthquake-prone areas using the AHP model in a GIS environment (Study area: Kermanshah province: Kermansh county). Fifth National Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning, Tehran, May 2018. (In Persian).

12-Pajoohan, A. Rezaei, B. Naderi, N.(2019). Identification of factors affecting the sustainability of small businesses in earthquake areas of Kermanshah province; Journal of Environmental Sustainability Geography. (In Persian).

13- Ramezani Gourabi, B. (1992). Geographical investigation of the June 21, 1990 Gilan earthquake. Proceedings of the 8th Congress of Iranian Geographers, Volume 1 (Natural), University of Isfahan Press. (In Persian).

14-Sheibani, M. (2010). Seismic Hazard Assessment of Iran. Iranian Geophysics Quarterly. (In Persian).

15-Taesiri, V., Pourkermani, M., Sorbi, A., Almasian, M., Arian, M. (2020). Morphotectonics of Alborz Province (Iran): A Case Study Using GIS Method. Geotectonics 54, 691–704. https://doi.org/10.1134/S001685212005009X.

16-Wang, Z. Brenning, A. (2021). Active-learning approaches for landslide mapping using support vector machines. Remote Sensing, 13(13), 2588.

17-Zare, M. (2004). Earthquake Hazard Zoning in Iran. International Institute of Seismology. (In Persian).

18-Yamani, M. Ahmadabadi, A. Zare,G. (2012). Application of support vector machine algorithm in landslide risk zoning (case study: Darakeh catchment area). Geography and Environmental Hazards. (In Persian).

19-Yao, X. Tham, LG. Dai, FC. (2008). Landslide susceptibility mapping based on support vector machine: A case study on natural slopes of Hong Kong, China. Geomorphology, 101: 572-582.

20-Zhao, S., & Zhao, Z. (2021). A Comparative Study of Landslide Susceptibility Mapping Using SVM and PSO-SVM Models Based on Grid and Slope Units. Mathematical Problems in Engineering, 2021(1), 8854606.

مقاله در نوبت انتشار
نشریه علمی پژوهشی
«اطلاعات جغرافیایی (سپهر)»