

ارزیابی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از تئوری کاتاستروف در حوضه آبریز زمکان کرمانشاه

فریا اسفندیاری درآباد - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
قباد رستمی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
رقوف مصطفی‌زاده* - دانشیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
موسی عابدینی - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴ تأیید نهایی: ۱۴۰۳/۰۵/۲۲

چکیده

زمین‌لغزش‌ها جزو مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی در مناطق کوهستانی به‌شمار می‌روند. ارزیابی مکانی و تهیه نقشه‌های خطر راهکاری اساسی در رابطه با مدیریت ریسک زمین‌لغزش به‌شمار می‌رود. در پژوهش حاضر به ارزیابی مکانی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز زمکان کرمانشاه پرداخته شده است. در این راستا، از ۱۳ فاکتور مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، عدد ناهمواری ملتون، تحدب سطح زمین، طول دامنه، عمق دره، رطوبت توپوگرافیک، بارش، سازندهای زمین‌شناسی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و پوشش گیاهی استفاده شد. به‌منظور ترکیب و روی هم گذاری فاکتورهای مذکور از توابع تئوری کاتاستروف در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شد. مدل مذکور برای رفع عدم قطعیت‌های مرتبط با تصمیم‌گیری و کلاسه‌بندی داده‌ها به کار گرفته شد. در مدل مذکور وزن معیارها براساس مکانیسم درونی سیستم تعیین می‌شود که دارای ماهیت ریاضیاتی است. مدل‌سازی مبتنی بر توابع تئوری کاتاستروف نشان داد که فاکتورهای شیب با ضریب ۱/۳، بارش با ضریب ۱/۲، ارتفاع با ضریب ۱/۱ و سازندهای زمین‌شناسی با ضریب ۱ مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در حوضه زمکان هستند. بالغ بر ۳۲/۴ درصد مساحت حوضه مطالعاتی در کلاس‌های با خطرپذیری زیاد و بسیار زیاد قرار گرفت. به‌دلیل برآیند عوامل مؤثر مانند ارتفاع، شیب و بارش زیاد و نیز تناوب مارن، آهک رسی و شیل، بخش‌های مرکزی و جنوبی منطقه از پتانسیل لغزشی بالایی برخوردار می‌باشند. نتایج بیانگر کارایی مطلوب توابع تئوری کاتاستروف مبتنی بر GIS در تهیه نقشه حساسیت وقوع زمین‌لغزش است که بر اساس منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC)، دقت مدل حدود ۹۰ درصد برآورد شده است. در مدل مورد استفاده وزن معیارها بر اساس مکانیسم درونی سیستم تعیین می‌شود و ضمن قابلیت تکرارپذیری و تعمیم منجر به کاهش عدم قطعیت و نیز ترکیب داده‌های کمی و کیفی می‌شود.

واژگان کلیدی: زمین‌لغزش، پهنه‌بندی، تئوری کاتاستروف، GIS، حوضه زمکان.

مقدمه

زمین‌لغزش فرآیند حرکت توده‌هایی از مواد، مانند سنگ و خاک به سمت پایین دامنه است که توسط عوامل مختلفی از جمله زلزله، بارش شدید و فعالیت‌های انسانی ایجاد می‌شوند (هایلند و بابروسکی^۱، ۲۰۰۸). زمین‌لغزش‌ها، به‌ویژه مواردی که حرکت سریع دارند، می‌توانند خسارت‌های مستقیمی به زیرساخت‌ها وارد کرده و منجر به کشته و مجروح شدن افراد زیادی شوند (آرین تبار و همکاران، ۱۳۹۹؛ سرایی و اصغری سراسکانرود، ۱۴۰۰). زمین‌لغزش‌های بزرگ مقیاس اغلب اثرات اجتماعی و اقتصادی ماندگاری دارند. در نتیجه، زمین‌لغزش‌ها یکی از پرهزینه‌ترین بلایای طبیعی در جهان به شمار می‌روند (دیلی^۲ و همکاران، ۲۰۰۵). زمین‌لغزش‌ها تنها ۲ درصد از سطح زمین را پوشش می‌دهند (بروکس^۳ و همکاران، ۲۰۲۰)؛ با این حال بسیار فراگیر بوده و در نقاط مختلف جهان از جمله مناطق کوهستانی، لبه‌های فلات‌ها و مناطق ساحلی یافت می‌شوند و هر ساله خسارات قابل توجهی به افراد و زیرساخت‌ها وارد می‌کنند (اصغری سراسکانرود و بلواسی، ۱۳۹۷). در این رابطه، بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ میلادی منجر به مرگ حدود ۶۰۰۰۰ نفر شده‌اند (گوها-ساپیر^۴ و همکاران، ۲۰۱۷) و ۱۷ درصد از کل میانگین سالانه تلفات جهانی بلایای طبیعی (۱۲۱ میلیارد دلار) را شامل می‌شوند (سیم^۵ و همکاران، ۲۰۲۲). زمین‌لغزش‌ها همچنین می‌توانند باعث بروز بلایای ثانویه مختلفی مانند روانه‌های گلی، سیل و زمین‌لرزه شوند (فان^۶ و همکاران، ۲۰۱۹). از آغاز قرن بیست و یکم، به دلیل تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، فراوانی، شدت و تأثیر زمین‌لغزش‌ها افزایش یافته و تهدیدات قابل توجه جانی و مالی به همراه داشته‌اند (روحان^۷ و همکاران، ۲۰۲۳). در سال‌های اخیر با توسعه سریع اقتصادی-اجتماعی، دامنه مکانی فعالیت‌های انسانی نیز به تدریج گسترش یافته است. این امر همراه با تأثیر بارش شدید، باعث افزایش فراوانی زمین‌لغزش‌ها در مناطق کوهستانی شده و خسارات اقتصادی ناشی از آنها نیز به تدریج افزایش یافته است (نادیم^۸ و همکاران، ۲۰۰۶؛ گاریانو و گزتی^۹، ۲۰۱۶). بدین ترتیب، زمین‌لغزش‌ها تبدیل به مانعی برای توسعه مناطق کوهستانی شده است (وو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۳).

با توجه به ماهیت پیچیده مکانیسم‌های محرک زمین‌لغزش (به‌عنوان مثال، بارندگی و زمین‌لرزه)، پایش دینامیک آن برای ارزیابی خطر و مدیریت ریسک حیاتی است. تغییر شکل زمین‌لغزش می‌تواند بسیار آهسته بوده (چند میلی‌متر در سال) یا با گسیختگی ناگهانی همراه باشد (هانگر^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۴)؛ بنابراین مخاطرات مرتبط با آنها شامل آسیب دائمی به سازه‌های انسان‌ساخت و حوادث مخرب فاجعه‌آمیز است. لغزش‌های بزرگ معمولاً بخش عمده‌ای از خسارت‌ها و تلفات جانی را سبب می‌شوند (فرود و پتلی^{۱۲}، ۲۰۱۸). توسعه ابزارها و تکنیک‌ها به منظور شناسایی و پایش این فرآیندهای دامنه‌ای

^۱ - Highland & Bobrowsky

^۲ - Dilley

^۳ - Broeckx

^۴ - Guha-Sapir

^۵ - Sim

^۶ - Fan

^۷ - Rohan

^۸ - Nadim

^۹ - Gariano and Guzzetti

^{۱۰} - Wu

^{۱۱} - Hungr

^{۱۲} - Froude & Petley

ثقلی حائز اهمیت زیادی است (پونزیانی^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). هنگامی که دامنه ناپایدار می‌شود، مواد از دامنه به پایین منتقل می‌شوند تا زمانی که شرایط شیب پایدار حاصل شود. ناپایداری دامنه‌ای ارتباط نزدیکی با حساسیت به زمین لغزش دارد. اگر ناپایداری دامنه زیاد باشد، احتمال وقوع زمین لغزش نیز زیاد است. اصطلاح حساسیت زمین لغزش به احتمال یا شانس یا احتمال وقوع زمین لغزش‌های بالقوه در یک منطقه مشخص بر اساس شرایط ژئومحیطی محلی اشاره دارد (گروزاوو^۲ و همکاران، ۲۰۱۳). عوامل توپوگرافی مانند جهت شیب، زاویه شیب، انحنای سطح و انحنای پروفیل توسط لی^۳ و همکاران (۲۰۰۲) برای تجزیه و تحلیل حساسیت استفاده شد. ماگلیولو^۴ و همکاران (۲۰۰۸) لیتولوژی، ساختار، مواد دامنه، پوشش گیاهی، آب و هوا و پارامترهای کاربری زمین را برای تهیه حساسیت زمین لغزش در نظر گرفتند. علاوه بر عوامل طبیعی، فعالیت‌های انسانی مانند راه‌سازی، شیب‌بری، شهرنشینی و سایر فعالیت‌های انسانی نقش مهمی در وقوع زمین لغزش دارند (سیدل و اوچیائی^۵، ۲۰۰۶). برخی از محققان از بارش به‌عنوان یک عامل محرک (آغازکننده) استفاده کردند (استرن^۶، ۱۹۹۵). علاوه بر بارش، زلزله با شدت‌های مختلف به ویژه در مناطق مستعد لرزه، توسط رستریو و الوارز^۷ (۲۰۰۶) به‌عنوان عامل محرک در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش می‌تواند به‌طور مستقیم امکان وقوع زمین لغزش در یک منطقه خاص را منعکس کند که برای کاهش خطر زمین لغزش و ارائه اطلاعات برای کاربری و برنامه‌ریزی زمین ضروری است. به‌طور کلی نقشه حساسیت زمین لغزش با ادغام لایه‌های داده‌های عاملی زمین لغزش با استفاده از مدل‌های علمی مختلف تهیه می‌شود که در حالت کلی می‌توان به دو رویکرد کیفی و کمی تقسیم نمود (ایالو و یاماگیشی^۸، ۲۰۰۵). رویکردهای کیفی بر مبنای قضاوت‌های ذهنی کارشناس یا کارشناسانی است که خطر زمین لغزش را مورد ارزیابی قرار می‌دهند (الوتی و چاودهوری^۹، ۱۹۹۹). رویکردهای مذکور خود به دو نوع قابل تقسیم‌اند: تحلیل پراکندگی یا سیاهه لغزش^{۱۰} و رویکرد اکتشافی^{۱۱}. تجزیه و تحلیل سیاهه زمین لغزش، توزیع لغزش‌های گذشته و حال را برای تعیین وقوع زمین لغزش‌های آتی در نظر می‌گیرد (هانسن^{۱۲} و همکاران، ۱۹۹۵). در رویکردهای اکتشافی، تهیه نقشه ژئومورفولوژیکی به توانایی یک محقق خبره برای تجزیه و تحلیل و نقشه‌برداری مناطق گسیختگی واقعی و احتمالی دامنه بستگی دارد (هانسن و همکاران، ۱۹۹۵). شماری از رویکردهای کیفی، ایده‌های رتبه‌بندی و وزن‌دهی را ترکیب کرده و ممکن است از ماهیت نیمه کمی برخوردار باشند. در این رابطه می‌توان به استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی^{۱۳}

^۱ - Ponziani

^۲ - Grozavu

^۳ - Lee

^۴ - Magliulo

^۵ - Sidle and Ochiai

^۶ - Stern

^۷ - Restrepo and Alvarez

^۸ - Ayalew & Yamagishi

^۹ - Aleotti & Chowdhury

^{۱۰} - Landslide inventory

^{۱۱} - Heuristic approach

^{۱۲} - Hansen

^{۱۳} - Analytic hierarchy process (AHP)

(AHP) ساعتی^۱ (۱۹۸۰) و ترکیب خطی وزنی^۲ (WLC) اشاره نمود که تا حد زیادی نتایج آنها بسته به دانش متخصصان می‌تواند متفاوت باشد. رویکردهای کمی، رابطه بین فاکتورهای عاملی یا کنترل‌کننده و زمین‌لغزش‌ها را به صورت کمی بیان می‌کنند (ایالو و یاماگیشی، ۲۰۰۵) و به دو رویکرد طبقه‌بندی می‌شوند: تحلیل‌های آماری و جبری. رویکردهای جبری، تنها هنگامی قابل اجرا و عملی هستند که خصوصیات ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی در کل منطقه مطالعاتی تقریباً همگن بوده و از طرف دیگر انواع زمین‌لغزش‌ها ساده باشند (وان وستن و سوترز^۳، ۱۹۹۸). مدل‌های آماری با در نظر گرفتن رابطه بین رخداد‌های زمین‌لغزش گذشته و شرایط ژئومحیطی توسعه داده شدند. در این رابطه، نسبت فراوانی^۴ (FR)، نسبت درست‌نمایی^۵ (LR)، روش ارزش اطلاعاتی^۶ (Info Val)، عامل ریسک نرمال زمین‌لغزش^۷ (LNRF)، وزن شواهد^۸ (WoE)، منطق فازی^۹ (FL) و مدل‌های شاخص آماری^{۱۰} (SI) و مدل‌های چندمتغیره مانند رگرسیون لجستیک^{۱۱} (LR) و مدل‌های تحلیل تشخیصی^{۱۲} (DA)، رویکرد احتمالاتی مانند احتمال بیزی^{۱۳} (BP) و رویکرد فاکتور قطعیت^{۱۴} (CF) به فراوانی توسط محققان در نقاط مختلف جهان استفاده شده که دقت قابل قبولی در پیش‌بینی زمین‌لغزش دارند (ریچنباخ^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۷). تئوری کاتاستروف یک تئوری ریاضیاتی است که می‌تواند به منظور تعیین وزن‌های فاکتورهای موثر بر وقوع زمین‌لغزش بر اساس روابط درونی استفاده شود. این تئوری نخستین بار توسط دانشمند فرانسوی به نام رنه تام در دهه ۱۹۶۰ ارائه شد و هدف اصلی آن مدیریت پدیده‌های ناپیوسته با عملکرد داخلی ناشناخته است و سلسله مراتب، ارزیابی فازی و تابع مطلوبیت را جهت به دست آوردن توابع عضویت فازی کاتاستروف مورد استفاده قرار می‌دهد (خیری‌زاده آروق، ۱۳۹۵). وابستگی متغیرهای حالت به متغیرهای کنترل به جای وزن‌های اختصاص یافته توسط کاربران با توابع کاتاستروفیک تعیین می‌شود (احمد^{۱۶} و همکاران، ۲۰۱۵). با این حال، رویکردی جامع کلی برای مشخص نمودن مناطق مستعد زمین‌لغزش وجود ندارد و هر روشی دارای مزایا و معایب خاص خود است (دومان^{۱۷} و همکاران، ۲۰۰۶؛ ما^{۱۸} و همکاران، ۲۰۱۳).

حوضه زمکان در زاگرس واقع شده است که به دلیل شرایط حساس محیطی مانند ناهمواری بالا وقوع زمین‌لغزش تشدید شده است و با توجه به وجود سکونتگاه‌ها و زیرساخت‌های متعدد در اراضی پرشیب منطقه، وقوع زمین‌لغزش به عنوان

^۱ - Saaty

^۲ - Weighted linear combination (WLC)

^۳ - Van Westen & Soeters

^۴ - Frequency Ratio

^۵ - Likelihood Ratio

^۶ - Information Value

^۷ - Landslide Normal Risk Factor

^۸ - Weight of Evidence

^۹ - Fuzzy Logic

^{۱۰} - Statistical Indices

^{۱۱} - Logistic Regression

^{۱۲} - Discriminant analysis (DA) models

^{۱۳} - Bayesian Probability

^{۱۴} - Certainty Factor

^{۱۵} - Reichenbach

^{۱۶} - Ahmed

^{۱۷} - Duman

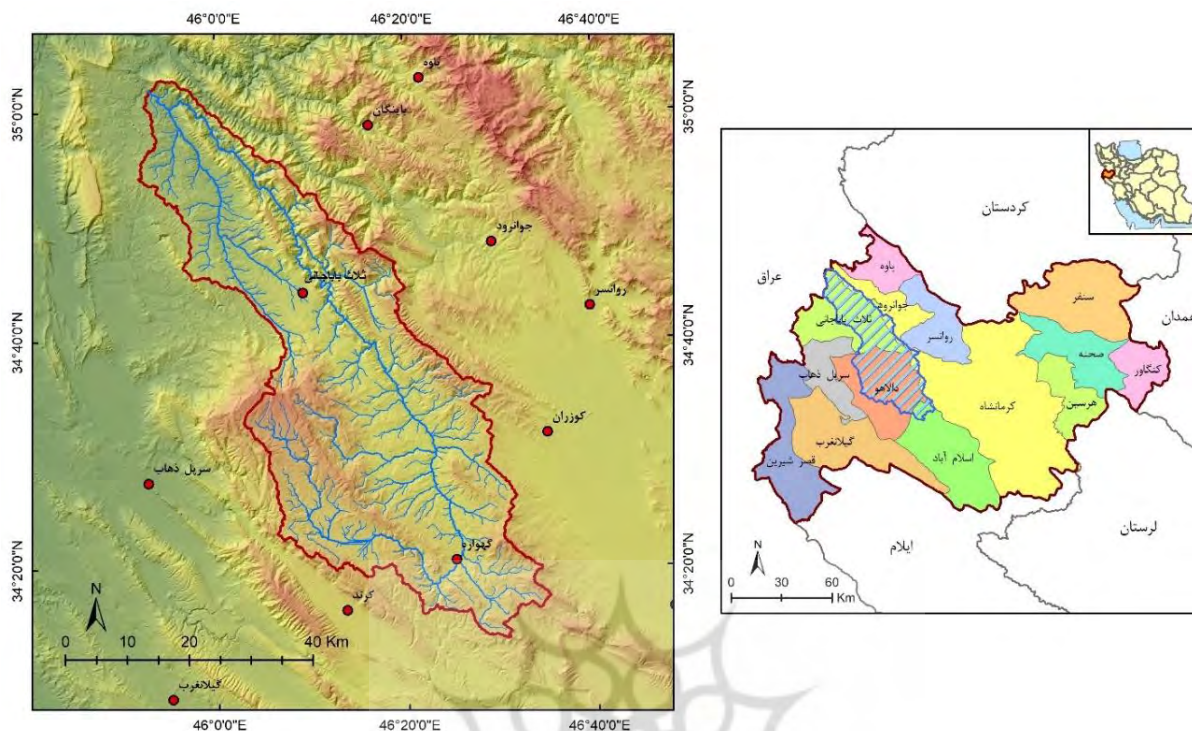
^{۱۸} - Ma

یک مخاطره محیطی جدی مطرح است. بر اساس مرور منابع، ارزیابی مکانی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حائز اهمیت زیادی در برنامه‌ریزی‌های مکانی است. استفاده از تئوری کاتاستروف در ارزیابی پدیده‌های ناپیوسته طبیعی محدود است و با توجه به اینکه رویکرد مذکور دارای مبنای ریاضیاتی قوی است، به‌نظر می‌رسد که می‌تواند در ارزیابی احتمال وقوع و مناطق مستعد زمین‌لغزش دارای کارایی بالا باشد. لذا در این پژوهش به‌منظور تعیین وزن‌های فاکتورهای موثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های از تئوری کاتاستروف استفاده شده است که در آن، میزان اهمیت هر فاکتور نسبت به فاکتورهای دیگر از طریق ارتباط درونی فاکتورها محاسبه می‌شود و باعث کاهش عدم قطعیت می‌شود. با توجه به ماهیت کاتاستروفیک و ناپیوسته پدیده زمین‌لغزش استفاده از رویکرد مذکور می‌تواند به نتایج مطلوبی منتهی شود. لذا هدف و نوآوری پژوهش حاضر، پهنه‌بندی و پیش‌بینی مکانی مناطق مستعد وقوع خطر زمین‌لغزش در محدوده حوضه آبریز زمکان با استفاده از رویکرد مبتنی بر تئوری کاتاستروف است.

مواد و روش تحقیق

موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز زمکان از نظر موقعیت جغرافیایی حوضه مطالعاتی در مختصات ۴۵ درجه و ۵۱ دقیقه و ۳۵ ثانیه تا ۴۶ درجه و ۳۶ دقیقه و ۱۰ ثانیه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۱۳ دقیقه و ۴۰ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۳ دقیقه و ۵ ثانیه عرض شمالی واقع شده است. حوضه مطالعاتی در محدوده سیاسی-اداری استان کرمانشاه قرار گرفته است. بخش عمده‌ای از این حوضه در محدوده شهرستان‌های دالاهو و ثلاث باباجانی واقع شده و همچنین بخش‌هایی محدود از شهرستان‌های جوانرود، روانسر، کرمانشاه و اسلام‌آباد را زهکشی می‌کند. مساحت حوضه آبریز زمکان حدود ۲۳۳۹ کیلومتر مربع و محیط آن ۴۲۶ کیلومتر محاسبه شد. بدین ترتیب، حوضه مطالعاتی یکی از حوضه‌های بزرگ غرب کشور به‌شمار می‌رود. رودخانه زمکان در واقع زهکش تشکیلات آهکی شمال کرد محسوب شده و پس از عبور از شهرستان‌های دالاهو و ثلاث باباجانی در جهت جنوب شرقی به شمال غربی از کشور خارج شده و در داخل خاک عراق به سیروان می‌پیوندد. سکونتگاه‌های روستایی زیادی در محدوده حوضه آبریز زمکان وجود دارند. دو شهر گهواره و ثلاث باباجانی نیز در محدوده این حوضه واقع شده‌اند (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت حوضه آبریز زمکان در استان کرمانشاه واقع در غرب کشور

روش پژوهش

در پژوهش حاضر که بر اساس ماهیت از نوع تجربی و بر اساس روش تحلیل از نوع کاربردی است. در این پژوهش، به منظور ارزیابی مکانی و پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز زمکان از ۱۳ متغیر موثر بر رخداد این پدیده ژئومورفولوژیکی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، عدد ناهمواری ملتون، تحدب سطح زمین، طول دامنه، عمق دره، رطوبت توپوگرافیک، بارش، سازندهای زمین‌شناسی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و پوشش گیاهی استفاده شد که بر اساس پژوهش‌های قبلی انتخاب شده است (اصغری سراسرکانرود و همکاران، ۱۴۰۰؛ پورفرش زاده و اصغری سراسرکانرود، ۱۴۰۱). در راستای اهداف تحقیق که ارزیابی مناطق مستعد زمین‌لغزش با استفاده از رویکرد مبتنی بر تئوری کاتاستروف است، داده‌های مورد نیاز از روی نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و ۱:۵۰۰۰۰؛ نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰؛ تصاویر مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه با قدرت تفکیک ۲۷ متر مربوط به ماهواره Aster بر اساس وسعت بالای منطقه و صرفه‌جویی در زمان و محاسبات با توجه به حجم بالای داده‌های مکانی حاصل شد. همچنین تصاویر ماهواره‌ای Sentinel (با قدرت تفکیک ۱۰ متر) برای تحلیل داده‌های مکانی و تهیه نقشه‌های کاربردی اراضی سامانه و Google Earth (GeoEye) با قدرت تفکیک تقریباً ۱ متر؛ برای تعیین نقاط و محدوده‌های وقوع زمین‌لغزش استفاده شد. به منظور تهیه و آماده‌سازی لایه‌های موضوعی (کاربری اراضی و تهیه شاخص NDVI) از نرم‌افزار ENVI استفاده شد. همچنین برای تهیه لایه‌های اطلاعاتی شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، از نرم‌افزار SAGA استفاده شد. برای پهنه‌بندی و پیش‌بینی مکانی خطر وقوع زمین‌لغزش در محدوده حوضه آبریز زمکان از رویکرد مبتنی بر تئوری کاتاستروف در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. رویکرد مذکور دارای بنیان ریاضیاتی قوی بوده و با توجه به ماهیت زمین‌لغزش‌ها می‌تواند با کارایی بالایی احتمال وقوع زمین‌لغزش را پیش‌بینی کند.

قابل ذکر است که در تحقیق حاضر موقعیت و توزیع مکانی نقاط لغزشی از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری اخذ شد و در ادامه، موقعیت آن‌ها با استفاده از تصاویر گوگل ارث و نیز بازدیدهای میدانی اصلاح و مورد تأیید قرار گرفتند و در ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. در این پژوهش، به منظور تعیین وزن‌های فاکتورهای موثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های

منطقه مورد مطالعه از هفت مدل کاتاستروف استفاده شد که شامل کاتاستروف فولد^۱، کاتاستروف کاسپ^۲، کاتاستروف دم فاخته‌ای^۳، کاتاستروف پروانه‌ای^۴، کاتاستروف دم‌چلچله‌ای^۵، کاتاستروف هایپربولیک اومبیلیک^۶ و کاتاستروف پارابولا اومبیلیک^۷ بودند (احمد و همکاران، ۲۰۱۵؛ خیائو-ژان^۸ و همکاران، ۲۰۱۴). این مدل‌ها در جدول ۱ نشان داده شده‌اند و در این جدول، x بیانگر متغیر حالت و a, b, c, d معرف متغیر کنترل هستند.

جدول ۱: هفت نوع مدل کاتاستروف مورد استفاده در ارزیابی مناطق حساس به زمین‌لغزش (احمد و همکاران، ۲۰۱۵؛ خیائو-ژان و همکاران، ۲۰۱۴).

تابع پتانسیل	متغیرهای حالت	پارامترهای کنترل	مدل کاتاستروف
$V_a(x) = 1/3x^3 + ax$	۱	۱	فولد
$V_{ab}(x) = 1/4x^4 + 1/2ax^2 + bx$	۱	۲	کاسپ
$V_{abc}(x) = 1/5x^5 + 1/3ax^3 + 1/2bx^2 + cx$	۱	۳	دم‌چلچله‌ای
$V_{abcd}(x) = 1/6x^6 + 1/4ax^4 + 1/3bx^3 + 1/2cx^2 + dx$	۱	۴	پروانه‌ای
$V_{abc}(x, y) = x^3 - xy^2 + a(x^2 + y^2) + bx + cy$	۲	۳	ویگ‌وام
$V_{abc}(x, y) = x^3 - xy^2 + a(x^2 + y^2) + bx + cy$	۲	۳	البیتیک اومبیلیک
$V_{abc}(x, y) = x^2y + y^4 + ax^2 + by^2 + cx + dy$	۲	۴	پارابولیک اومبیلیک

یافته‌ها و بحث

در پژوهش حاضر ارزیابی مکانی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه زمکان براساس تئوری کاتاستروف انجام شد که نتایج گام‌های مختلف تحقیق به شرح زیر است.

- ایجاد سیستم‌های شاخص

در گام نخست باید شاخص‌های موثر در وقوع زمین‌لغزش شناسایی شوند که انتخاب آن‌ها بستگی به هدف تحقیق و در دسترس بودن داده‌ها دارد. در پژوهش حاضر، شاخص‌های ارتفاع، شیب، جهت شیب، عدد ناهمواری ملتون، تحدب سطح زمین، طول دامنه، عمق دره، رطوبت توپوگرافیک، بارش، سازندهای زمین‌شناسی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و پوشش گیاهی به‌عنوان عوامل موثر بر وقوع زمین‌لغزش انتخاب شدند. شاخص‌ها با همدیگر در ارتباط بوده و پتانسیل یک محل برای وقوع زمین‌لغزش را تعیین می‌کنند.

^۱ - Fold catastrophe

^۲ - Cusp catastrophe

^۳ - Dovetail catastrophe

^۴ - Butterfly catastrophe

^۵ - Swallowtail catastrophe

^۶ - Hyperbolic umbilical catastrophe

^۷ - Parabola umbilical catastrophe

^۸ - Xiao-jun

ارتفاع: ارتفاع با تاثیر بر اقلیم و پوشش گیاهی، نقش مهمی در فعالیت‌های انسانی ایفا می‌کند و شرایط مساعدی برای ناپایداری‌های دامنه‌ای فراهم می‌کند. متوسط ارتفاع حوضه مطالعاتی ۱۴۹۵ متر است (شکل ۲) و اختلاف ارتفاع حوضه مطالعاتی ۲۰۵۱ متر است.

شیب: شیب به‌عنوان یکی از فاکتورهای موثر در وقوع زمین‌لغزش است که میانگین آن در حوضه آبریز زمکان حدود ۲۲/۲ درصد است (شکل ۳). حدود ۲۷ درصد مساحت حوضه زمکان دارای شیب بیش از ۳۰ درصد بوده و بالغ بر ۴۴ درصد پیکسل‌های لغزشی حوضه مطالعاتی در این سطوح شیب توزیع شده‌اند.

جهت شیب: در جهت‌های شمالی به‌دلیل فراوانی رطوبت و حجم و عمق بیش‌تر مواد هوازده، نسبت به سایر جهت‌های جغرافیایی زمین‌لغزش‌های بیش‌تری اتفاق می‌افتد (گومز و کاوزوگلو^۱، ۲۰۰۵). در حوضه مطالعاتی نیز بالغ بر ۴۱/۳ درصد پیکسل‌های لغزشی در جهت‌های اصلی و فرعی شمالی توزیع شده‌اند (شکل ۴).

عدد ناهمواری ملتون: عدد ناهمواری ملتون بیان‌گر میزان ناهمواری‌ها است و مقادیر بالاتر آن نشان‌دهنده درجه ناهمواری بالا است (شکل ۵). سبب فراوانی زمین‌لغزش‌ها با افزایش مقادیر عدد ناهمواری روند افزایشی نشان می‌دهد. در این رابطه، مساحت کلاس ۲/۷۴ تا ۵/۰۳ حدود ۱۴/۷ درصد، کلاس ۵/۰۴ تا ۸/۲۸ حدود ۷/۳ درصد و کلاس ۸/۲۹ تا ۲۶/۷۳ حدود ۲/۴ درصد از کل حوضه است. نسبت فراوانی در کلاس‌های مذکور به‌ترتیب حدود ۱/۲۱، ۲/۰۵ و ۳/۰۳ درصد محاسبه شد. بدین ترتیب، احتمال وقوع زمین‌لغزش در کلاس‌های با مقادیر بالاتر عدد ناهمواری ملتون افزایش پیدا می‌کند.

تحذب سطح زمین: مقادیر بالای شاخص تحذب سطح زمین^۲ معرف سطوح کاملاً محدب و مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده سطوح مقعر است که در پنج طبقه دسته‌بندی شدند (شکل ۶). با توجه به توزیع زمین‌لغزش‌ها در سطح حوضه مطالعاتی می‌توان بیان داشت که با افزایش تحذب سطح زمین امکان تجمع و انباشت آب، نفوذپذیری خاک، تشکیل خاک و ماندگاری مواد هوازده بر روی دامنه کاهش یافته و در نتیجه وقوع زمین‌لغزش‌ها کاهش پیدا می‌کند. در این رابطه تنها حدود ۲/۵ درصد پیکسل‌های لغزشی حوضه مطالعاتی در سطوح کاملاً محدب حوضه توزیع شده‌اند.

فاکتور طول دامنه: طول دامنه به‌عنوان فاصله از نقطه مبدا^۳ رواناب سطحی تا نقطه رسوب‌گذاری است (ژانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۷)، و هر چه طول دامنه بیش‌تر باشد، سرعت جریان و حجم رواناب بیش‌تر می‌شود و می‌تواند فرایندهای ناپایداری دامنه را تحت تاثیر قرار دهد که بر اساس رابطه ۱ محاسبه شد (لوکا^۴ و همکاران، ۲۰۱۱):

$$LSF = (fa * Cell_size / 22.3)^{0.4} * (\sin \sigma / 0.0896)^{1.3} \quad (1)$$

که در آن: LSF فاکتور طول دامنه و fa تجمع جریان است. طول دامنه در حوضه زمکان از حداقل ۰ تا حداکثر ۱۰۷ متغیر است (شکل ۷). با افزایش فاکتور طول دامنه، نسبت فراوانی زمین‌لغزش‌ها افزایش می‌یابد.

عمق دره: شاخص عمق دره می‌تواند در فرایند پهنه‌بندی و تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش به کار گرفته شود و مقادیر بالاتر این شاخص دلالت بر عمق زیاد دره نسبت به خط‌الراس‌ها دارد (شکل ۸).

شاخص رطوبت توپوگرافیک: این شاخص بیان‌گر تاثیر توپوگرافی بر توزیع رطوبت است که از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود (طالبی خیابوی و مصطفی‌زاده، ۲۰۲۲):

^۱ - Gomez & Kavzoglu

^۲ - Terrain Surface Convexity

^۳ - Zhang

^۴ - Luca

$$TWI = \text{Ln} \frac{(A_s * \text{Pixel area})}{\text{Tan}((S * \pi)/180)} \quad (2)$$

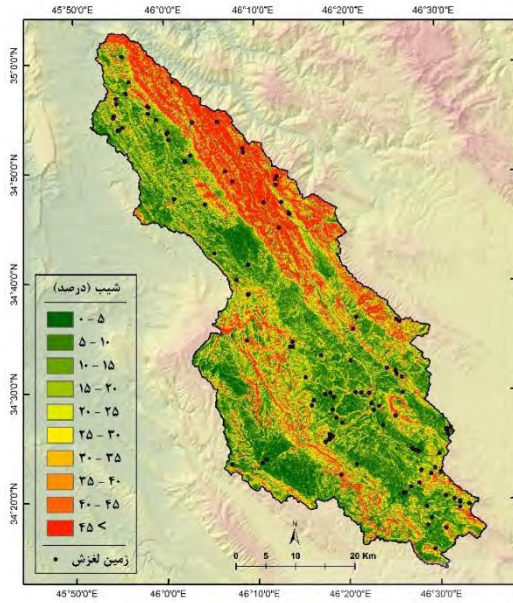
که در آن: A_s مساحت زهکشی دامنه فوقانی در واحد عرض خط کانتور (مترمربع/ متر) و S شیب به درجه است. با توجه نتایج، با افزایش مقادیر شاخص رطوبت توپوگرافیک، تعداد زمین لغزش‌ها کاهش یافته‌اند که ناشی از وجود مناطق کم شیب کم و کاهش نیروی جاذبه است و از طرفی، رطوبت بالاتر باعث افزایش چسبندگی ذرات و کاهش احتمال وقوع زمین لغزش می‌شود (شکل ۹). در این رابطه بالغ بر ۳۳/۸ درصد پیکسل‌های لغزشی در کلاس TWI با مقادیر ۱/۵ تا ۶/۲ و حدود ۴۵/۹ درصد نیز در کلاس با مقادیر TWI بین ۶/۳ تا ۸/۱ توزیع شده‌اند. بارش: میانگین بارش حوضه مورد مطالعه حدود ۷۲۸ میلی‌متر است. در طبقه بارشی ۶۲۰ تا ۷۷۰ میلی‌متر به تدریج وقوع زمین لغزش افزایش پیدا نموده است.

سازندهای زمین‌شناسی: حدود ۴۶/ درصد مساحت حوضه زمکان متشکل از سازند KEpd-gu (سازند کژدمی) است که شامل سنگ آهک لایه‌لایه تا توده‌ای فسیل‌دار، مارن و شیل است (شکل ۱۱) و حدود ۴۷/۱ درصد پیکسل‌های لغزشی حوضه روی این سازند اتفاق افتاده‌اند. سازند گروه بنگستان (Kbgs) و آهک آسماری (EMas-sb) دارای فرسایش‌پذیری پایینی بوده و نسبت به وقوع زمین لغزش حساسیت کمتری دارد و بخش کمتری از پیکسل‌های لغزشی حوضه در محدود این سازندها توزیع شده‌اند. در سازند شیل کندوان (Ekn) سازند که از حساسیت بالایی نسبت به زمین لغزش برخوردار است و بالغ بر ۲۷/۶ درصد پیکسل‌های لغزشی حوضه در محدوده این سازندها توزیع شده‌اند. نهشته‌های آبرفتی جوان کواترنری (Qft2) حدود ۲/۶ درصد سطح حوضه را دربرمی‌گیرند. با وجود حساسیت بالا نسبت به فرسایش تنها چند زمین لغزش کوچک در محدوده این سازند اتفاق افتاده است. بخش کمی از حوضه توسط سازند تله‌زنگ (PeEtz) پوشیده شده که مشتمل بر سنگ آهک فسیل‌دار متوسط لایه تا توده‌ای است و حدود ۳ درصد پیکسل‌های لغزشی حوضه بر روی این سازند توزیع شده‌اند.

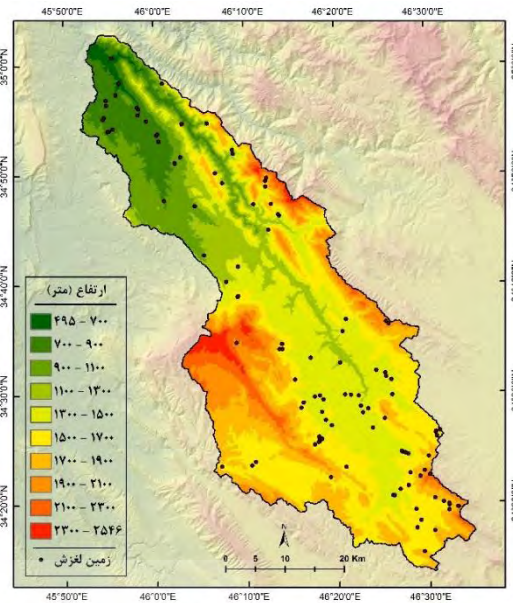
فاصله از آبرهه: پهنه‌های مجاور آبراهه‌ها به دلیل فرایندهایی مانند فرسایش و زیربری دامنه‌ها توسط جریان آب از مناطق مستعد ناپایداری‌های دامنه‌ای هستند (شکل ۱۲). حدود ۱۱/۵ درصد از پیکسل‌های لغزشی حوضه زمکان در فاصله ۰ تا ۵۰ متری آبراهه‌ها و حدود ۱۱/۷ درصد نیز در فاصله ۵۰ تا ۱۰۰ متری آبراهه‌ها توزیع شده‌اند.

فاصله از جاده: در خصوص فاصله از جاده‌های اصلی (شکل ۱۳)، در حوضه آبریز زمکان حدود ۷ درصد پیکسل‌های لغزشی حوضه مطالعاتی در فاصله کم‌تر از ۲۰۰ متری جاده‌ها و حدود ۶ درصد نیز در فاصله بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ متری جاده‌ها توزیع شده‌اند.

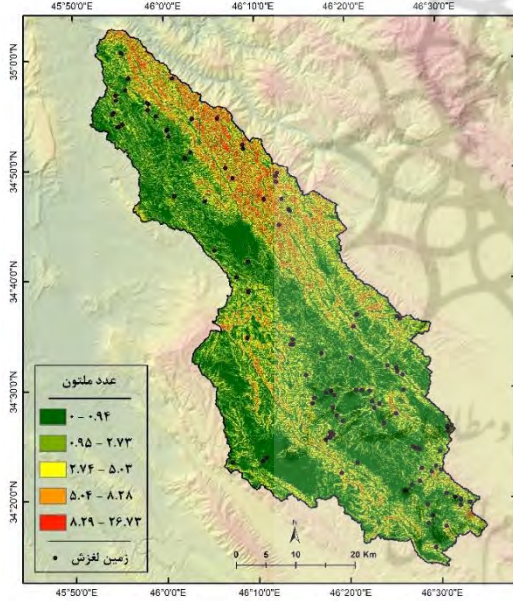
پوشش گیاهی: برای ارزیابی تراکم پوشش گیاهی از شاخص NDVI استفاده شد (یوسفی روشن و عمونیا ۱۴۰۱)، (شکل ۱۴)، که پوشش جنگلی بلوط زاگرس، به‌عنوان مهم‌ترین عوامل پایداری دامنه‌ها در نظر گرفته شد. بالغ بر ۵۴ درصد پیکسل‌های لغزشی در سطوح با مقادیر NDVI کم‌تر از ۰/۱۷ توزیع شده‌اند. سطوح مذکور نشان‌دهنده اراضی بایر یا با پوشش گیاهی ضعیف هستند.



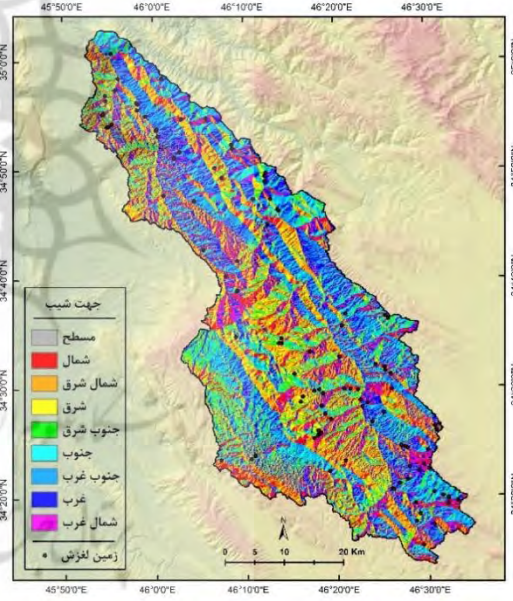
شکل ۳: توزیع شیب در حوضه زمکان



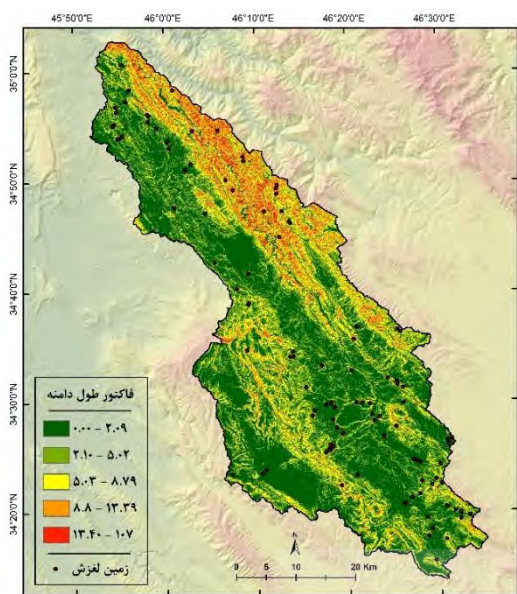
شکل ۲: توزیع ارتفاع در حوضه زمکان



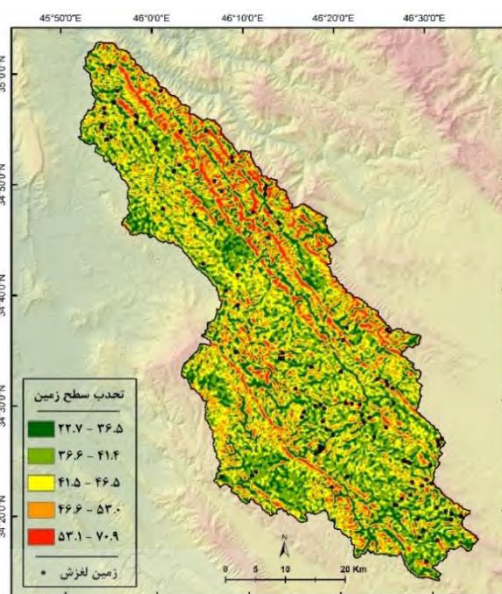
شکل ۵: توزیع عدد ملتون در حوضه زمکان



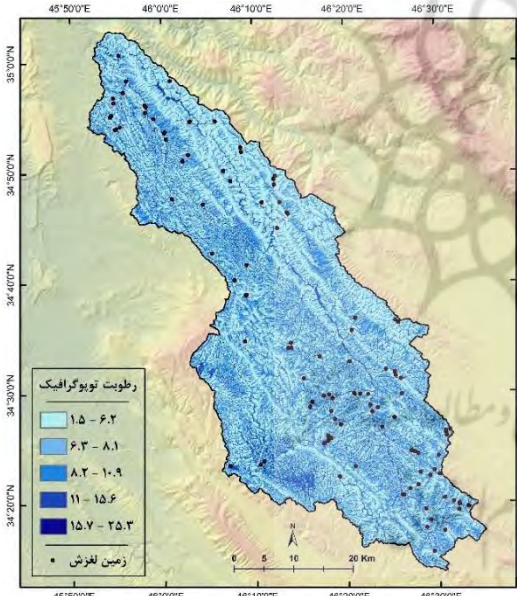
شکل ۴: توزیع جهت شیب در حوضه زمکان



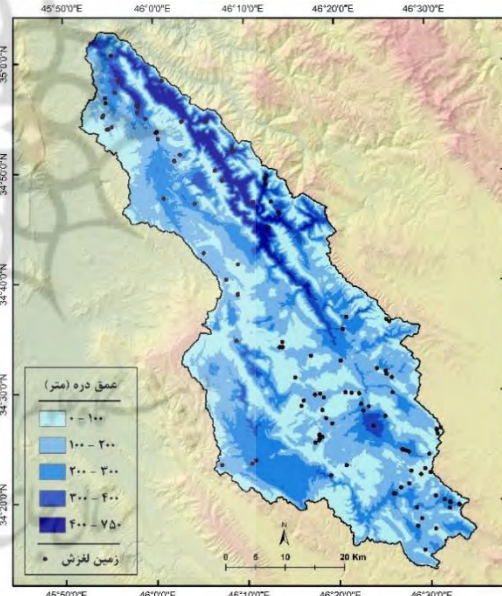
شکل ۷: توزیع طول دامنه در حوضه زمكان



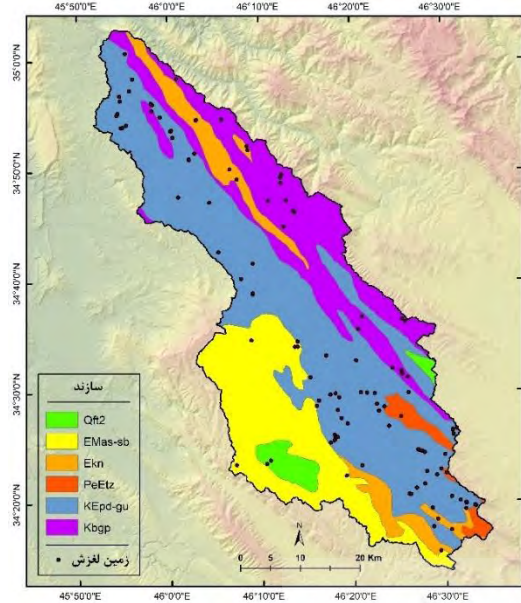
شکل ۶: توزیع تحدب زمین در حوضه زمكان



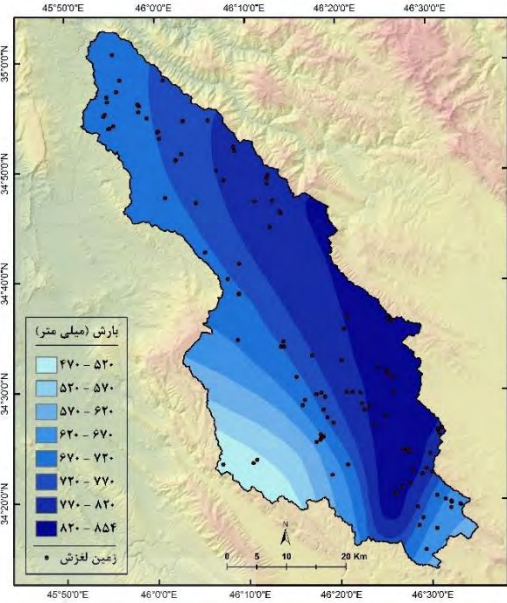
شکل ۹: توزیع رطوبت توپوگرافیک در حوضه زمكان



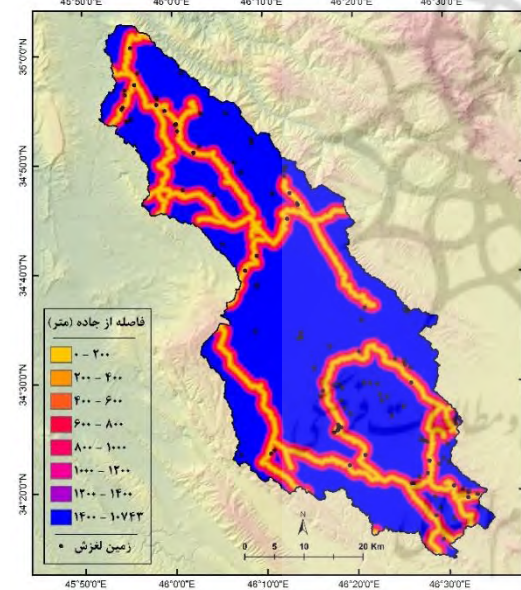
شکل ۸: توزیع عمق دره در حوضه زمكان



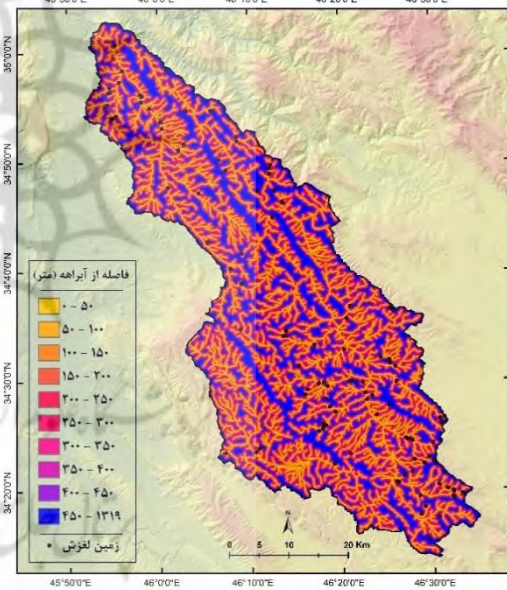
شکل ۱۱: توزیع لیتولوژی در حوضه زمکان



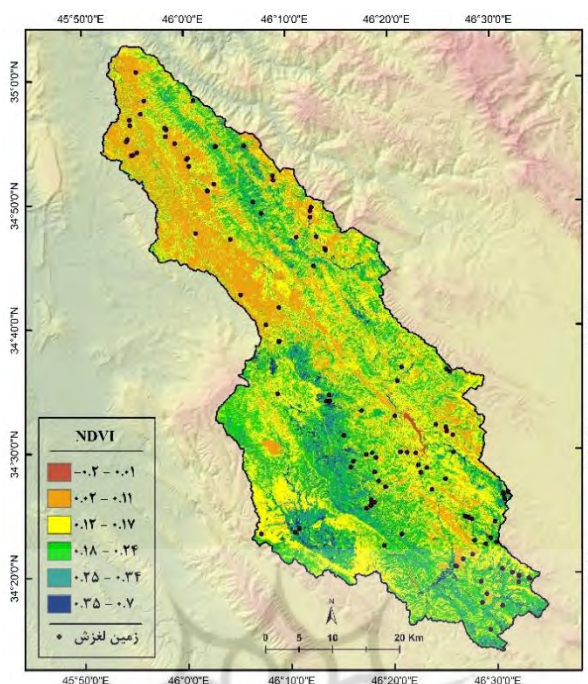
شکل ۱۰: توزیع میانگین بارش سالانه در حوضه زمکان



شکل ۱۳: فاصله از جاده در حوضه زمکان



شکل ۱۲: فاصله از آبراهه در حوضه زمکان



شکل ۱۴: توزیع شاخص NDVI در حوضه زمکان

استانداردسازی لایه‌ها

شاخص‌های مورد استفاده در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش از واحدهای اندازه‌گیری متفاوتی برخوردار بوده لذا یک مرحله ضروری در ترکیب و یکپارچه نمودن لایه‌های موضوعی استانداردسازی است؛ (رابطه ۳ و ۴) (احمد و همکاران، ۲۰۱۵):

معادله مورد استفاده برای استاندارد کردن شاخص‌های «بزرگتر بهتر»

$$x'_i = \frac{x_i - x_{i(\min)}}{x_{i(\max)} - x_{i(\min)}} \quad (3)$$

معادله مورد استفاده برای استاندارد کردن شاخص‌های «کوچک‌تر بهتر»

$$x'_i = 1 - \frac{x_i - x_{i(\min)}}{x_{i(\max)} - x_{i(\min)}} \quad (4)$$

که در آن i شاخص مربوطه، x_i مقدار اصلی i و $x_{i(\max)}$ و $x_{i(\min)}$ مقادیر حداکثر و حداقل هستند. در رابطه با اثرگذاری درونی هر یک از متغیرها در وقوع زمین‌لغزش در حوضه مطالعاتی، فراوانی وقوع زمین‌لغزش در هر یک از کلاسه‌های لایه‌های موضوعی، استناد شد لایه‌های موضوعی استاندارد شدند. از رابطه «بزرگتر بهتر» برای استاندارد نمودن لایه‌های ارتفاع، شیب، طول دامنه، عدد ناهمواری ملتون، عمق دره و بارش استفاده شد. در حالی که، متغیرهای پوشش گیاهی، تحدب سطح زمین، رطوبت توپوگرافیک، فاصله از آبرهه و فاصله از جاده، با رابطه «کوچک‌تر بهتر» استاندارد شدند. دو متغیر سازندهای زمین‌شناسی و جهت شیب به‌عنوان متغیرهای کیفی تحقیق، به اعداد کمی تبدیل شدند و با استفاده از کدهای نسبت به استاندارد نمودن آنها اقدام شد. از طریق استانداردسازی، تمامی لایه‌های موضوعی در دامنه بین ۰ تا ۱ قرار گرفته و می‌توانند با استفاده از ضرایب مربوطه در فرایند ترکیب لایه‌ها مورد استفاده قرار گیرند.

نرمال‌سازی

نرمال کردن داده‌ها بعد از تقسیم سیستم به چند زیرسیستم انجام می‌شود. روابط مورد استفاده جهت نرمال‌سازی در جدول ۲ ارائه شده‌اند. تصاعد کاتاستروف هر متغیر کنترل می‌تواند از تابع فرعی فازی اولیه بر اساس روابط نرمال کردن محاسبه شود که از دو اصل مکمل و غیرمکمل استفاده می‌شود. اصل غیر مکمل به این معناست که متغیرهای کنترل یک سیستم مانند a ، b ، c و d نمی‌توانند جایگزین یکدیگر شوند (همدیگر را جبران، خنثی یا متعادل کنند). بنابراین هنگام یافتن مقدار متغیر حالت x با استفاده از روابط نرمال کردن، کوچکترین مقادیر متغیر حالت متناظر با متغیرهای کنترل، یعنی $x = \min\{x_a, x_b, x_c, x_d\}$ به‌عنوان مقدار متغیر حالت کل سیستم انتخاب می‌شود. از طرف دیگر اصل مکمل به این موضوع دلالت دارد که متغیرهای کنترل همدیگر را تکمیل می‌کنند به طوری که هر کدام تمایل دارند تا به مقدار میانگین برسند یعنی: $x = \{x_a, x_b, x_c, x_d\} / 4$ (خیری‌زاده و اسمعیل‌پور، ۱۴۰۰). در تحقیق حاضر، اصل مکمل برای محاسبه تصاعد کاتاستروف هر متغیر کنترل مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۳ جزئیات روش وزن‌دهی کاتاستروف جهت تلفیق سیستم‌های شاخص خطر زمین‌لغزش حوضه زمکان ارائه شده است. به‌منظور اعتبارسنجی مدل از منحنی مشخصه عملکرد سیستم یا منحنی عملیاتی گیرنده^۱ (ROC) استفاده شد (قربانی و همکاران، ۲۰۲۳). مساحت زیر منحنی^۲ (AUC) معیاری ترکیبی و موثر برای حساسیت و تشخیص جهت ارزیابی اعتبار یک آزمون تشخیصی است.

جدول ۲: روابط نرمال کردن برای تئوری کاتاستروف (احمد و همکاران، ۲۰۱۵)

رابطه نرمال کردن	متغیر کنترل	متغیر حالت	تابع
$x_a = a^{1/2}$ and $x_b = b^{1/3}$	۲	۱	کاسپ
$x_a = a^{1/2}$ and $x_b = b^{1/3}$ and $x_c = c^{1/4}$	۳	۱	دُم‌چلچله‌ای
$x_a = a^{1/2}$ and $x_b = b^{1/3}$ and $x_c = c^{1/4}$ and $x_d = d^{1/5}$	۴	۱	پروانه‌ای
$x_a = a^{1/2}$ and $x_b = b^{1/3}$ and $x_c = c^{1/4}$ and $x_d = d^{1/5}$ and $x_e = e^{1/6}$	۵	۱	ویگ‌وام

با توجه به نتایج نهایی حاصل از اعمال توابع تئوری کاتاستروف می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- چهار متغیر شیب با ضریب ۱/۳، بارش با ضریب ۱/۲، ارتفاع با ضریب ۱/۱ و سازندهای زمین‌شناسی با ضریب ۱ مهم‌ترین متغیرهای موثر بر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز زمکان به‌شمار می‌روند. حوضه آبریز زمکان حوضه‌ای پرشیب با درجه ناهمواری بالا است که شرایط لازم برای وقوع زمین‌لغزش را مهیا نموده است. میزان بارش نیز نقش مهمی در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه دارد؛ به طوری که با افزایش طبقات بارشی بر وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه افزوده شده است. وجود مناطق مرتع با تغییرپذیری بالا به صورت غیرمستقیم بر عواملی مانند بارش و پوشش گیاهی موثر است. بر اساس مدل کاتاستروف، سازندهای زمین‌شناسی چهارمین فاکتور مهم در وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه به‌شمار می‌رود.

- متغیرهای تحذب سطح زمین با ضریب ۰/۹، پوشش گیاهی با ضریب ۰/۸ و عمق دره با ضریب ۰/۷ جزء متغیرهایی به‌شمار می‌روند که دارای اهمیت متوسطی در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه مطالعاتی هستند. اثرگذاری این متغیرها در مقیاس محلی بوده و در صورت فراهم بودن سایر شرایط، مخصوصاً متغیرهای شیب و آب، به‌عنوان تسهیل‌کننده رخداد زمین‌لغزش وارد عمل می‌شوند.

^۱ - Receiver operating characteristic

^۲ - Area Under Curve

- متغیرهای جهت شیب با ضریب ۰/۶، فاصله از آبراهه با ضریب ۰/۵ و طول دامنه با ضریب ۰/۴ جزو متغیرهای نسبتاً کم‌اهمیت در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه مطالعاتی به‌شمار می‌روند. اهمیت کم‌تر این متغیرها به دامنه محدود تأثیر آن‌ها مربوط می‌شود. در شیب‌های شمالی به‌دلیل رطوبت بیش‌تر و خاک عمیق‌تر شرایط نسبتاً مساعدی را برای وقوع زمین‌لغزش فراهم است، اما وجود پوشش گیاهی متراکم در دامنه‌های شمالی، مخصوصاً به‌صورت جنگل‌های بلوط، اثر جهت شیب را تا حدودی خنثی می‌کند. در فاصله‌های نزدیک از آبراهه نیز وجود سازندهای با فرسایش‌پذیری کم از وقوع زمین‌لغزش جلوگیری نموده است. بر اساس فاکتور طول دامنه، در حوضه مورد مطالعه دامنه‌های با طول بیش‌تر منطبق بر ارتفاعات با مواد مقاوم و با حساسیت کم نسبت به لغزش هستند.

- سه متغیر رطوبت توپوگرافیک، عدد ناهمواری ملتون و فاصله از جاده به‌ترتیب با ضرایب ۰/۳، ۰/۲ و ۰/۱ از کم‌ترین میزان اهمیت در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه زمکان برخوردارند. اهمیت کم‌تر متغیرهای مذکور در ارتباط با تغییرپذیری پایین و ماهیت موضعی بوده و اثرگذاری آن‌ها به نقاط خاصی از حوضه محدود شده است.

جدول ۳: روش وزن‌دهی کاتاستروف جهت تلفیق سیستم‌های شاخص خطر زمین‌لغزش حوضه زمکان

وزن	اولویت	عضویت فازی کاتاستروف	تابع کاتاستروف	نرمال‌سازی مقادیر میانگین	انحراف معیار	میانگین	پارامترهای کنترل	لایه داده
۱/۱	۰/۶۸۵۱	۰/۰۰۰	ویگ‌وام	۰/۰۰۰	۱۰۸/۲۱	۸۸۰/۶۶	$۱۰۵۱ \leq \text{کلاس ۱} \leq ۴۹۵$	ارتفاع
		۰/۶۵۸		۰/۲۸۵	۸۷/۶۵	۱۲۲۲/۵۷	$۱۳۴۵ \leq \text{کلاس ۲} < ۱۰۵۱$	
		۰/۸۳۶		۰/۴۸۹	۶۹/۰۱	۱۴۶۷/۷۶	$۱۵۹۵ \leq \text{کلاس ۳} < ۱۳۴۵$	
		۰/۹۳۲		۰/۷۰۱	۸۳/۷۴	۱۷۲۲/۹۸	$۱۹۰۲ \leq \text{کلاس ۴} < ۱۵۹۵$	
		۱/۰۰۰		۱/۰۰۰	۱۳۸/۸۳	۲۰۸۱/۶۶	$۲۵۴۶ \leq \text{کلاس ۵} < ۱۹۰۲$	
۱/۳	۰/۶۹۴۲	۰/۰۰۰	ویگ‌وام	۰/۰۰۰	۲/۲۳	۱/۹۲	$۵ \leq \text{کلاس ۱} \leq ۰$	شیب
		۰/۶۵۲		۰/۲۷۷	۳/۸۴	۱۲/۵۷	$۱۵ \leq \text{کلاس ۲} < ۵$	
		۰/۸۷۱		۰/۵۷۵	۳/۴۳	۲۴/۰۳	$۲۵ \leq \text{کلاس ۳} < ۱۵$	
		۰/۹۴۸		۰/۷۶۶	۵/۳۶	۳۱/۳۲	$۳۵ \leq \text{کلاس ۴} < ۲۵$	
		۱/۰۰۰		۱/۰۰۰	۱۵/۲۳	۴۰/۳۲	$۴۲۸ \leq \text{کلاس ۵} < ۳۵$	
۰/۶	۰/۶۴۹۲	۰/۰۰۰	پروانه‌ای	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	جنوب	جهت شیب
		۰/۶۹۳		۰/۳۳۳	۰/۰۰	۲/۰۰	غرب	
		۰/۹۰۴		۰/۶۶۷	۰/۰۰	۳/۰۰	شرق	
		۱/۰۰۰		۱/۰۰۰	۰/۰۰	۴/۰۰	شمال	
۰/۹	۰/۶۷۷۹	۱/۰۰۰	ویگ‌وام	۱/۰۰۰	۲/۱۰	۳۰/۲۰	$۳۶/۵ \leq \text{کلاس ۱} \leq ۲۲/۷$	تحدب
		۰/۸۵۰		۰/۶۱۴	۱/۳۹	۳۹/۵۰	$۴۱/۴ \leq \text{کلاس ۲} < ۳۶/۵$	
		۰/۸۰۷		۰/۴۲۳	۱/۵۴	۴۴/۱۰	$۴۶/۵ \leq \text{کلاس ۳} < ۴۱/۴$	
		۰/۷۳۳		۰/۲۱۲	۱/۸۲	۴۹/۲۰	$۵۲/۰ \leq \text{کلاس ۴} < ۴۶/۵$	
		۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	۲/۹۲	۵۴/۳۰	$۷۰/۹ \leq \text{کلاس ۵} < ۵۲/۰$	
۰/۲	۰/۶۱۱۸	۰/۰۰۰	پروانه‌ای	۰/۰۰۰	۰/۴۲	۰/۳۸	$۱/۲۶ \leq \text{کلاس ۱} \leq ۰$	ملتون
		۰/۵۹۴		۰/۲۰۹	۰/۶۷	۲/۲۱	$۳/۶۷ \leq \text{کلاس ۲} < ۱/۲۶$	
		۰/۸۵۴		۰/۵۳۱	۰/۹۶	۵/۰۳	$۷/۱۳ \leq \text{کلاس ۳} < ۳/۶۷$	
		۱/۰۰۰		۱/۰۰۰	۱/۸۴	۹/۱۳	$۲۶/۷۳ \leq \text{کلاس ۴} < ۷/۱۳$	
۰/۷	۰/۶۴۹۳	۰/۰۰۰	ویگ‌وام	۰/۰۰۰	۲۵/۳۲	۴۰/۴۲	$۸۲ \leq \text{کلاس ۱} \leq ۰$	عمق دره
		۰/۵۷۲		۰/۱۸۷	۲۳/۵۶	۱۲۳/۹۶	$۱۶۵ \leq \text{کلاس ۲} < ۸۲$	
		۰/۷۷۷		۰/۳۶۴	۲۴/۴۷	۲۰۳/۲۷	$۲۵۳ \leq \text{کلاس ۳} < ۱۶۵$	
		۰/۸۹۸		۰/۵۸۳	۳۸/۸۴	۳۰۰/۸۹	$۳۹۵ \leq \text{کلاس ۴} < ۲۵۳$	

		۱/۰۰۰		۱/۰۰۰	۷۴/۶۷	۴۸۷/۳۴	۳۹۵ < ۵ کلاس	۷۵۱ ≤ ۵ کلاس
--	--	-------	--	-------	-------	--------	--------------	--------------

ادامه جدول ۳: روش وزن‌دهی کاتاستروف جهت تلفیق سیستم‌های شاخص خطر زمین‌لغزش حوضه زمکان

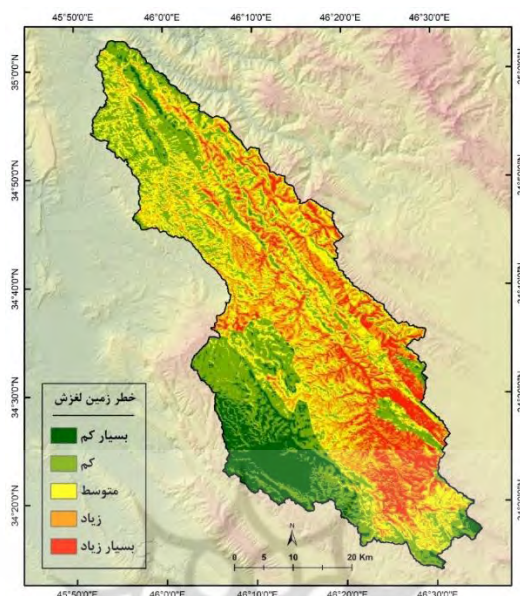
وزن	اولویت	عضویت فازی کاتاستروف	تابع کاتاستروف	نرمال‌سازی مقادیر میانگین	انحراف معیار	میانگین	پارامترهای کنترل	لایه داده
۰/۴	۰/۶۲۱۴	۰/۰۰۰	پروانه‌ای	۰/۰۰۰	۰/۷۲	۱/۱۱	۰ ≤ ۱ کلاس	طول دامنه
		۰/۶۱۵		۰/۲۳۲	۱/۰۸	۴/۰۶	۲/۵ < ۲ کلاس	
		۰/۸۷۱		۰/۵۷۵	۱/۴۲	۸/۴۲	۶/۳ < ۳ کلاس	
		۱/۰۰۰		۱/۰۰۰	۲/۶۴	۱۳/۸۲	۱۱/۳ < ۴ کلاس	
۰/۳	۰/۶۲۱۱	۱/۰۰۰	پروانه‌ای	۱/۰۰۰	۰/۸۳	۲/۲۳	۱/۵۲ ≤ ۱ کلاس	رطوبت توپوگرافیک
		۰/۸۰۴		۰/۵۱۹	۰/۷۶	۷/۹۹	۶/۴۷ < ۲ کلاس	
		۰/۶۸۱		۰/۲۱۵	۱/۳۲	۱۱/۶۴	۸/۸۹ < ۳ کلاس	
		۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	۳/۴۵	۱۴/۲۱	۱۳/۰ < ۴ کلاس	
۱/۰	۰/۶۸۳۰	۰/۰۰۰	ویگ‌وام	۰/۰۰۰	-/۰۰	۱/۰۰	PeEtz :Qft2	زمین‌شناسی
		۰/۶۳۰		۰/۲۵۰	-/۰۰	۲/۰۰	Emas-sb	
		۰/۸۴۱		۰/۵۰۰	-/۰۰	۳/۰۰	Kbgb	
		۰/۹۴۴		۰/۷۵۰	-/۰۰	۴/۰۰	Ekn	
		۱/۰۰۰		۱/۰۰۰	-/۰۰	۵/۰۰	Kepd-gu	
۱/۲	۰/۶۹۱۳	۰/۰۰۰	ویگ‌وام	۰/۰۰۰	۲۷/۹	۵۳۶/۵۰	۴۷۰ ≤ ۱ کلاس	بارش
		۰/۶۶۹		۰/۲۹۹	۲۴/۵۱	۶۲۴/۶۵	۵۷۵ < ۲ کلاس	
		۰/۸۵۰		۰/۵۲۱	۱۶/۰۳	۶۹۰/۱۴	۶۶۴ < ۳ کلاس	
		۰/۹۳۸		۰/۷۳۷	۱۷/۴۱	۷۵۰/۹۱	۷۳۲ < ۴ کلاس	
		۱/۰۰۰		۱/۰۰۰	۱۸/۲۰	۸۳۱/۳۲	۷۹۱ ≤ ۵ کلاس	
۰/۸	۰/۶۷۷۳	۱/۰۰۰	پروانه‌ای	۱/۰۰۰	۰/۰۲۵	-/۰۹۲	≤ ۱ کلاس	NDVI
		۰/۹۰۲		۰/۷۳۴	۰/۰۱۹	-/۱۵۴	-/۱۲۳ < ۲ کلاس	
		۰/۸۰۷		۰/۴۲۵	۰/۰۲۴	-/۲۲۶	-/۱۹۱ < ۳ کلاس	
		۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	۰/۰۵۴	-/۳۲۵	-/۲۷۶ < ۴ کلاس	
۰/۵	۰/۶۳۴۱	۱/۰۰۰	دُم‌چلچله‌ای	۱/۰۰۰	۲۷/۶	۴۶/۶	۰ ≤ ۱ کلاس	فاصله از آبراهه
		۰/۹۰۲		۰/۷۳۴	۳/۱۰	۱۴۷/۹	۱۰۰ < ۲ کلاس	
		۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	۱۷۵/۶	۴۲۸/۳	۲۰۰ < ۳ کلاس	
۰/۱	۰/۵۰۰۰	۱/۰۰۰	کاسپ	۱/۰۰۰	۸۶/۶۲	۱۴۴/۴۵	۰ ≤ ۱ کلاس	فاصله از جاده
		۰/۰۰۰		۰/۰۰۰	۱۹۳۹/۳	۲۶۱۳/۷	۳۰۰ < ۲ کلاس	

– روی هم‌گذاری لایه‌ها و تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش

در گام آخر تمامی لایه‌های موضوعی با استفاده از ضرایب حاصل از توابع تئوری کاتاستروف در GIS ترکیب شدند و نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در پنج کلاس حاصل شد (شکل ۱۵).

در حالت تطبیقی حدود ۹/۹ درصد مساحت حوضه مطالعاتی در کلاس خطر زمین‌لغزش بسیار پایین قرار دارد که در جنوب غرب حوضه واقع شده‌اند که دارای شیب‌های کم‌تر از ۵ درصد، حساسیت پایین سازندهای زمین‌شناسی، نزولات جوی کم‌تر، پوشش گیاهی مطلوب و دامنه‌های جنوبی هستند. بر اساس تطابق زمین‌لغزش‌های ثبت شده با نقشه پهنه‌بندی تهیه شده، کم‌تر از یک درصد پیکسل‌های لغزشی در کلاس خطر بسیار کم قرار گرفته‌اند که حاکی از دقت مطلوب مدل مورد استفاده در تفکیک کلاس‌های خطر است. حدود ۲۸/۹ درصد مساحت حوضه زمکان در کلاس خطر کم قرار گرفته است

و دارای اراضی کم‌شیب، سازندهای زمین‌شناسی مقاوم، بارش کم، پوشش گیاهی متوسط تا متراکم است و بر اساس نقشه تهیه شده، حدود ۷/۹ درصد پیکسل‌های لغزشی در محدوده این کلاس قرار گرفته‌اند.

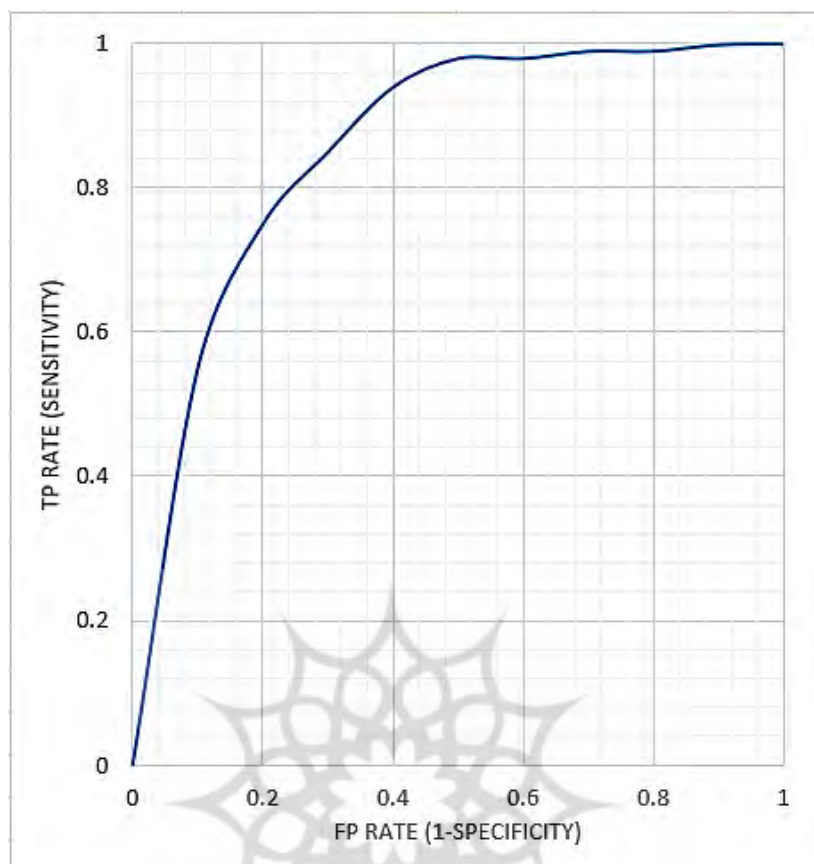


شکل ۱۵: پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش در سطح حوضه زمکان با استفاده از تئوری کاتاستروف

حدود ۲۸/۷ درصد مساحت حوضه زمکان در کلاس با خطر متوسط قرار دارد که فاکتورهای موثر بر زمین لغزش دارای تغییرپذیری بالا می‌باشند. حدود ۱۵/۲ درصد پیکسل‌های لغزشی در محدوده این کلاس توزیع شده‌اند. به ترتیب حدود ۲۱/۹ و ۱۰/۵ درصد مساحت حوضه مطالعاتی در کلاس‌های با خطرپذیری زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته‌اند که جزء مستعدترین مناطق لغزشی حوضه مطالعاتی هستند و حدود ۳۵/۸ و ۴۰ درصد پیکسل‌های لغزشی در دو کلاس مذکور توزیع شده‌اند که عمدتاً در نیمه جنوبی حوضه قرار گرفته‌اند.

در این محدوده‌ها ارتفاع نسبی بالا، وجود شیب‌های مستعد زمین لغزش (به ویژه شیب‌های ۱۰ تا ۴۰ درصد)، رخنمون سازندهای زمین‌شناسی حساس (مخصوصاً سازند کزدمی با تناوبی از مارن، آهک رسی و شیل)، قرارگیری در دامنه‌های غربی زاگرس و دریافت نزولات جوی قابل توجه از دلایل اصلی وقوع زمین لغزش به‌شمار می‌روند.

- نتایج تحقیق حاکی از کارایی مدل مبتنی بر تئوری کاتاستروف در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش است با دقت حدود ۹۰ درصد بر اساس نتایج اعتبارسنجی مدل با منحنی مشخصه عملکرد (ROC) است (شکل ۱۶)، که نشان‌دهنده دقت مطلوب مدل است.



شکل ۱۶- منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) مدل کاتاستروف در ارزیابی پتانسیل زمین لغزش

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر خطر وقوع زمین لغزش در سطح حوضه آبریز زمکان کرمانشاه مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور از تعداد ۱۳ فاکتور موثر بر وقوع زمین لغزش استفاده شد. این فاکتورها عبارتند از: ارتفاع، شیب، جهت شیب، عدد ناهمواری ملتون، تحدب سطح زمین، طول دامنه، عمق دره، رطوبت توپوگرافیک، بارش، سازندهای زمین‌شناسی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و پوشش گیاهی. فاکتورهای مربوطه در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) ترکیب شدند. در رابطه با فرایند ترکیب لایه‌های موضوعی در بستر GIS، اکثر مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره علی‌رغم انعطاف‌پذیری، در فرایند تصمیم‌گیری و قضاوت‌های کارشناسی با عدم قطعیت مواجه هستند و مورد انتقاد جدی قرار گرفته‌اند. بدین ترتیب، مدل‌های مذکور قابلیت تکرارپذیری و تعمیم نتایج را نداشته و نتایج مدل‌ها تنها برای منطقه مورد مطالعه صادق است. در تحقیق حاضر برای رفع عدم قطعیت‌های مرتبط با تصمیم‌گیری و کلاسه‌بندی داده‌ها از مدل مبتنی بر تئوری کاتاستروف استفاده شد. در مدل مذکور وزن معیارها به واسطه مکانیسم درونی سیستم تعیین می‌شود که دارای ماهیت ریاضی است و نتایج مدل قابلیت تکرارپذیری و تعمیم دارد که ضمن کاهش عدم قطعیت‌های تصمیم‌گیری، توانایی ترکیب داده‌های کمی و کیفی متعدد را دارد. نتایج تحقیق بیانگر کارایی مطلوب توابع تئوری کاتاستروف مبتنی بر GIS در ارزیابی مکانی و پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش در حوضه مطالعاتی است. در این رابطه از انطباق نقشه میدانی لغزش با نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش و منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) استفاده شد و دقت مدل حدود ۹۰ درصد برآورد شد. نتایج مدل نشان داد که شیب، بارش، ارتفاع و زمین‌شناسی مهم‌ترین فاکتورهای موثر در وقوع زمین لغزش حوضه زمکان هستند. حدود ۳۲/۴ درصد مساحت حوضه مطالعاتی در کلاس‌های خطرپذیری زیاد و بسیار زیاد زمین لغزش قرار گرفته که قابل

توجه است و نشان‌دهنده پتانسیل بالای لغزشی حوضه زمکان است. بخش عمده‌ای از پهنه‌های مذکور در نیمه جنوبی حوضه توزیع شده‌اند. مجموعه‌ای از شرایط باعث شده‌اند که بخش‌هایی قابل توجه از قسمت‌های مرکزی و جنوبی حوضه زمکان از پتانسیل لغزشی بالایی برخوردار باشند. در این رابطه می‌توان به ارتفاع و شیب زیاد، دریافت نزولات جوی قابل توجه، حضور سازندهای زمین‌شناسی حساس به زمین‌لغزش مانند تناوب مارن، آهک رسی و شیل (سازند کژدمی)، جهت غربی و عمود بر جهت بادهای غربی، طول دامنه زیاد، تراکم زهکشی بالا و دخالت‌های انسانی اشاره نمود.

منابع

- اصغری سراسکانرود، صیاد، امامی، راشد، و پیروزی، الناز. (۱۴۰۰). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های *OWA* و *ANN* (مطالعه‌ی موردی: شهرستان پاره). مخاطرات محیط طبیعی، ۱۰(۲۸)، ۱۳۱-۱۵۰. doi: 10.22111/jneh.2021.33729.1645
- اصغری سراسکانرود، صیاد، بلوآسی، ایمانعلی. (۱۳۹۷). مقایسه مدل شبکه عصبی مصنوعی با مدل منطق فازی در ارزیابی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی حوضه آبریز سیمره چنار). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۷(۲)، ۱۵۸-۱۸۲. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1397.7.2.9.5>
- آرین تبار، حبیب، شرفی، سیامک، نگهبان، سعید. (۱۳۹۹). ارزیابی روش جمع کیفی (*QS*) جهت تعیین گامای بهینه در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: جنگل توسکستان تا گرگان). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۹(۳)، ۷۰-۸۷. doi: 10.22034/gmpj.2020.223877.1161
- پورفرآش‌زاده، فهیمه، اصغری سراسکانرود، صیاد. (۱۴۰۱). ارزیابی و پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش آماری در حوضه آبخیز بالیخلی (ایستگاه یامچی). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۲): ۴۱-۵۹. doi: 10.22067/geoeh.2021.72256.1103
- خیری‌زاده آروق، منصور. ۱۳۹۵. تحلیل مورفودینامیک و تغییرات جانبی مجرای رودخانه زرینه‌رود (از شاهین‌دژ تا دریاچه ارومیه). رساله دکتری، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی، دانشگاه تبریز.
- خیری‌زاده آروق، منصور؛ اسمعیل‌پور، مرضیه. ۱۴۰۰. کاربرد توابع تئوری کاتاستروف در مکان‌یابی بهینه توسعه مکانی شهرها براساس متغیرها و مخاطرات طبیعی (مورد: کلان‌شهر تبریز). جغرافیا و توسعه، شماره ۶۲، صص ۱-۳۰.
- سرائی، بهناز، اصغری سراسکانرود، صیاد. ۱۴۰۰. پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز نکارود با استفاده از منطق فازی و سنجش از راه دور. تخریب و احیاء اراضی طبیعی، ۲(۴): ۵۲-۶۷.
- یوسفی روشن، محمدرضا، عمونیا، حمید (۱۴۰۱). برآورد سطح پوشش گیاهی شهرستان بابلسر با استفاده از شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده (*NDVI*). جغرافیای طبیعی، پیاپی ۵۷، ۱۲۷-۱۳۹.
- Zhang, X., Yang, X., Li, Y., He, X., Lv, G., Yang, J. 2017. Influence of edaphic factors on plant distribution and diversity in the arid area of Xinjiang, Northwest China. *Arid Land Research and Management*, Vol. 32, Issue 1, 38-56.
- -Abdollahzadeh, A., Ownegh, M., Sadoddin, A., & Mostafazadeh, R. (2016). Comparison of two landslide-prone area determination methods in Ziarat Watershed, Golestan Province. *Emergency Management*, 5(1), 5-13.
- -Ahmed, Kamal; Shahid, Shamsuddin; Bin Harun, Sobri; Ismail, Tarmizi; Nawaz, Nadeem; Shamsudin, Supiah. 2015. Assessment of groundwater potential zones in an arid region based on catastrophe theory. *Earth Science Informatics*, Vol. 8, Issue. 3, pp. 539-549.
- -Aleotti, P and Chowdhury, R. 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull Eng Geol Env* 58: 21-44.

- -Ayalew L and Yamagishi. H. 2005. *The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. Geomorphology* 65: 15–31.
- -Broeckx, J., Rossi, M., Lijen, K., Campforts, B., Poesen, J., Vanmaercke, M. 2020. *Landslide mobilization rates: a global analysis and model. Earth Sci. Rev.* 201, 102972.
- -Dilley, R., et al. 2005. *Natural disaster hotspots: A global risk analysis. World Bank Group, Washington, D.C.*
- -Duman TY, Can T, Gokceoglu C, Nefeslioglu HA, Sonmez H. 2006. *Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey. Environ Geol* 51:241–256.
- -Fan, X., Scaringi, G., Korup, O., West, A.J., Van Westen, C.J., Tanyas, H., Hovius, N., Hales, T.C., Jibson, R.W., Allstadt, K.E., Zhang, L., Evans, S.G., Xu, C., Li, G., Pei, X., Xu, Q., Huang, R. 2019. *Earthquake-induced chains of geologic hazards: patterns, mechanisms, and impacts. Rev. Geophys.* 57, 421–503.
- -Froude, M.J., Petley, D. 2018. *Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 18 (8), 2161–2181.
- -Gariano, S.L., Guzzetti, F. 2016. *Landslides in a changing climate. Earth-Science Reviews* 162, 227–252.
- -Ghorbani, A., Mostafazadeh, R., Zabihi, M., & Jafari Roodsari, M. (2023). *GIS-based Determining the Landslide hotspot Occurrence using Getis-Ord Index in Gharnaveh Watershed, Golestan Province. Hydrogeomorphology*, 10(36), 18-1. doi: 10.22034/hyd.2023.55449.1679
- -Gomez, H., and T. Kavzoglu. 2005. *Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela, Engineering Geology*, 78(1–2): 11–27.
- -Grozavu A, Plescan S, Patriche CV, Margarint MC, Rosca B. 2013. *Landslide susceptibility assessment: GIS application to a complex mountainous environment. In: The Carpathians: Integrating nature and society towards sustainability, Environ Sci Eng*, pp 31–44.
- -Guha-Sapir, D., Hoyois, P., Wallemacq, P., Below, R. 2017. *Annual Disaster Statistical Review 2016: the Numbers and Trends. CRED*, p. 91 p.
- -Hansen A, Franks CAM, Kirk PA, Brimicombe AJ, Tung F. 1995. *Application of GIS to hazard assessment, with particular reference to landslides in Hong Kong. In: Carrara A, Guzzetti F (eds) Geographical information systems in assessing natural hazards. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands*, pp 135–175.
- -Highland, L. & Bobrowsky, P. 2008. *The Lan-slide Handbook - A Guide to Understanding Landslides. In: Geological Survey Circular 1325. Reston, Virginia, U.S: US Geological Survey.*
- -Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. 2014. *The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides* 11, 167–194.
- -Lee S, Choi J, Min K. 2002. *Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model. Environ Geol* 43:120–131.
- -Luca, Federica; Conforti, Massimo; Robustelli, Gaetano. 2011. *Comparison of GIS-based gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. Geomorphology*, 134: 297-308.
- -Ma F, Wang J, Yuan R, Zhao H, Guo J. 2013. *Application of analytical hierarchy process and leastsquares method for landslide susceptibility assessment along the Zhong-Wu natural gas pipeline. China; Landslides* 10(4):481–492.
- -Magliulo P, Di Lisio A, Russo F, Zelano A. 2008. *Geomorphology and landslide susceptibility assessment using GIS and bivariate statistics, a case study in southern Italy. Nat Hazards* 47:411–435.

- -Nadim, F., Kjekstad, O., Peduzzi, P., Herold, C., Jaedicke, C. 2006. *Global landslide and avalanche hotspots. Landslides* 3 (2), 159–173.
- -Ponziani, Francesco., Ciuffi, Pierpaolo., Bayer, Benedikt., Berni, Nicola., Franceschini, Silvia., Simoni, Alessandro. 2023. *Regional-scale InSAR investigation and landslide early warning thresholds in Umbria, Italy. Engineering Geology* 327 (2023) 107352, pp. 1-17.
- -Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B.D., Mihir, M., Guzzetti, F. 2018. *A review of statistically-based landslide susceptibility models. Earth-Sci. Rev.* 180, 60–91.
- -Restrepo C, Álvarez N. 2006. *Landslides and their contribution to land cover in the mountain of Mexico and Central America. Biotropica* 38:446–457.
- -Rohan, T., Shelef, E., Mirus, B., Coleman, T. 2023. *Prolonged influence of urbanization on landslide susceptibility. Landslides.*
- -Sidle RC, Ochiai H. 2006. *Landslide processes, predictions and land use, American geographical union. Water Res* 18:312.
- -Sim, K.B., Lee, M.L., Wong, S.Y. 2022. *A review of landslide acceptable risk and tolerable risk. Geoenvironmental Disasters* 9 (1), 3.
- -Stern M. 1995. *Vegetative recovery on earthquake triggered landslide sites in the Ecuadorian Andes. In: Churchill SP, Balslev H, Forero E, Luteyn JL (eds) Biodiversity and conservation of neotropicalmontane forests. The New York Botanical Garden, Bronx, pp 207–220.*
- -Talebi Khiavi, H., & Mostafazadeh, R. (2022). *The spatiotemporal dependencies of terrain indices with soil characteristics in a steep hillslope mountainous area. Arabian Journal of Geosciences, 15(10), 937.*
- -Van Westen, C. J & Soeters, R. 1998. *Geographic information systems in slope instability zonation (GISSIZ). ITC. 156p.*
- -Wu, Wenfu., Guo, Songjing., Shao, Zhenfeng. 2023. *Landslide risk evaluation and its causative factors in typical mountain environment of China: a case study of Yunfu City. Ecological Indicators* 154 (2023) 110821, pp. 1.13.
- -Xiao-jun, Wang; Jian-yun, Zhang; Shahid, Shamsuddin; Xing-hui, Xia; Rui-min, He; Man-ting, Shang. 2014. *Catastrophe theory to assess water security and adaptation strategy in the context of environmental change. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. Vol. 19, Issue. 4, pp. 463-477.*