پهنه بندی احتمال وقوع زمین لغزش
با استفاده از مدل‌های آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات در محیط GIS
مطالعه موردی: بخش رودبار الموت شرقی– استان قزوین

محمد فلاح زژولی [۱]
علیرضا وفایی نژاد [۲]
علی اصغر آل شیخ [۳]
مهدی مدیری [٤]
حسین آقامحمدی [٥]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۲٦
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۹/۲۳

****

چکیده

زمین لغزش از انواع مهم مخاطرات طبیعی است که امنیت جانی و مالی را مورد تهدید قرار می دهد و موجب تخریب محیط زیست و منابع طبیعی می‌شود. تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی از جمله اقداماتی است که از طریق آن می‌توان مناطق حساس به لغزش‌های آینده را شناسایی و از نتایج آن برای برنامه‌ریزی کاربری زمین، جلوگیری از فعالیت‌های عمرانی غیرمجاز، طرح‌ریزی زیرساخت‌ها و بهسازی و ترمیم آن‌ها استفاده کرد. این مطالعه با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات مکانی و مدل‌های آنتروپی شانون و ارزش اطلاعاتی چارچوبی را برای تهیه نقشه مناطق حساس به زمین لغزش در منطقه رودبار الموت شرقی در استان قزوین که درگیر معضل زمین لغزش و ناپایداری‌های دامنه است، ارائه می‌دهد. در این راستا بعد از شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و تهیه داده های مربوطه، نقشه‌های معیار شامل لیتولوژی، شیب، فاصله از گسل، کاربری اراضی، بارش، جهت شیب و ارتفاع برای محدوده مورد مطالعه با تفکیک‌پذیری مکانی سی متر تولید شد. برای تهیه لایه‌های اطلاعاتی و اجرای مدل از نرم افزار ArcGIS با توجه به قابلیت آن در تحلیل داده‌های مکانی، بهره گرفته شده است. ارزیابی نتایج با استفاده از شاخص احتمال تجربی نشان داد که هر دو مدل آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات در برآورد پهنه‌های خطر متوسط، زیاد و خیلی زیاد می‌توانند به خوبی با مقدار شاخص احتمال تجربی ۸٦٪ در شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه عملکرد مناسبی داشته باشند. در برآورد پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد، مدل ارزش اطلاعات با مقدار شاخص احتمال تجربی ۸٦٪ در مقایسه با مدل آنتروپی شانون با مقدار شاخص احتمال تجربی ۷۲٪ از قابلیت بهتری برخوردار است. با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی لغزش، پهنه‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد اغلب در باغ‌ها و مراتع فقیر و امتداد گسل‌های منطقه قرار دارند، لذا لازم است فعالیت‌های انسانی با هدف ساخت و ساز و توسعه را در این مناطق محدود کرد.

واژه‌های کلیدی: زمین لغزش، سیستم اطلاعات مکانی (GIS)، آنتروپی شانون، ارزش اطلاعات، رودبار الموت

****

۱–دانشجوی دکتری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گرایش سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران mohammadfallah2092@yahoo.com

۲– استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران، ایران (نویسنده مسئول) a_vafaei@sbu.ac.ir

۳– استاد گروه سیستم اطلاعات مکانی، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران alesheikh@kntu.ac.ir

٤– دانشیار برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران mmodiri@ut.ac.ir

٥– استادیار گروه سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران– ایران Hossein.aghamohammadi@gmail.com

۱- مقدمه

زمین لغزش نوعی حرکت دامنه‌ای است که در آن مواد در امتداد یک سطح گسیختگی با یک زون گسیختگی مشخص روی دامنه لغزیده و به سمت پایین حرکت می‌کنند. زمین لغزش از جمله سوانح طبیعی است که همه ساله موجب بروز خسارت‌های فراوان مالی و جانی در سراسر جهان می شود. با افزایش جمعیت و گسترش نواحی شهری به مناطق پرشیب و دامنه‌ای خطر حرکات دامنه‌ای به خصوص زمین لغزش افزایش پیدا کرده است. زمین لغزش به عنوان دومین مخاطره طبیعی از طرف سازمان برنامه‌ریزی و توسعه سازمان ملل معرفی شده است *(جمالی و فلاحی، ۱۳۹۶: ۱۸۶)*. مشخصه زمین‌لغزش‌ها توزیع گسترده، فراوانی زیاد، حرکت سریع و زیان‌های فاجعه‌بار است که در مناطق پرجمعیت آسیب می‌تواند بسیار جدی باشد. از این جمله می‌توان به زمین لغزش سال ۲۰۱٤ در ولایت بدخشان افغانستان که منجر به کشته شدن حدود ۲۷۰۰ نفر و زمین لغزش سال ۲۰۱۵ در استان شانژی چین که منجر به ناپدید شدن ٦٤ نفر شد، اشاره کرد *(Zhao, et al., 2017: 1)*.

پهنه‌بندی احتمال وقوع زمین‌لغزش یکی از اقداماتی است که از طریق آن می‌توان مناطق حساس به لغزش‌های آینده را شناسایی و از انجام فعالیت‌های عمرانی و کاربری‌های غیرمجاز در آن مناطق جلوگیری کرد یا برای بهسازی و ترمیم آن اقدام نمود *(طولابی و عابدینی، ۱۳۹۵: ۹۳)*. برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش تاکنون مطالعات زیادی انجام شده است و پژوهشگران با استفاده از روش‌های مختلف رده‌بندی‌های بسیاری ارائه داده‌اند، اما بر پایه وضعیت منطقه مورد مطالعه و عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش، دقت و انعطاف هر یک از این روش‌ها متفاوت خواهد بود *(منصوری و همکاران، ۱۳۹۵: ۲٦۷)*.

عمل پهنه‌بندی با استفاده از مدل‌های مختلف یکی از روش‌هایی است که از طریق آن می‌توان مناطق مستعد برای لغزش‌های آینده را شناسایی و از انجام فعالیت‌های عمرانی و کاربری‌های غیرمجاز در آن مناطق جلوگیری کرد یا برای بهسازی و ترمیم آن اقدام نمود *(طولابی و عابدینی، ۱۳۹۵: ۹۳)*.

تحقیقات گسترده‌ای در زمینه استفاده از تئوری آنتروپی شانون در اولویت‌بندی عوامل مرتبط با وقوع بلایای طبیعی از جمله زمین لغزش به کار رفته است. عرب عامری و همکاران (۱۳۹۷) جهت پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه سرخون کارون با در نظر گرفتن دوازده عامل مؤثر در رخداد زمین لغزش شامل طبقات ارتفاعی، درصد شیب، جهت شیب، فاصله از جاده، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، لیتولوژی، کاربری اراضی، شاخص قدرت جریان، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص انحنای سطح و شاخص انحنای مقطع به شناسایی مناطق حساس به زمین لغزش پرداختند. در این پژوهش از مدل ترکیبی آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات استفاده شده است. نتایج صحت سنجی نشان داد که مدل ترکیبی دارای کارایی بالایی جهت پهنه‌بندی خطر زمین لغزش است. همچنین نتایج نشان داد که عوامل کاربری اراضی و فاصله از جاده بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش داشته‌اند.

تیموری یانسری و همکاران (۱۳۹٦) در پژوهش خود به تعیین عرصه‌های حساس به وقوع زمین لغزش با استفاده از شاخص آنتروپی شانون در حوضه آبخیز چهاردانگه در استان مازندران پرداختند. نقشه‌های عوامل تأثیرگذار بر وقوع زمین لغزش شامل درجهٔ شیب، جهت شیب، انحنای سطح، انحنای نیمرخ، طبقات ارتفاعی، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص وضعیت توپوگرافی، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از شبکه آبراهه، فاصله از جاده، تراکم گسل، تراکم زهکشی و تراکم جاده در نظر گرفته شده است. ارزیابی نقشهٔ حساسیت تهیه شده بیانگر دقت خوب مدل مذکور برای منطقهٔ مورد مطالعه است. همچنین نتایج شاخص آنتروپی نشان داد که لایه‌های ارتفاع، درجهٔ شیب، انحنای سطح و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را بر رخداد زمین لغزش‌های منطقه داشته‌اند.

خسرویان و همکاران (۱۳۹۵) در مقاله خود به

اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و پهنه بندی حساسیت آن درحوضه آبخیز بار نیشابور با استفاده از شاخص آنتروپی شانون پرداختند. به این منظور بیست و پنج عامل تأثیرگذار بر زمین لغزش در منطقه مطالعاتی مورد توجه قرار گرفت و نقشه‌های مربوط به عوامل مذکور در محیط GIS تهیه گردید. ارزیابی نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش بیانگر دقت خیلی خوب مدل است. منصوری و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه خود از دو مدل وزن شاهد و شاخص آنتروپی برای شناسایی مناطق دارای خطر زمین لغزش منطقه دوآب صمصامی استان چهارمحال و بختیاری استفاده کردند. برای این منظور ده لایه عامل شامل شیب، جهت شیب، میزان بارش، شتاب ثقل افقی زمین لرزه، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از نقاط شهری و روستایی، سنگ‌شناسی و کاربری زمین انتخاب شد.

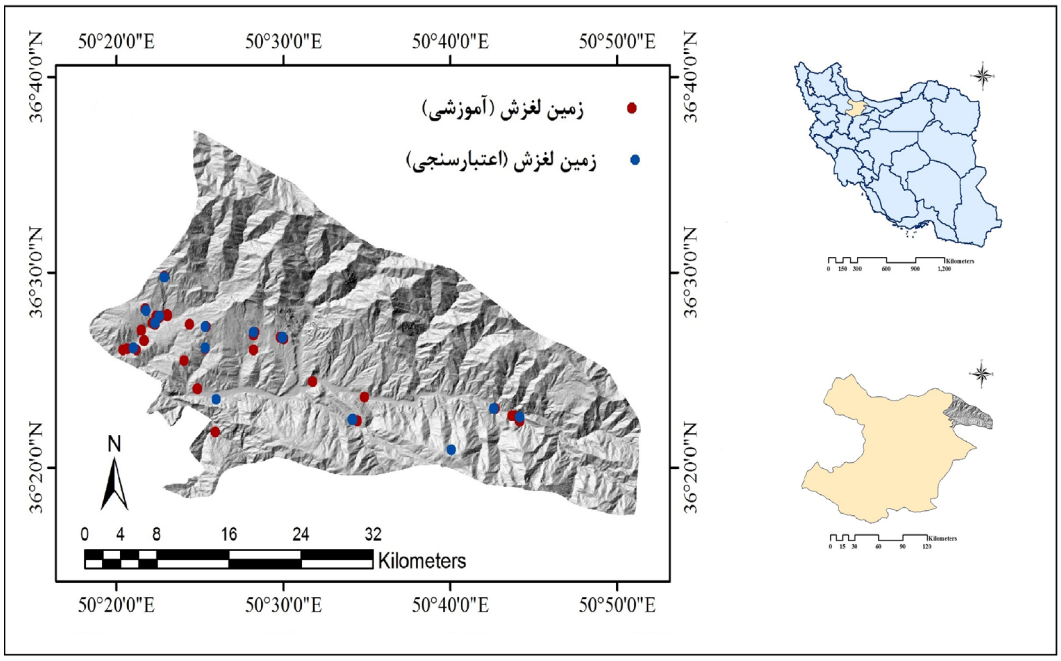
نتایج به دست آمده برآورد خوبی از خطر لغزش در منطقه مورد مطالعه نشان داد؛ به طوری که سنگ شناسی، بارش و کاربری زمین نقش مهمی در ایجاد لغزش‌ها در منطقه دارند و به طور کلی هر دو مدل برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش منطقه مناسب بوده است. مقیمی و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهش خود به ارزیابی مدل آنتروپی در پهنه‌بندی رخداد زمین لغزش در تاقدیس نسار زاگرس شمال غربی پرداختند. پنج عامل لیتولوژی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب و جهت شیب در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل آنتروپی کارایی مطلوبی در برآورد میزان خطر رخداد زمین لغزش دارد و ارتفاع، شیب، فاصله از گسل، جهت شیب و لیتولوژی به ترتیب بیش‌ترین نقش را در رخداد زمین لغزش دارند.

مدل ارزش اطلاعات نیز کاربرد گسترده‌ای در مدل سازی مخاطرات زمین‌شناسی و ارزیابی ریسک آن‌ها از جمله زمین لغزش‌ها دارد. زارع و همکاران (۱۳۹۰) در پژوهش خود به ارزیابی کارایی سه مدل عامل اطمینان، ارزش اطلاعات و تحلیل سلسله مراتبی برای پهنه‌بندی لغزش‌های حوضه آبخیر واز پرداختند. به این منظور نقشه پراکنش لغزش‌ها و نقشه‌های عوامل مؤثر از جمله سنگ شناسی، فاصله از جاده، شیب، فاصله از ابراهه، کاربری اراضی، میزان بارندگی، جهت شیب، طبقات ارتفاعی و فاصله از گسل تهیه شد. ارزیابی مدل‌ها نشان داد که مدل‌های عامل اطمینان، ارزش اطلاعات و تحلیل سلسله مراتبی به ترتیب بیش‌ترین دقت را در تهیه نقشه خطر زمین لغزش منطقه دارند.

پرتابیان و همکاران (۱۳۹۶) در مقاله خود به بررسی کارایی مدل‌های ارزش اطلاعات و تراکم سطح در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در استان سیستان و بلوچستان پرداختند. در این مطالعه نقشه زمین لغزش‌های روی داده و نقشه‌های مربوط به ده عامل مؤثر در وقوع زمین لغزش تهیه و طبقه بندی شد. نتایج نشان داد که مدل ارزش اطلاعات کارایی بیشتری نسبت به مدل تراکم سطح دارد. شعبانی و همکاران (۱۳۹۳) به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش‌های ارزش اطلاعاتی و تحلیل سلسله مراتبی در حوضه آبخیز شلمانرود پرداختند.

در این تحقیق لایه‌های رقومی شامل کاربری اراضی، طبقات شیب، لیتولوژی، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه و فاصله از گسل تهیه شده است. نتایج مقایسه نقشه پهنه‌بندی حاصل از هر مدل با نقشه پراکنش زمین لغزش نشان داد که مدل ارزش اطلاعات نسبت به روش تحلیل سلسله مراتبی روش مناسب‌تری می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که در وقوع زمین لغزش عوامل کاربری اراضی، سنگ شناسی و طبقه شیب تأثیر قابل ملاحظه‌ای نسبت به سایر عوامل دارند.

نصرآزادانی و همکاران (۱۳۹۲) به ارزیابی مدل‌های پهنه‌بندی آماری دو متغیره ارزش اطلاعاتی و تراکم سطح با استفاده از GIS در حوضه آبخیز دز علیا در استان اصفهان پرداختند. پراکنش زمین لغزش‌ها و عوامل مؤثر شامل لیتولوژی، شیب، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، بارندگی سالیانه و پوشش گیاهی در گستره مورد



نگاره ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

مطالعه مشخص و تهیه گردید. نتایج نشان داد که پارامترهای لیتولوژی، پوشش گیاهی و بارندگی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش به شمار می‌آیند و روش پهنه‌بندی ارزش اطلاعاتی در مقایسه با روش تراکم سطح برای منطقه مورد مطالعه مناسب‌تر است و ارجحیت دارد.

در پژوهش پیش‌رو، امکان استفاده از مدل‌های روش آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات برای فرآیند مدل‌سازی و پهنه‌بندی احتمال وقوع زمین‌لغزش در بخش رودبار الموت شرقی استان قزوین بررسی شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند برای پیش‌بینی و هشدار مخاطرات محیطی ناشی از زمین لغزش مورد استفاده قرار گیرد تا علاوه بر کاهش هزینه‌های انسانی، اقتصادی و اجتماعی، سمت‌گیری برنامه‌های توسعه‌ای را در نواحی مستعد زمین لغزش مشخص کند.

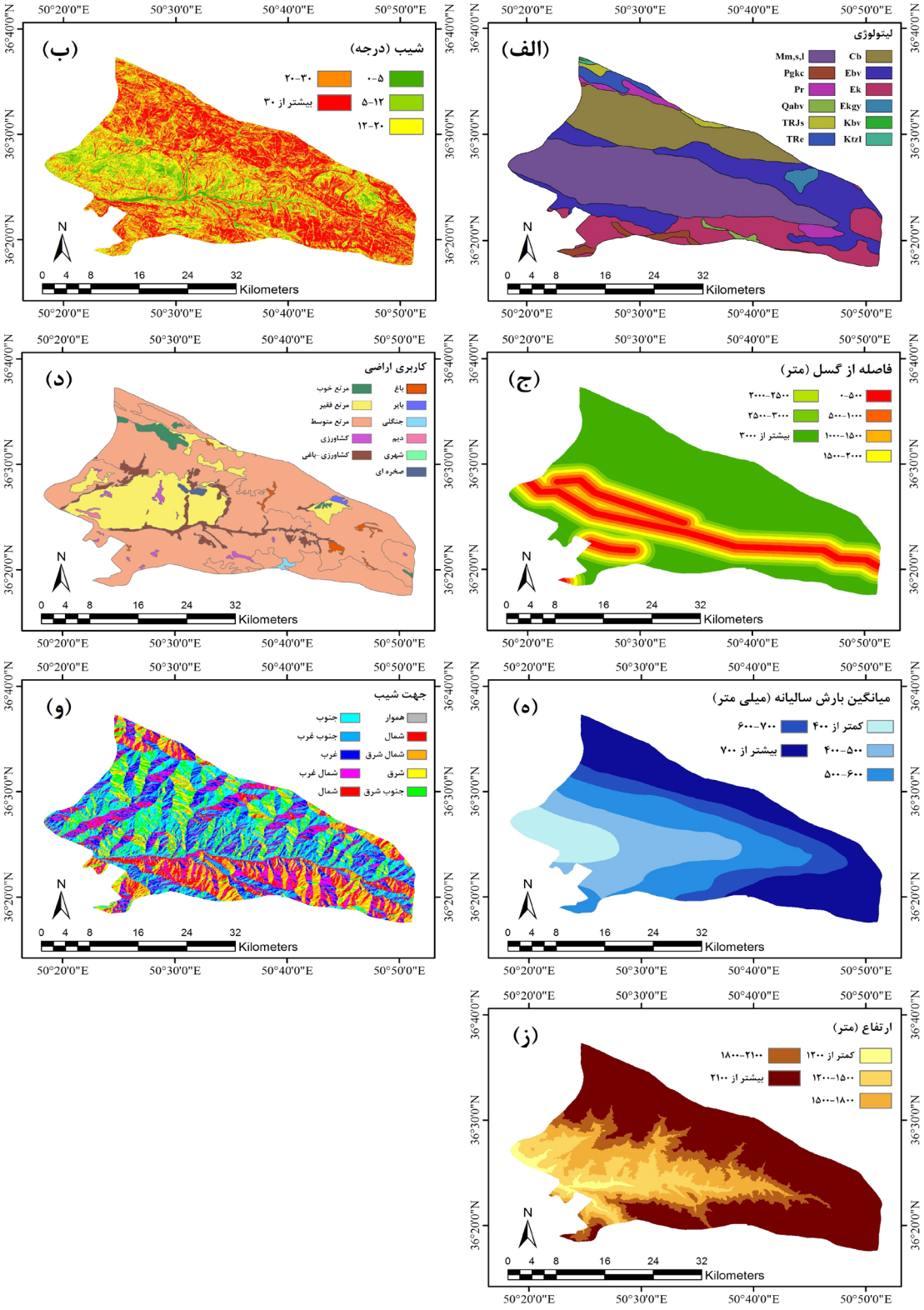
۲- مواد و روش‌ها

۲- ۱- منطقه مورد مطالعه

بخش رودبار الموت شرقی در رشته کوه‌های البرز واقع در شمال شرقی استان قزوین با وسعت برابر با ۹۲۱ کیلومتر مربع واقع شده است (نگاره ۱). این بخش از شمال به دهستان‌های دو هزار و سه هزار تنکابن، از شرق به قله شاه البرز و طالقان، از جنوب شرقی به طالقان، از جنوب به آبیک و از غرب به رودبار الموت غربی محدود می‌شود. وضعیت توپوگرافی منطقه با حداقل و حداکثر ارتفاع ۹۹۵ و ٤۱۱۷ متر و تغییرات شیب صفر تا بیشتر از ۷۰ درجه بسیار متنوع است. مقدار بارندگی سالانه نیز با ٤۰۰ میلی متر در غرب و ۹۰۰ میلی متر در شرق و شمال تغییرات زیادی را نشان می‌دهد.

۲-۲- روش تحقیق

روش تحقیقی که در این پژوهش برای پهنه‌بندی احتمال وقوع زمین لغزش در بخش رودبار الموت شرقی طرح‌ریزی شد مبتنی بر تشخیص ارتباط بین زمین‌لغزش‌های گذشته و مجموعه‌ای از عوامل مختلف توپوگرافی، اقلیمی و محیطی بود. کشف ارتباط‌های موجود با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی و آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات انجام شد.



نگاره ۲: نقشه‌های عوامل مؤثر بر رخداد زمین لغزش بخش رودبار الموت شرقی: الف) لیتولوژی، ب) شیب، ج) فاصله از گسل، د) کاربری اراضی، ه) میانگین بارش سالیانه، و) جهت شیب، ز) ارتفاع

۲-۲-۱- داده‌ها

محل پراکنش رخدادهای زمین لغزش گذشته در منطقه مورد مطالعه بر اساس اطلاعات سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور تعیین شد که بر این اساس ٤٩ زمین لغزش تشخیص داده شد.

با در نظر گرفتن نسبت ۷۰ به ۳۰، داده‌ها به صورت تصادفی به دو بخش داده‌های آموزشی و داده‌های اعتبارسنجی تقسیم‌بندی شدند که در نتیجه ۷۰٪ داده‌ها (۳۵ زمین لغزش) برای ساخت مدل‌ها و ۳۰٪ باقیمانده (١٤ زمین لغزش) برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد (نگاره ۱).

برای مدل‌سازی پتانسیل زمین لغزش علاوه بر زمین لغزش‌های گذشته به مجموعه‌ای از مشخصه‌های توپوگرافی، محیطی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه نیاز است. در کنترل و مدیریت زمین لغزش، شناخت عوامل مؤثر بر آن اهمیت بسیار زیادی دارد.

صفاری و محمدی (۱۳۹۲) در مطالعه خود با بررسی ۳۹ مقاله علمی پژوهشی در خصوص فرایند زمین لغزش، به بررسی عوامل تأثیرگذار در آن با استفاده از تحلیل‌های آماری پرداختند و نشان دادند که لیتولوژی، شیب، فاصله از گسل، کاربری اراضی، بارش، جهت شیب و ارتفاع تأثیرگذارترین عوامل بر وقوع زمین‌لغزش هستند. بنابراین، در پژوهش پیش‌رو نیز عوامل مذکور به عنوان عوامل مستقل برای مدل‌سازی در نظر گرفته شدند.

اطلاعات پایه برای تولید نقشه این عوامل از سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور و همچنین از مدل رقومی ارتفاع (DEM) مربوط به SRTM اخذ شد و پس از انجام اصلاحات برای تهیه نقشه هفت عامل مؤثر با تفکیک‌پذیری مکانی ۳۰ متر مورد استفاده قرار گرفت. برای تهیه لایه‌های اطلاعاتی و اجرای مدل‌ها از نرم افزار ArcGIS با توجه به قابلیت آن در تحلیل داده‌های مکانی، بهره گرفته شده است. نگاره ۲ نقشه عوامل استفاده‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

۲-۲-۲- روش‌ها و مدل‌ها

۲-۲-۲-۱- روش نسبت فراوانی[1]

نسبت فراوانی از جمله روش‌های آماری است که کاربرد گسترده‌ای در مدل‌سازی مخاطرات محیطی نظیر زمین لغزش، سیل و آتش‌سوزی دارد. فرضیه این روش بر این اساس است که مخاطرات آینده در مکان‌هایی با شرایط مشابه با مخاطرات پیشین رخ خواهند داد *(جعفری و مافی غلامی، ۱۳۹۵: ۲۳۵)*. محاسبه نسبت فراوانی برای یک رده عامل مؤثر زمین لغزش به صورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود *(Naghibi, et al., 2015: 177)*.

$$FR = \frac{\frac{A}{B}}{\frac{C}{D}}$$ (رابطه ۱)

A تعداد زمین لغزش رده عامل، B تعداد کل زمین لغزش‌ها در محدوده مورد مطالعه، C مساحت رده عامل و D مساحت کل محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۲-۲-۲-۲- مدل ارزش اطلاعات[2]

این روش توسط یین و یان (۱۹۸۸) معرفی شد *(نصرآزادانی و همکاران، ۱۳۹۲: ٦٨)*. در این روش، زمین لغزش به عنوان متغیر وابسته و هر یک از متغیرهای محیطی به عنوان عوامل مستقل تلقی می‌شوند و میزان اثر هر یک از آن‌ها مستقل از دیگری ارزیابی می‌شود.

تحلیل نهایی پتانسیل زمین لغزش برای هر واحد از منطقه بر اساس مجموع اثر کلیه عوامل در آن واحد انجام می‌شود *(شعبانی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱٦۰)*. ارزش اطلاعاتی عوامل مختلف از تقسیم درصد سطحی لغزشی پارامتر به درصد سطحی لغزشی متوسط منطقه و محاسبه لگاریتم نپر آن نسبت، به دست می‌آید. عدد حاصله را ارزش اطلاعاتی تراکم لغزش می‌نامند. بر اساس این روش مقدار وزن هر رده از عامل از رابطه ۲ به دست می‌آید.

1- Frequency Ratio
2-. Information Value

(رابطه ۲)

$$W_{inf} = Ln\left(\frac{Densclass}{Densmap}\right) = Ln\left(\frac{\frac{(N_{pix}(S_i))}{(N_{pix}(N_i))}}{\frac{(\sum N_{pix}(S_i))}{(\sum N_{pix}(N_i))}}\right)$$

که در آن W_{inf} وزن مربوط به یک رده از یک عامل، Densclass تراکم زمین لغزش در رده مشخص از یک عامل، Densmap تراکم زمین لغزش در کل محدوده، $N_{pix}(S_i)$ تعداد سلول‌ها یا مساحت زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در هر رده از عامل و $N_{pix}(N_i)$ تعداد سلول‌ها یا مساحت کل هر رده از عامل است. در مورد مقدار عددی وزن‌ها، هر چه عدد منفی‌تر باشد نشان‌دهنده تأثیر کم‌تر پارامتر مربوطه در رخداد زمین لغزش و عدد مثبت‌تر نشان‌دهنده بیش‌ترین تأثیر است *(پرتابیان و همکاران، ۱۳۹۶: ٤)*.

۲-۲-۲-۳- مدل آنتروپی شانون[1]

شانون (۱۹٤۸) با اصلاح اصل بولتزمن در دانش ترمودینامیک، مدل آنتروپی را در نظریه اطلاعات پایه‌گذاری کرد. آنتروپی روشی جهت اندازه‌گیری عدم قطعیت در منابع اطلاعات یک سیستم است که مقدار آن با درجه بی نظمی سیستم مرتبط است *(تیموری یانسری و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۹۱)*. این اندازه‌گیری می‌تواند برای تعیین ناهمگونی شاخص‌های ارزیابی یک هدف استفاده شود *(Yang, et al., 2018: 274)*. در مورد زمین لغزش‌ها با اندازه‌گیری تفاوت‌ها و تنوع در محیط، پتانسیل هر عامل در ایجاد زمین لغزش را نشان می‌دهد.

به عبارتی دیگر آنتروپی زمین لغزش‌ها به وسعت اثری که عوامل مختلف در ایجاد زمین لغزش دارند، اشاره می‌کند و هر چه شاخص آنتروپی بزرگ‌تر باشد اثر آن عامل در ایجاد زمین لغزش نیز بیشتر است *(Shadman Roodposhti, et al., 2016: 7)*. برای محاسبه ضریب اطلاعات W_j که نشان دهنده مقدار وزن عامل به طور کلی است، معادلات زیر استفاده می‌شود *(Naghibi, et al., 2015: 179)*.

(رابطه ۳)

$$E_{ij} = \frac{FR}{\sum_{j=1}^{M_j} FR}$$

FR نسبت فراوانی و E_{ij} چگالی احتمال و M_j تعداد رده‌هاست.

(رابطه ٤)

$$H_j = -\sum_{i=1}^{M_j} E_{ij}\log_2 E_{ij}\ ,\ j = 1,\dots,n$$

(رابطه ۵)

$$H_{j-max} = \log_2 M_j\ ,\ M_{j-number\ of\ classes}$$

(رابطه ٦)

$$I_j = \frac{H_{j-max} - H_j}{H_{j-max}}\ ,I = (0,1), j = 1,\dots,n$$

(رابطه ۷)

$$W_j = I_j FR$$

H_j و H_{j-max} مقادیر آنتروپی، I_j ضریب اطلاعات و W_j وزن عامل در کل را نشان می‌دهد.

۲-۲-۳- ایجاد و تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS

نقشه نهایی احتمال وقوع زمین لغزش به صورت رابطه ۸ تعریف می‌شود *(Youssef, et al., 2015: 128; Al-Abadi, 2017: 708; Jaafari, et al., 2014: 916)*

(رابطه ۸)

$$LPM = \sum_{j=1}^{n} \frac{Z}{M_j} \times C_j \times W_j$$

که LPM درجه ریسک وقوع زمین لغزش، Z تعداد رده عاملی که بیش‌ترین تعداد رده را دارد، تعداد رده عامل jام، C_j نقشه عامل jام که با توجه به نسبت فراوانی رده‌های آن باز طبقه‌بندی شده، W_j وزن هر عامل و n تعداد عوامل را نشان می‌دهد. نقشه نهایی احتمال وقوع زمین لغزش بر اساس مدل ارزش اطلاعات به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود *(Chen, et al., 2015: 1587)*.

(رابطه ۹)

$$LPM_2 = \sum_{j=1}^{n} I_j$$

1- Shannon Entropy

که LPM درجه ریسک وقوع زمین لغزش بر اساس مدل ارزش اطلاعات، I_j نقشه عامل jام که با توجه به ارزش اطلاعات رده‌های آن باز طبقه‌بندی شده و n تعداد عوامل را نشان می‌دهد.

۲-۲-٤- اعتبارسنجی

روش‌های مختلفی برای ارزیابی مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش پیشنهاد شده است. در این مطالعه برای اعتبارسنجی و ارزیابی نقشه‌های حاصل از اجرای دو مدل از شاخص احتمال تجربی استفاده شد *(صفاری و هاشمی، ۱۳۹۵: ٦۰؛ حسن زاده نفوتی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۱۱)*. بدین منظور از ۳۰ درصد (١٤ زمین‌لغزش) از داده‌های لغزشی اعتبارسنجی که به صورت تصادفی انتخاب شده بودند، استفاده شد. با استفاده از رابطه ۱۰ و بر مبنای محاسبه تعداد لغزش‌هایی که در هر طبقه از نقشه‌های دقت مدل تخمین زده شد.

(رابطه ۱۰)
$$p = \frac{ks}{s}$$

که در آن p احتمال تجربی، ks تعداد لغزش‌ها در رده‌های خطر متوسط به بالا و s تعداد کل لغزش‌های منطقه است. هر چه احتمال تجربی به یک نزدیک‌تر باشد، مدل برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش مناسب‌تر و دارای دقت بیشتری است.

۳- نتایج

نتایج حاصل از ارتباط مکانی بین زمین لغزش‌ها، عوامل مؤثر و میزان اثر هر یک از آن‌ها با استفاده روش‌های آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات در جدول ۱ ارائه شده است. اولویت بندی عوامل مؤثر با استفاده از مدل آنتروپی شانون نشان می‌دهد که سه عامل کاربری اراضی، ارتفاع و بارش به ترتیب بیشترین تأثیر را در وقوع لغزش‌های منطقه داشته‌اند. بعد از این سه عامل، عامل‌های شیب، فاصله از گسل (تقریباً برابر با شیب)، لیتولوژی و جهت شیب مؤثرترین متغیرها بوده‌اند. همچنین نتایج مدل ارزش اطلاعات نشان می‌دهد که از نظر لیتولوژی، رده (مارن، ماسه‌سنگ آهکی، سنگ آهک ماسه‌ای و کنگلومرای جزئی) با مقدار ارزش اطلاعات ۱ دارای بیش‌ترین احتمال رخداد زمین لغزش و رده‌های (گدازه‌های بازالتی) و (توف سبز و شیل‌های توفی) به ترتیب با مقادیر ارزش اطلاعات ۲/۰۳- و ۱/۷۰- دارای کم‌ترین احتمال رخداد زمین لغزش است. در معیار شیب تنها دو رده با شاخص مثبت وجود دارد که بیش‌ترین مقدار ارزش اطلاعات (۰/۹۳) در رده ۵-۱۲ درجه قرار دارد و بعد از آن رده ۱۲-۲۰ درجه قرار دارد. کم‌ترین مقدار برای رده شیب‌های بیش‌تر از ۳۰ درجه است. از این مشاهده به وضوح می‌توان نتیجه گرفت که شیب‌های بین ۵ تا ۲۰ درجه مستعدترین مناطق رخداد زمین لغزش هستند. نتایج معیار فاصله از گسل نشان می‌دهد که ارزش اطلاعات بیش‌ترین مقدار (۱/٦۷) را برای فاصله ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر از گسل‌ها داراست. در مورد کاربری اراضی، کاربری‌های باغی، کشاورزی و کشاورزی- باغی به ترتیب با مقادیر ۲/۱٦ و ۱/۵۹ و ۱/۱۱ بیش‌ترین مقادیر را دارند. از نظر بارش، میانگین بارش‌های سالیانه کم‌تر از ٤۰۰ میلی‌متر با مقدر ارزش اطلاعات ۱/۵۰ بیش‌ترین مقدار را به خود اختصاص داده است. در معیار جهت شیب، بیش‌تر زمین لغزش‌ها در جهت‌های جنوب غرب، جنوب و شرق قرار دارد. جهت شیب‌های شمال شرق، غرب و شمال غربی به ترتیب دارای کم‌ترین احتمال رخداد زمین لغزش هستند. از نظر ارتفاعی نیز با افزایش ارتفاع مقادیر ارزش اطلاعات رده‌ها کاهش پیدا می‌کند و بیش‌ترین مقدار مربوط به رده ارتفاعی کم‌تر از ۱۲۰۰ متر است.

پس از تعیین وزن معیارها و رده‌های آن‌ها اقدام به تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش برای مدل‌های آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات گردید. نقشه‌های پهنه‌بندی حاصله بر اساس روش طبقه‌بندی شکستگی‌های طبیعی به ۵ رده خطر خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم برای هر دو مدل تقسیم شد (نگاره ۳ قسمت الف و ب).

اعتبارسنجی نقشه به‌دست آمده از از مدل‌های آنتروپی

جدول ۱: ارتباط بین زمین لغزش‌ها و عوامل موثر آن‌ها با استفاده از مدل‌های آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات

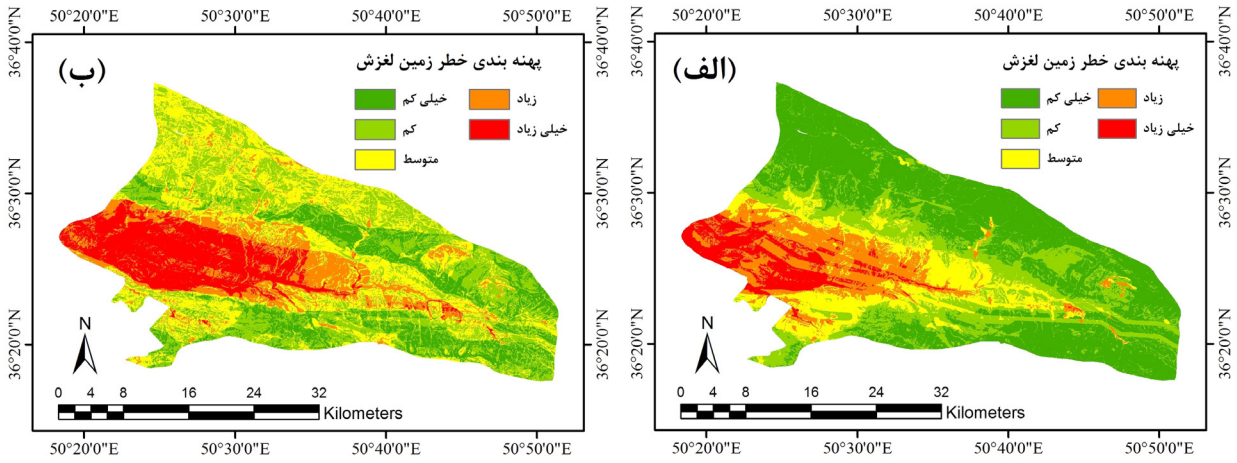
عامل	رده	زمین لغزش %	مساحت طبقه %	FR	E_{ij}	H_j	H_{j-max}	I_j	W_j	W_{inf}
لیتولوژی	Cb	۰	۱۸/۸۵	۰	۰	۰/۵۷	۳/۵۸	۰/۸٤	۰/۲۱	۰
	Ebv	۲/۸۵	۲۱/٦۷	۰/۱۳	۰/۰٤					-۲/۰۳
	Ek	۲/۸۵	۱۵/۷۱	۰/۱۸	۰/۰٦					-۱/۷۰
	Ekgy	۰	۱/۲۱	۰	۰					۰
	Kbv	۰	۰/۰٤	۰	۰					۰
	Ktzl	۰	۰/۱۲	۰	۰					۰
	Mm,s,l	۹٤/۲۸	۳٤/۷۹	۲/۷۱	۰/۹۰					۱
	Pgkc	۰	۱/٦۸	۰	۰					۰
	Pr	۰	۲/٤۸	۰	۰					۰
	Qabv	۰	۰/۵۲	۰	۰					۰
	TRJs	۰	۰/۹۹	۰	۰					۰
	TRe	۰	۱/۸۹	۰	۰					۰
شیب (درجه)	۵-۰	۰	۲/۷۸	۰	۰	۱/۵۲	۲/۳۲	۰/۳٤	۰/۳۷	۰
	۱۲-۵	۲۸/۵۷	۱۱/۲٦	۲/۵٤	۰/٤۷					۰/۹۳
	۲۰-۱۲	٤۵/۷۱	۲۱/۵۵	۲/۱۲	۰/۳۹					۰/۷۵
	۳۰-۲۰	۲۲/۸۵	۳٦/۳۱	۰/٦۳	۰/۱۲					-۰/٤٦
	>۳۰	۲/۸۵	۲۸/۰۹	۰/۱۰	۰/۰۲					-۲/۲۹
فاصله از گسل (متر)	۵۰۰-۰	۸/۵۷	۸/۵۷	۱	۰/۰۸	۲/۲٦	۲/۸۱	۰/۲۰	۰/۳۷	۰
	۱۰۰۰-۵۰۰	٤۵/۷۱	۸/۵۷	۵/۳۳	۰/٤۲					۱/٦۷
	۱۵۰۰-۱۰۰۰	۲۰	۷/۷۷	۲/۵۷	۰/۲۰					۰/۹۵
	۲۰۰۰-۱۵۰۰	۱۱/٤۲	٦/۷۹	۱/٦۸	۰/۱۳					۰/۵۲
	۲۵۰۰-۲۰۰۰	۵/۷۱	٦/۸۸	۰/۸۳	۰/۰٦					-۰/۱۹
	۳۰۰۰-۲۵۰۰	۸/۵۷	٦/۱۳	۱/٤۰	۰/۱۱					۰/۳٤
	>۳۰۰۰	۰	۵۵/۲٦	۰	۰					۰
کاربری اراضی	باغ	۸/۵۷	۰/۹۹	۸/٦۵	۰/٤۵	۱/۹۲	۳/٤٦	۰/٤۵	۰/۸۰	۲/۱٦
	بایر	۰	۰/٤٦	۰	۰					۰
	جنگلی	۰	۰/۲۷	۰	۰					۰
	دیم	۰	۰/۲٤	۰	۰					۰
	شهری	۰	۰/۰۱	۰	۰					۰
	صخره‌ای	۰	۰/۳٦	۰	۰					۰
	مرتع خوب	۰	۱/۸۰	۰	۰					۰
	مرتع متوسط	۳۱/٤۲	۷۲/۱۸	۰/٤۳	۰/۰۲					-۰/۸٤
	مرتع فقیر	٤۲/۸۵	۱۸/۳۱	۲/۳٤	۰/۱۲					۰/۸۵
	کشاورزی	۲/۸۵	۰/۵۸	٤/۹۱	۰/۲۵					۱/۵۹
	کشاورزی باغی	۱٤/۲۸	٤/٦۹	۳/۰٤	۰/۱٦					۱/۱۱

بارش (میلیمتر)	< ٤٠٠	٤٠	٨/٩٣	٤/٤٨	٠/٥٨	١/٥١	٢/٣٢	٠/٣٥	٠/٥٤	١/٥٠
	٥٠٠-٤٠٠	٤٠	١٩/٣٤	٢/٠٧	٠/٢٧					٠/٧٣
	٦٠٠-٥٠٠	٨/٥٧	٢٣/١٢	٠/٣٧	٠/٠٥					-٠/٩٩
	٧٠٠-٦٠٠	١١/٤٢	١٤/٦٦	٠/٧٨	٠/١٠					-٠/٢٥
	> ٧٠٠	٠	٣٣/٩٤	٠	٠					٠
جهت شیب	هموار	٠	٠	٠	٠	٢/٩٤	٣/١٧	٠/٠٧	٠/٠٦	٠
	شمال	١١/٤٢	١١/٤٣	١	٠/١٣					٠
	شمال شرق	٥/٧١	١١/٠٤	٠/٥٢	٠/٠٧					-٠/٦٦
	شرق	١١/٤٢	٩/٢٦	١/٢٣	٠/١٥					٠/٢١
	جنوب شرق	١١/٤٢	١١/٧١	٠/٩٨	٠/١٢					-٠/٠٢
	جنوب	١٧/١٤	١٣/٨٥	١/٢٤	٠/١٦					٠/٢١
	جنوب غرب	٢٢/٨٥	١٥/٩٢	١/٤٤	٠/١٨					٠/٣٦
	غرب	٨/٥٧	١٤/٢٢	٠/٦٠	٠/٠٨					-٠/٥١
	شمال غربی	١١/٤٢	١٢/٥٢	٠/٩١	٠/١١					-٠/٠٩
ارتفاع (متر)	< ١٢٠٠	١٤/٢٨	٢/٣٤	٦/١٠	٠/٤٩	١/٧٤	٢/٣٢	٠/٢٥	٠/٦٢	١/٨١
	١٥٠٠-١٢٠٠	٤٢/٨٥	١٢/٤٣	٣/٤٥	٠/٢٧					١/٢٤
	١٨٠٠-١٥٠٠	٢٨/٥٧	١٥/٦٠	١/٨٣	٠/١٥					٠/٦١
	٢١٠٠-١٨٠٠	١٤/٢٨	١٣/٠١	١/١٠	٠/٠٩					٠/٠٩
	> ٢١٠٠	٠	٥٦/٦٠	٠	٠					٠

شانون و ارزش اطلاعات، نشان داد که از ١٤ لغزشی که برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شده بود، در مدل آنتروپی شانون ٣ لغزش در پهنه خطر خیلی زیاد، ٧ لغزش در پهنه خطر زیاد، ٢ لغزش در پهنه خطر متوسط، ١ لغزش در پهنه خطر کم و ١ لغزش در پهنه با خطر خیلی کم و در مدل ارزش اطلاعات ٨ لغزش در پهنه خطر خیلی زیاد، ٤ لغزش در پهنه خطر زیاد، پهنه خطر متوسط بدون لغزش، ١ لغزش در پهنه خطر کم و ١ لغزش در پهنه با خطر خیلی کم قرار گرفته‌اند (جدول ٢). به این ترتیب شاخص احتمال تجربی مدل‌های آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات ٨٦٪ به دست آمد که بیانگر دقت خیلی خوب هر دو مدل در پیش‌بینی مناطق مستعد زمین لغزش است. همچنین شاخص احتمال تجربی با در نظر گرفتن تعداد لغزش‌ها صرفاً در رده‌های خطر زیاد و خیلی زیاد، مقدار ٧٢٪ برای مدل آنتروپی شانون و ٨٦٪ برای مدل ارزش اطلاعات به دست آمد که نشان دهنده قابلیت بهتر مدل ارزش اطلاعات است. برای مدل‌های آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات مجموع پهنه‌های خطر متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ٣٤٪ و ٥٦٪ از منطقه مورد مطالعه و مجموع پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ٢٠٪ و ٢٩٪ از منطقه مورد مطالعه را در برمی‌گیرد.

٤- بحث

نتایج حاصل از بررسی ارتباط هر یک از عوامل مؤثر با لغزش‌های منطقه نشان می‌دهد که در بخش‌های کم ارتفاع منطقه و بخش‌هایی که باغ‌ها و گسل‌های اصلی منطقه قرار دارند بیشترین احتمال وقوع زمین‌لغزش وجود دارد. باغ‌ها، اراضی با ارتفاع کمتر از ١٢٠٠ و در اراضی با فاصله ٥٠٠ تا ١٠٠٠ متری از گسل‌ها که به ترتیب نسبت‌های فراوانی ٨/٦٥، ٦/١٠ و ٥/٣٣ و ارزش‌های اطلاعات ٢/١٦، ١/٨١



نگاره ۳: نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر زمین لغزش: الف) مدل آنتروپی شانون، ب) مدل ارزش اطلاعات

جدول ۲: مساحت پهنه‌های خطر زمین لغزش و تعداد زمین لغزش مشاهده شده در مدل‌های آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات

مدل		آنتروپی شانون			ارزش اطلاعات		
ردیف	پهنه خطر	مساحت (کیلومتر مربع)	تعداد زمین لغزش	درصد وقوع زمین لغزش	مساحت (کیلومتر مربع)	تعداد زمین لغزش	درصد وقوع زمین لغزش
۱	خیلی کم	٤۰۱/۷۵	۱	۷	۱۲٤/۸۷	۱	۷
۲	کم	۲۰٤/۸۰	۱	۷	۲۷۸/۰۱	۱	۷
۳	متوسط	۱۳۱/۸۹	۲	۱٤	۲٥٤/۸۹	۰	۰
٤	زیاد	۱۱٦/٤٥	۷	٥۰	۱۲۳/٤٤	٤	۲۹
٥	خیلی زیاد	٦٦/۱۱	۳	۲۲	۱۳۹/۷۹	۸	٥۷
مجموع		۹۲۱	۱٤	۱۰۰	۹۲۱	۱٤	۱۰۰

و ۱/٦۷ را به دست آوردند، حساس‌ترین مناطق به وقوع لغزش‌های آینده هستند. اثر فعالیت‌های انسانی بر افزایش احتمال وقوع زمین‌لغزش در پژوهش‌های متعددی به اثبات رسیده است *(Tarantino et al., 2007)*. از این فعالیت‌ها می‌توان به فعالیت‌های باغداری و کشاورزی و همچنین ساخت جاده اشاره کرد *(Jaafari et al., 2017; Pham et al., 2019)*. به‌طور کلی، در منطقه رودبار الموت همراه با افزایش ارتفاع از حساسیت احتمال زمین‌لغزش کم می‌شود که این موضوع بیانگر کاهش دسترسی و دخالت‌های انسانی و همچنین افزایش مقاومت واحد زمین‌شناسی در مناطق مرتفع منطقه است. مدل آنتروپی شانون نیز نشان داد که عامل بارندگی یکی دیگر از عوامل مؤثر بر بروز زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه است. عامل بارندگی همواره به عنوان یکی از مهمترین عوامل شناسایی شده است *(Pham et al., 2018; Tien Bui et al., 2019)*.

نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی حساسیت بیانگر تمرکز طبقات حساسیت زیاد و بسیار زیاد در بخش میانی منطقه است که محل عبور دو گسل اصلی منطقه، باغ‌ها و مراتع فقیر هستند. حذف پوشش گیاهی از دیگر عواملی است که در کنار فعالیت گسل‌ها باعث بروز لغزش می‌شود *(Jaafari et al., 2014; Xiao et al., 2017)*.

اگرچه دو نقشه حاصل از دو مدل پراکنش تقریباً مشابهی

از طبقات مختلف خطر زمین‌لغزش ارائه دادند، اما ارزیابی دقت نقشه‌ها نشان داد که مدل ارزش اطلاعات عملکرد بهتری نسبت به مدل آنتروپی شانون داشته است. اگرچه پژوهش‌های مختلف نتایج اغلب متفاوتی را در مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف ارائه کرده‌اند، اما به نظر می‌رسد که عملکرد مدل‌ها کاملاً وابسته به کیفیت اطلاعات مورد استفاده و وسعت منطقه مورد مطالعه است (*Jaafari et al., 2017*). تفاوت عملکرد مدل‌ها در مناطق مختلف از مهمترین دلایل گسترش و ادامه یافتن تحقیقات مرتبط با مدل‌سازی زمین لغزش است (*Van Dao et al., 2020*).

۵- نتیجه‌گیری

زمین لغزش به عنوان یک بلای طبیعی شناخته شده است که هم از نظر تلفات جانی و هم از نظر خسارات مالی یکی از مهیب‌ترین مخاطرات طبیعی در جهان محسوب می‌شود. شرایط اجتماعی، اقتصادی، افزایش مهاجرت‌ها و تمایل مردم برای اسکان در مناطقی که دارای جذابیت‌های طبیعی و شرایط اقلیمی مناسب هستند، باعث شده است بخش زیادی از جمعیت جوامع انسانی در مناطقی ساکن شوند که درباره خطرات احتمالی این مناطق هیچ گونه اطلاعی ندارند. وقوع زمین لغزش‌های متعدد در مناطق مختلف کشور همواره خسارات فراوانی را در زمینه‌های مختلف به همراه داشته است. ازاین‌رو تهیه و تدوین یک طرح جامع و کامل در زمینه مدیریت زمین لغزش و شناسایی پهنه‌های در معرض خطر برای کاهش آسیب‌های ناشی از زمین لغزش و به حداقل رساندن خسارت و کنترل آن در محیط شهری و روستایی امری ضروری است.

در این پژوهش به منظور پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه رودبار الموت از دو مدل آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات استفاده شده است. ارزیابی صورت گرفته با استفاده از شاخص احتمال تجربی نشان می‌دهد که هر دو مدل، دارای روش‌های کارآمدی در برآورد خطر زمین لغزش در بخش رودبار الموت شرقی هستند با این حال مدل ارزش اطلاعات در برآورد مناطق با خطر بیشتر، موفق‌تر از مدل آنتروپی شانون عمل کرده است. با توجه به نقشه پهنه‌بندی لغزش، پهنه‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد اکثراً در غرب منطقه واقع شده‌اند. از آنجایی که مناطق با خطر زیاد تا بسیار زیاد وقوع زمین‌لغزش در باغ‌ها و مراتع فقیر و امتداد گسل‌های منطقه قرار دارند، باید فعالیت‌های انسانی با هدف ساخت و ساز و توسعه را در این مناطق محدود کرد.

٦- منابع و مآخذ

۱- اصغری کلجاهی، نمکچی، واعظی هیر؛ ابراهیم، فاطمه، عبدالرضا (۱۳۹۵). پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه غرب شهرستان خوی به روش آنبالاگان. جغرافیا و برنامه ریزی. ٥٦. ۱۹-۳۸

۲- پرتابیان، فتوحی، ریگی؛ عبدالرضا، صمد، حامد (۱۳۹٦). مقایسه کارایی پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعات و تراکم سطح در استان سیستان و بلوچستان. زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته. ٢٤. ۱- ۱۱

۳- تیموری یانسری، حسین زاده، کاویان، پورقاسمی؛ زینب، سیدرضا، عطاالله، حمیدرضا (۱۳۹٦). تعیین پهنه‌های حساس به وقوع لغزش با استفاده از روش آنتروپی شانون (مطالعه موردی: حوضه آبخیز چهاردانگه - استان مازندران). جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۸۳-۲۰٤

٤- جمالی، فلاحی؛ لقمان، غلامرضا (۱۳۹٦). پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبریز سیمینه رود بوکان با تلفیق مدل‌های آماری، فرایند تحلیل سلسله مراتبی و سامانه اطلاعات مکانی. علوم و فنون نقشه برداری. ۱۸۵-۱۹۹

۵- حسن‌زاده نفوتی، چابک بلداجی، ابراهیمی خوسفی؛ محمد، مسلم، زهره. (۱۳۹۱). پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش ارزیابی چندمعیاره مکانی (SMCE) (مطالعه موردی: حوضه آبخیز شلمانرود). پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱. ۹۹-۱۱٦

٦- خسرویان، انتظاری، کرمی، ابراهیمی؛ مریم، علیرضا، مختار، مجید (۱۳۹۵). مدل‌سازی عرصه‌های حساس به

وقوع زمین لغزش و شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع آن با استفاده از مدل آنتروپی شانون (مطالعه موردی: حوضه آبخیز بار نیشابور). علوم جغرافیایی. ۱۵-۳۲
۷- رجبی، خسروی؛ علی محمد، حسین (۱۳۹۵). مقایسه روش‌های ارزش اطلاعاتی و تحلیل سلسله مراتبی در پهنه بندی خطر زمین لغزش‌های ناشی از زلزله (مطالعه موردی). علوم و مهندسی زلزله. ٤. ۳۱- ٤۲
۸- رضایی مقدم، نیک جو، ولی زاده کامران، بلواسی، بلواسی؛ محمد حسین، محمدرضا، خلیل، ایمانعلی، مهدی (۱۳۹٦). کاربرد مدل شبکه عصبی مصنوعی در پهنه بندی خطر زمین لغزش. جغرافیا و برنامه ریزی. ۵۹. ۸۹-۱۱۱
۹- روستایی، علیزاده؛ شهرام، راحله (۱۳۹۱). پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه صوفی چای (مراغه) با استفاده از روش آنبلاگان. فضای جغرافیایی. ۳۹. ۱۷-۳۵
۱۰- زارع، احمدی، غلامی؛ محمد، حسن، شعبانعلی (۱۳۹۰). پهنه بندی و ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های عامل اطمینان، ارزش اطلاعات و تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز واز). علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۷. ۱۵- ۲۲
۱۱- زندی، امیراحمدی، محمدنیا؛ رحمان، ابوالقاسم، ملیحه (۱۳۹۷). استفاده از مدل آنتروپی در ارزیابی مخاطره زمین لغزش در مسیر جاده پیشنهادی طرقبه- درود (مشهد- نیشابور). جغرافیا و روابط انسانی. ۱(۲). ۳۷-۵۸
۱۲- شادفر، یمانی؛ صمد، مجتبی (۱۳۸٦). پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز جلیسان با استفاده ازمدل LNRF. پژوهش های جغرافیایی. ٦۲. ۱۱-۲۳
۱۳- شعبانی، جوادی، زارع خوش اقبال؛ عباد، محمدرضا، مریم (۱۳۹۳). پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش های ارزش اطلاعاتی و تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز شلمانرود). پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز. ۱۰. ۱۵۷- ۱٦۹
۱٤- شیرانی، سیف؛ کورش، عبدالله (۱۳۹۱). پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش های آماری (منطقه پیشکوه، شهرستان فریدون شهر). علوم زمین. ۸۵. ۱٤۹-۱۵۸
۱۵- صفاری، محمدی؛ امیر، زکیه (۱۳۹۲). بررسی عوامل مؤثر بر رخداد زمین لغزش در ایران بر پایه دیدگاه فرا تحلیل، دومین کنفرانس بین‌المللی مخاطرات محیطی، تهران، دانشگاه خوارزمی
۱٦- صفاری، هاشمی؛ امیر، معصومه (۱۳۹۵). پهنه بندی حساسیت وقوع زمین لغزش با مدل‌های آنتروپی و منطق فازی (مطالعه موردی: شهرستان کرمانشاه). جغرافیای طبیعی. ٤۳-٦۲
۱۷- طولابی، عابدینی؛ سوسن، موسی (۱۳۹۵). پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش حوضه نوژیان با مدل های همپوشانی فازی و AHP. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۹۳-۱۰۳
۱۸- عرب عامری، رضایی، شیرانی، یمانی؛ علیرضا، خلیل، کورش، مجتبی (۱۳۹۷). تعیین عرصه‌های حساس به لغزش با استفاده از روش ترکیبی نوین آنتروپی شانون- ارزش اطلاعات (مطالعه موردی: حوضه سرخون کارون). پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز. ۹ (۱۷). ۱۳۲-۱٤٤
۱۹- کامران زاد، محصل افشار، مجرب، معماریان؛ فرناز، عماد، مسعود، حسین (۱۳۹٤). پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در استان تهران با استفاده از روش های داده محور و تحلیل سلسله مراتبی. علوم زمین. ۹۷. ۱۰۱-۱۱٤
۲۰- متولی، حسین زاده، جمشیدی صالح؛ صدرالدین، محمد مهدی، زهرا (۱۳۹۱). پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه شلمانرود گیلان به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP). ٤. ۷۵-۹۲
۲۱- مقیمی، باقری سید شکری، صفرراد؛ ابراهیم، سجاد، طاهر (۱۳۹۱). پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل آنتروپی (مطالعه‌ی موردی: تاقدیس نسار زاگرس شمال‌غربی). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ٤٤(۱)، ۷۷-۹۰
۲۲- منصوری، شیرانی، قاضی فرد، امامی؛ معصومه، کورش، اکبر، سید نعیم (۱۳۹۵). پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به روش‌های آنتروپی و وزن شاهد (مطالعه موردی: منطقه

دوآب صمصامی استان چهارمحال و بختیاری). علوم زمین. ۲۶۷-۲۸۰

۲۳- نصر آزادانی، قاضی‌فرد، شیرانی، صفایی؛ احمد، اکبر، کورش، همایون (۱۳۹۲). ارزیابی مدل‌های پهنه‌بندی آماری دومتغیره زمین‌لغزش، با استفاده از GIS در حوضه آبخیز دز علیا. مهندسی فناوری اطلاعات مکانی. ۱. ۶۵- ۸۰

24- Al-Abadi, A. M. (2017). Modeling of groundwater productivity in northeastern Wasit Governorate, Iraq using frequency ratio and Shannon's entropy models. Applied Water Science, 7(2), 699-716.

25- Chen, Y., Ba, Q., Wu, Q., & Li, X. (2015, December). Landslide susceptibility evaluation based on GIS and information value model. In 2015 4th National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering. Atlantis Press.

26- Jaafari, A., Najafi, A., Pourghasemi, H. R., Rezaeian, J., & Sattarian, A. (2014). GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. International Journal of Environmental Science and Technology, 11(4), 909-926.

27- Naghibi, S. A., Pourghasemi, H. R., Pourtaghi, Z. S., & Rezaei, A. (2015). Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran. Earth Science Informatics, 8(1), 171-186.

28- Shadman Roodposhti, M., Aryal, J., Shahabi, H., & Safarrad, T. (2016). Fuzzy shannon entropy: a hybrid GIS-based landslide susceptibility mapping method. Entropy, 18(10), 343.

29- Shannon, C. E. (1948). A note on the concept of entropy. Bell System Tech. J, 27(3), 379-423.

30- Yang, W., Xu, K., Lian, J., Ma, C., & Bin, L. (2018). Integrated flood vulnerability assessment approach based on TOPSIS and Shannon entropy methods. Ecological Indicators, 89, 269-280.

31- Yin, K. L. & Yan, T. Z. (1988). Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland, v.2, pp.1269–1272

32- Youssef, A. M., Al-Kathery, M., & Pradhan, B. (2015). Landslide susceptibility mapping at Al-Hasher area, Jizan (Saudi Arabia) using GIS-based frequency ratio and index of entropy models. Geosciences Journal, 19(1), 113-134.

33- Zhao, H., Yao, L., Mei, G., Liu, T., & Ning, Y. (2017). A Fuzzy Comprehensive Evaluation Method Based on AHP and Entropy for a Landslide Susceptibility Map. Entropy, 19(8), 396.