

## پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه بالادست سد یامچی استان اردبیل، با استفاده از روش‌های تصمیم- گیری چند معیاره MARCOS و CODAS

عقیل مددی\* - استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.  
الناز پیروزی - دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۱۴      تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۳/۲۸

### چکیده

زمین لغزش در زمره پرخطرترین و زیان‌بارترین مخاطرات محیطی است که در دهه‌های اخیر شتاب فزاینده‌ای یافته است. لذا، با توجه به اهمیت موضوع؛ پژوهش حاضر با هدف پهنه‌بندی خطر زمین-لغزش در حوضه بالادست سد یامچی استان اردبیل، با استفاده از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره MARCOS و CODAS صورت گرفته است. در این راستا، ده لایه‌ی موضوعی شامل؛ پارامترهای ارتفاع، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، خاک، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه و بارش به عنوان متغیرهای تأثیرگذار، بررسی شدند. ابتدا، لایه‌های اطلاعاتی معیارها، در GIS تهیه گردید. ارزش‌گذاری و استانداردسازی لایه‌ها، با استفاده از تابع عضویت فازی و وزن‌دهی معیارها، با بهره‌گیری از روش CRITIC انجام گردید. تحلیل و مدل‌سازی نهایی، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره MARCOS و CODAS صورت گرفت. نتایج مطالعه نشان داد، به ترتیب؛ عوامل شیب، کاربری اراضی و لیتولوژی، به ترتیب با ضریب وزنی ۰/۱۴، ۰/۱۳ و ۰/۱۲، در وقوع زمین‌لغزش حوضه، بیشترین وزن و اهمیت را دارند. با توجه به خروجی حاصل از روش CODAS، به ترتیب؛ ۱۳۹/۴۶ و ۵۸/۱۷ کیلومترمربع از مساحت حوضه و طبق نتایج حاصل از به کارگیری روش MARCOS، ۱۱۴/۰۱ و ۵۴/۰۷ کیلومترمربع از مساحت محدوده، در طبقه‌ی پرخطر و بسیار پرخطر قرار دارد. طبق نتایج به دست آمده از صحت‌سنجی با استفاده از روش منحنی ROC، دقت روش CODAS، با مساحت زیر منحنی ۰/۷۲، خیلی خوب است و دقت روش MARCOS، با مساحت زیر منحنی ۰/۸۱، عالی می‌باشد. نتایج حاصل از پژوهش حاضر، با معرفی مناطق دارای احتمال وقوع بالای زمین‌لغزش، می‌تواند راه‌گشایی برای اعمال مدیریت بهتر و علمی‌تر مدیران و برنامه‌ریزان ذی‌صلاح در این زمینه گردد.

واژگان کلیدی: حرکت دامنه‌ای، مخاطره، GIS AUC

## مقدمه

مخاطرت محیطی همواره از مهم‌ترین موضوعات مطرح در جوامع به شمار می‌آید (پورطاهر و همکاران، ۱۳۹۰:۳۱). مخاطرت ژئومورفولوژیکی به عنوان یکی از مخاطرت محیطی محسوب می‌شود که خود دارای انواع مختلفی است (ملکی و همکاران، ۱۳۹۴:۱۶۲). زمین‌لغزش یکی از فرآیندهای ژئومورفولوژیکی تأثیرگذار بر تکامل چشم‌اندازها در نواحی کوهستانی است (روئرینگ و همکاران، ۲۰۰۵: ۶۵۵؛ هاتانجی و موریواسکی، ۲۰۰۹:۴۴۸). زمین‌لغزش‌ها در بین بزرگترین بلایا و سوانح طبیعی، رده هفتم را از نظر تلفات جانی به خود اختصاص داده است و بالغ بر ۱۷ درصد تلفات جانی حاصل از بلایای طبیعی را شامل می‌شود (علی‌محمدلو، ۲۰۱۳:۲۲۰). زمین‌لغزش شامل حرکت تند یا کند مواد سنگی، خاکی یا مجموع هر دو، روی دامنه به سمت پایین تحت تأثیر نیروی جاذبه است (کروستا، ۲۰۰۹:۲). تلفات عظیم زمین‌لغزش، ناشی از عوامل طبیعی و عوامل فعال خارجی می‌باشد. از عوامل طبیعی دخیل در وقوع زمین‌لغزش می‌توان به زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی یا نوع خاک، ویژگی انسجام ساختاری، مقاومت برشی مواد، شرایط آب‌های زیرزمینی و اثر آن)، هندسه شیب (شیب، جهت، ارتفاع و انحنا) و زمین یا پوشش زمین اشاره داشت. بارندگی، لرزه‌خیزی و فعالیت‌های انسانی (فعالیت‌های ساختمانی و آماده‌سازی خاک برای کشاورزی در مناطق کوهستانی)، از عوامل خارجی موثر در ایجاد لغزش زمین می‌باشند (سربی و فرخ‌نیا، ۲۰۱۸:۲۰۶). توجه به اینکه، زمین‌لغزش‌ها یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی هستند و باعث ایجاد تغییرات شدید در مورفولوژی منظره و آسیب به سازه‌های طبیعی و مصنوعی روی زمین می‌شوند (تانیاس و لومبارو، ۲۰۱۹). شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش و تولید نقشه‌های دقیق منطقه‌بندی حساسیت به زمین‌لغزش از موضوعات مهم برای مطالعات مدیریت خطر می‌باشد و به منظور کاهش بلایای زمین‌لغزش حیاتی است (کلکسن و همکاران، ۲۰۱۶:۵۴؛ رابی و همکاران، ۲۰۲۲:۱).

در سال‌های اخیر، به منظور انواع مخاطرت محیطی و به ویژه زمین‌لغزش‌ها و برای کشف طیف وسیعی از گزینه‌ها از نظر درگیری‌های عینی و معیارهای چندگانه، از روش MCDM<sup>۱</sup> استفاده می‌شود (أهر و همکاران، ۲۰۱۳:۱۳). در این روش‌های تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی مدل، از معیارهای مختلفی برای افزایش صحت تصمیمات استفاده می‌شود (جورجیو و همکاران، ۲۰۱۵:۴۶۱؛ عرب عامری و همکاران، ۲۰۱۸:۶۱۴). مطالعات متعددی در نقاط مختلف جهان انجام شده و توانایی تحلیل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، برای ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش نشان داده است. به عنوان مثال؛ مددی و همکاران (۱۳۹۷)، با استفاده از مدل الکترا<sup>۲</sup>، به عنوان یکی از روش‌های تحلیل چند معیاره، خطر زمین‌لغزش را در حوضه‌ی آبخیز آق‌لاقان‌چای پهنه‌بندی کردند. با توجه به نتایج مطالعه، زیر حوضه‌ی نیر و ایرنجی با شیب‌های ۱۵-۳۰ درصد، با زیربنای سنگ سخت به همراه مواد رسوبی و سست سطحی، به ترتیب از پتانسیل بیش‌تری جهت وقوع زمین‌لغزش برخوردارند. همچنین در این مطالعه، مطلوبیت عملکرد الکترا، مورد تأیید قرار گرفته است. انتظاری و همکاران (۱۳۹۸)، با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و مدل ویکور، به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در استان

1. Roerin et al

2. Hattanji and Moriwaki

3. Alimohammadlou et al

4. Crosta

5. Sorbi and Farrokhnia

6. Tanyas and Lombardo

7. Colkesen et al

8. Rabby et al

9. Multi-criteria decision making

10. Aher et al

11. Georgiou et al

12. Arab Ameri et al

13. Electre

البرز پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد معیارهای شیب، طبقات ارتفاعی، کاربری اراضی، لیتولوژی، خاک و بارش دارای اثر افزایشنده و معیارهای فاصله از گسل و پوشش گیاهی دارای اثر کاهشنده در آسیب‌پذیری محدوده در برابر زمین‌لغزش هستند و ۳۳/۰۹ درصد از سطح استان در طبقه با خطر زیاد قرار دارد. به علاوه با توجه به نتایج مطالعه، کارایی روش‌های تحلیل چند معیاره، مورد تأیید قرار گرفت. مددی و همکاران (۱۳۹۹)، به ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره MABAC و CODAS، در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شهرستان کوثر (استان اردبیل)، پرداختند. با توجه به نتایج مطالعه، به ترتیب عوامل شیب، کاربری اراضی، خاک و لیتولوژی، بیشترین ضریب وزنی را به خود اختصاص دادند. با توجه به خروجی روش MABAC به ترتیب ۱۷/۸۹ و ۲۵/۲۲ درصد و طبق نتایج حاصل از مدل CODAS، به ترتیب ۹/۰۷ و ۲۲/۱۸ درصد از مساحت محدوده، در طبقات بسیار پرخطر و پرخطر می‌باشند. نتایج اعتبارسنجی نشان داد، دقت روش ماباک در طبقه‌ی خوب و دقت روش کوداس در طبقه‌ی خیلی خوب قرار دارد. نادری و همکاران (۱۴۰۰)، به بررسی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز سد گلال استان ایلام با استفاده از مدل VIKOR، پرداختند. طبق نتایج به دست آمده، معیارهای زمین‌شناسی، شیب و بارش بیشترین ضریب اهمیت را کسب کردند و زیر حوضه‌های بان سوهان، پلکانه و حاجی بختیار بیشترین حساسیت‌پذیری را دارند. به علاوه از انطباق نقشه‌های پهنه‌بندی و زمین‌لغزش‌های منطقه، صحت نقشه حاصله و کارایی مدل ویکور مورد تأیید قرار گرفته است. اصغری سراسکانرود و پیروزی (۱۴۰۱)، در مطالعه‌ای به ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره OWA، WLC، VIKOR و MABAC در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه گیوی‌چای پرداختند و با توجه به خروجی حاصل از الگوریتم‌های مورد مطالعه، پهنه‌های با خطر متوسط، زیاد و خیلی زیاد بیشترین مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. به علاوه، مقایسه مدل‌ها نسبت به یکدیگر، با توجه به نتایج حاصل از منحنی ROC، نشان داد، دقت روش‌های OWA، WLC و MABAC خیلی خوب و دقت روش VIKOR، در طبقه‌ی عالی قرار دارد و نتایج مطالعه، عملکرد خوب مدل‌های تحلیل چند معیاره را برای تولید خطر زمین‌لغزش، نشان می‌دهد. میشیل و سامانتا (۲۰۱۶)، به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری رانش زمین در استان سیمبو، پاپوا گینه نو از روش WLC استفاده کردند. با توجه به نتایج حاصله، به ترتیب ۲۶/۸۸ و ۱۴/۴۱ درصد از پوشش منطقه در کلاس پرخطر و بسیار پرخطر قرار دارد و با توجه به نقاط لغزشی موجود، کلاس‌های خطر به دست آمده از مدل WLC دقیق می‌باشد. جیگووایس و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۹)، با استفاده از روش‌های WLC و OWA، در قسمت غربی جمهوری صربستان خطر زمین‌لغزش را بررسی کردند. با توجه به نتایج مطالعه، تجزیه و تحلیل چند معیاره دارای دقت بسیار بالایی هستند و به ترتیب؛ ۷۷۶/۳ کیلومتر مربع (۱۵ درصد)، ۱۱۲۶ کیلومتر مربع (۲۱/۸ درصد) از محدوده، در طبقه بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد. دیکشیت و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۲۰)، ارزیابی خطر زمین‌لغزش در Phuentsholing، بوتان را با بهره‌گیری از روش WLC مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه نشان داده که، ۱۱/۷ درصد از منطقه در رده خطر بالا قرار دارد و عوامل زمین‌شناسی، شیب و بارندگی بیشترین اهمیت را در زمین‌لغزش‌های منطقه دارند. به علاوه، طبق نتایج حاصله، کارایی روش WLC، با توجه به رخدادهای زمین‌لغزش در سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴، مورد تأیید قرار گرفت. صالح‌پور و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۲۱)، با هدف ارزیابی عملکرد مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره TOPSIS، LIM و VIKOR، حساسیت زمین‌لغزش در حوزه آبخیز الموت ایران را مورد مطالعه قرار دادند. با توجه به نتایج مطالعه، مساحت زیر منحنی ROC برای TOPSIS، LIM و VIKOR به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۸۵ و ۰/۸۴ محاسبه شد. بنابراین، دقت مدل‌های MCDM برای مدل TOPSIS، قابل قبول و برای IIM و VIKOR عالی است. همچنین طبق نتایج حاصل از این مطالعه بیان شده است که با توجه به وجود مناطق با پتانسیل بالا و بسیار بالا، مدیریت ریسک زمین‌لغزش

1. Michael and Samanta

2. Gigovic et al

3. Dikshit et al

4. Salehpour et al

در این حوضه بسیار مهم است و به طور کلی، نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌های MCDM، عملکرد خوب مدل‌ها را برای تولید خطر زمین‌لغزش، نشان می‌دهد.

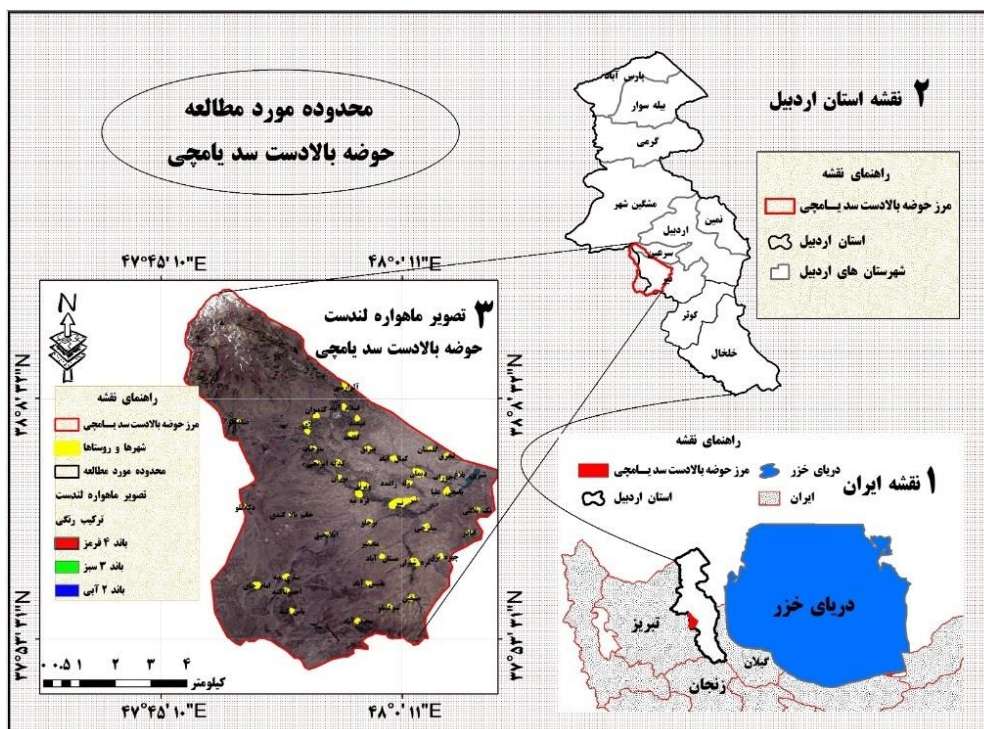
حوضه‌ی بالادست سد یامچی استان اردبیل از حوضه‌های شمال غرب ایران می‌باشد، با توجه به اینکه بخش اعظمی از مساحت حوضه، کوهستانی و پر شیب است و در مناطق زیادی با بریدگی شیب توسط جاده و رودخانه مواجه شده است و نیز اغلب کاربری اراضی به صورت زمین‌های کشاورزی، مراتع و باغات می‌باشد که به دلیل استفاده غیراصولی و بی‌رویه از اراضی (به ویژه زراعی)، پتانسیل وقوع زمین‌لغزش حوضه زیاد می‌باشد و این فرآیند در کنار وقوع طغیان‌های رودخانه، باعث کاهش عمر مفید سد یامچی و کانال‌های واقع بر روی این رودخانه می‌گردد. لذا در مطالعه‌ی حاضر پتانسیل زمین‌لغزش حوضه‌ی بالادست سد یامچی با استفاده از الگوریتم‌های تحلیل چند معیاره مد نظر قرار گرفته است، تا با شناسایی مناطق اولویت‌دار از نظر خطر زمین‌لغزش، اقدامات لازم جهت کنترل زمین‌لغزش حوضه، برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه از منابع و استراتژی‌های مدیریت پایدار زمین به عمل آید. به علاوه، نتایج حاصل از این پژوهش، با معرفی بهترین روش تحلیل چند معیاره، می‌تواند در زمینه انتخاب روش مناسب بررسی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، در حوضه‌هایی با شرایط طبیعی و انسانی مشابه با محدوده حوضه‌ی بالادست سد یامچی، بسیار مفید بوده و مورد توجه قرار گیرد.

#### منطقه مورد مطالعه

این حوضه با مساحت ۶۹۸ کیلومتر مربع بین مدارهای ۳۷ درجه و ۵۱ دقیقه و ۳۸ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه و ۲۴ ثانیه‌ی شمالی و نصف‌النهارهای ۴۷ درجه و ۶۴ دقیقه و ۳۵ ثانیه و ۴۸ درجه و ۶ دقیقه و ۱۵ ثانیه‌ی شرقی واقع شده است (شکل ۱). این حوضه بین توده‌ی آتشفشانی سبلان در شمال و کوه‌های یزغوش در جنوب غربی قرار گرفته است که بلندترین نقطه‌ی حوضه، قله‌ی هرم کوه با حداکثر ارتفاع ۴۵۰۵ متر از سطح دریا و حداقل ارتفاع، ۱۵۰۶ متر در محل سد یامچی می‌باشد. زهکش اصلی این حوضه از جنوب غربی به شمال شرقی جریان دارد و شاخه‌ای از شبکه‌ی زهکشی رودخانه‌ی قره سو می‌باشد که خود آن نیز جزیی از سیستم رود ارس محسوب می‌گردد. حوضه آق‌لاقان‌چای، قره‌شیران، کمال‌آبادچای و امام‌چای، واحدهای هیدرولوژیکی حوضه بالادست یامچی می‌باشد. شهرستان نیر مهم‌ترین مرکز استقرار جمعیت انسانی در این حوضه بوده که در منتهی‌الیه شرقی این حوضه واقع شده است. با استفاده از طبقه‌بندی دومارتن اقلیم منطقه از نوع نیمه‌خشک و با توجه به ضریب اقلیمی آمبرژه از نوع نیمه‌خشک خیلی سرد می‌باشد. مهم‌ترین عامل محلی مؤثر در اقلیم منطقه، وجود ارتفاعات سبلان در منطقه می‌باشد و افزایش مقدار بارش و کاهش میزان درجه حرارت نسبت به نواحی مجاور از تأثیرات توپوگرافی سبلان در حوضه، می‌باشد. از نظر آب و هوایی، در زمستان آب و هوای سرد و در تابستان آب و هوای نسبتاً معتدلی را دارا می‌باشد.

از نظر زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه در زون زمین‌ساختی البرز غربی - آذربایجان قرار دارد. واحدهای مختلف سنگ-شناسی منطقه به صورت آتشفشانی و رسوبی گسترده شده است. جریان‌های گدازه‌ای بر جای مانده از فعالیت‌های آتشفشانی دوره‌ی ائوسن در منتهی‌الیه جنوب غربی حوضه، قدیمی‌ترین و رسوبات آبرفتی جدید  $Q^2$  که بر روی پادگان‌های قدیمی قرار گرفته‌اند (شامل؛ مواد ریزدانه‌ای مانند رس، سیلت و آهک‌های آب شیرین)، جدیدترین سازندهای زمین‌شناسی، حوضه می‌باشد. همچنین شایان ذکر می‌باشد، سد یامچی در ۵ کیلومتری شهر نیر و در حوضه مورد مطالعه قرار گرفته است. حجم آب ذخیره شده در این سد ۹۵ میلیون مترمکعب می‌باشد و از آب این سد برای تامین آب شرب شهر اردبیل و آبیاری اراضی پائین دست سد استفاده می‌شود. حوضه بالادست سد یامچی بسیار مستعد وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. برای مثال، در بخشی از بالادست سد یامچی، در مسیر جاده‌ی نیر-سراب در ۱۶ خرداد سال ۱۳۸۵ زمین‌لغزشی به وقوع پیوست و در نتیجه‌ی این زمین‌لغزش، ۶۰۰ متر از جاده‌ی اصلی و ترانزیتی این منطقه همراه توده، لغزش یافت و به طور کامل تخریب

شد و سبب کشته شدن یک نفر و بروز خسارات مالی هنگفت گردید (مددی، ۱۳۸۹: ۷۷؛ وثیق، ۱۳۹۰: ۲۱). نمونه‌هایی از زمین‌لغزش‌ها رخ داده در سطح حوضه در شکل ۲، نمایش داده شده است.



شکل ۱: نقشه موقعیت حوضه بالادست سد یامچی در کشور ایران و استان اردبیل



شکل ۲: نمونه‌هایی از زمین‌لغزش‌های رخ داده در سطح حوضه بالادست سد یامچی

## مواد و روش‌ها

### داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده

پژوهش حاضر از نوع کاربردی بوده و روش تحقیق آن تحلیلی مبتنی بر تلفیق آنالیز داده‌ها، سیستم اطلاعات جغرافیایی و استفاده از فنون تحلیل چند معیاره است. جهت پردازش تصاویر و تجزیه و تحلیل داده‌ها نیز از نرم‌افزارهای ENVI, Arc GIS, Idrisi, Ecognition, و Excel، بهره‌گیری شده است. جهت بررسی خطر زمین‌لغزش، در مرحله جمع‌آوری داده‌ها، ابتدا باید مؤلفه‌های تأثیرگذار مشخص شده و بر مبنای آن‌ها داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز گردآوری و طبقه‌بندی

شوند. بدین منظور، در این مطالعه، ابتدا عوامل مؤثر (شامل: شیب، جهت شیب، ارتفاع، لیتولوژی، خاک، کاربری اراضی، بارش، فاصله از راه ارتباطی، فاصله از آبراهه و فاصله از گسل)، با توجه به شرایط طبیعی و انسانی منطقه شناسایی گردید. در مرحله بعد لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل، در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. لایه‌های اطلاعاتی راه‌های ارتباطی و شبکه آبراهه، با استفاده از نقشه‌ی خطوط ارتباطی و رودخانه‌های استان اردبیل، تهیه گردید. لایه‌های شیب و جهت شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر، دانلود شده از سایت (vertex.daac.asf.alaska.edu)، به ترتیب با استفاده از دستورهای slope و aspect در Arc map تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی مربوط به لیتولوژی (مقاومت سنگ‌ها) و گسل‌ها، با رقومی‌سازی از روی نقشه زمین‌شناسی اردبیل و مشکین‌شهر؛ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. برای استخراج کاربری اراضی محدوده‌ی مورد مطالعه، از تصاویر سنجنده لندست هشت، سنجنده OLI به شماره گذر ۱۶۷ و ردیف ۳۴، تاریخ ۲۰۲۱/۸/۱۴، اخذ شده از سایت (earthexplorer.usgs.gov)، استفاده شده است. در این راستا، ابتدا تصحیحات هندسی و اتمسفری بر روی تصاویر با استفاده از روش Flaash، در نرم‌افزار Envi، انجام شد. سپس طبقه‌بندی با روش شیء‌گرا و الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی در نرم‌افزار Ecognition Developer، صورت گرفت و نتایج حاصله از طبقه‌بندی کاربری‌ها در مطالعه‌ی حاضر، چه از نظر تک‌تک کاربری‌ها و چه از نظر مجموع صحت و آمار کاپا، از صحت قابل قبولی (بزرگ‌تر از ۸۵ درصد)، در ارتباط با اطلاعات تولیدشده برخوردار می‌باشد. نقشه بارش حوضه نیز، با توجه به داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی و با بهره‌گیری از معادله گرادیان بارش (P:0.227H-85.04)، ترسیم شد. بدین صورت که در نرم افزار Arc map، با استفاده از دستور Calculator، نقشه طبقات ارتفاعی جایگزین مولفه H شده و سپس نقشه بارش استخراج گردید.

### مراحل تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش کوداس (CODAS)<sup>۱</sup>

۱- تعیین معیارها و گزینه‌های پژوهش: اولین گام در این روش تعیین عوامل و گزینه‌های پژوهش است. ۲- دومین گام در این روش تشکیل ماتریس تصمیم است. در ماتریس تصمیم روش کوداس معیارهای آن ستون‌ها و سطرهای آن گزینه‌های پژوهش هستند. ۳- سومین گام استانداردسازی ماتریس تصمیم می‌باشد که در این مطالعه، استانداردسازی و ارزش‌گذاری به صورت توأم با استفاده از روش فازی انجام شده است. ۴- تشکیل ماتریس نرمال وزن‌دار: باید وزن معیارها را در ماتریس نرمال ضرب کرد. در این پژوهش جهت وزن‌دار کردن ماتریس نرمال، از روش CRITIC استفاده شده است. ۵- محاسبه فواصل اقلیدسی (Euclidean distance) و تاکسی (Taxicab distances) از ایده آل منفی: این فواصل از روابط ۱ و ۲، بدست می‌آیند. در این روابط ns ایده آل منفی معیارها است.

$$E_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (r_{ij} - ns_j)^2} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$T_i = \sum_{j=1}^m |r_{ij} - ns_j| \quad \text{رابطه ۲}$$

۶- ایجاد ماتریس ارزیابی نسبی: در این گام باید ماتریس ارزیابی نسبی را با استفاده از رابطه ۳، ایجاد شود که در این رابطه،  $\Psi$  نشان‌دهنده یک تابع آستانه برای تشخیص برابری فاصله اقلیدسی دو گزینه است.

$$h_{iK} = (E_i - E_k) + (\psi(E_i - E_k) \times (T_i - T_k)) \quad \text{رابطه ۳}$$

۷- در این گام با جمع مقادیر  $h_{iK}$  گزینه‌ها، می‌توان آن‌ها را رتبه‌بندی نمود هر چه مقدار  $H_i$  بزرگتر باشد گزینه رتبه بهتری دارد (متیو و ساهو<sup>۲</sup>، ۲۰۱۸: ۱۴۰-۱۴۱).

<sup>1</sup>. Combinative Distance-based Assessment

<sup>2</sup>. Mathew and Sahu

### مراحل تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش مارکوس (MARCOS)<sup>۱</sup>

۱- تعیین معیارها و گزینه‌های پژوهش: اولین گام در این روش تعیین عوامل و گزینه‌های پژوهش است. ۲- تشکیل ماتریس تصمیم: ماتریس تصمیم در این روش نیز به صورت معیار-گزینه است. یعنی یک ماتریسی که ستون‌های آن را معیارهای مساله و سطرها را گزینه‌ها تشکیل می‌دهند و هر سلول نیز در واقع امتیاز هر گزینه نسبت به هر معیار است. ۳- تعیین ایده آل و ضد ایده آل: در این بخش بر اساس روابط ۴ و ۵، مقادیر ایده آل (AI) و ضد ایده آل (AAI) مشخص می‌شود. در روابط زیر، عبارت B به معنی معیارهایی که جنبه سود و عبارت C به معنی معیارهای که جنبه هزینه دارند.

$$AI = \max x_{ij} \text{ if } j \in B \text{ and } \min x_{ij} \text{ if } j \in C \quad \text{رابطه ۴}$$

$$AAI = \min x_{ij} \text{ if } j \in B \text{ and } \max x_{ij} \text{ if } j \in C \quad \text{رابطه ۵}$$

۴- نرمال کردن ماتریس تصمیم یا استانداردسازی: در پژوهش حاضر، جهت دستیابی به الگوی پهنه‌بندی مکانی خطر زمین‌لغزش، مرحله استانداردسازی، با توجه به تابع عضویت فازی صورت پذیرفت. ۵- وزن دار کردن ماتریس نرمال: در این پژوهش، جهت وزن‌دهی عوامل از روش CRITIC استفاده شده است. ۶- محاسبه مطلوبیت هر گزینه: در این مرحله، بر اساس روابط ۶ و ۷، درجه مطلوبیت ایده آل  $K^+$  و ضد ایده آل  $K^-$  گزینه‌ها محاسبه می‌شود.

$$K_{i+} = \frac{S_i}{S_{ai}} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$K_{i-} = \frac{S_i}{S_{aai}} \quad \text{رابطه ۷}$$

در روابط فوق،  $S_i = (i=1,2,3,...,m)$  جمع مقایر هر سطر در ماتریس وزن دار می‌باشد که از رابطه ۸، بدست می‌آید.

$$S_i = \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad \text{رابطه ۸}$$

۷- تعیین عملکرد نهایی و رتبه‌بندی گزینه‌ها: در این بخش با استفاده از رابطه ۹، عملکرد مطلوب هر گزینه محاسبه می‌شود.

$$f(k_i) = \frac{k_i^+ + k_i^-}{1 + \frac{1-f(k_i^+)}{f(k_i^+)} + \frac{1-f(k_i^-)}{f(k_i^-)}} \quad \text{رابطه ۹}$$

در رابطه فوق‌الذکر  $f(k^-)$ ، عملکرد مطلوبیت ضد ایده آل و  $f(k^+)$  عملکرد مطلوب ایده آل برای هر گزینه می‌باشد که از روابط ۱۰ و ۱۱، محاسبه می‌شود. سپس بر اساس اعداد بدست آمده از  $f(k)$ ، هر گزینه رتبه‌بندی انجام می‌شود. هر کدام از گزینه‌ها مقدار  $f(k)$  بزرگتری داشت رتبه بهتری دارد (جهانگیری، ۱۳۹۹: ۲۳۹؛ جهانگیری، ۱۴۰۰: ۶).

$$f(k_i^-) = \frac{k_i^+}{k_i^+ + k_i^-} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$f(k_i^+) = \frac{k_i^-}{k_i^+ + k_i^-} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

### وزن‌دهی CRITIC<sup>۲</sup> (اهمیت معیارها، از طریق همبستگی بین معیارها)

در این روش، داده‌ها بر اساس میزان تداخل و تضاد موجود بین عوامل یا معیارها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در این روش، پس از محاسبه انحراف معیار معیارهای مورد بررسی، ماتریس مقارنی به ابعاد  $m \times m$  ایجاد می‌گردد که شامل ضرایب همبستگی بین بردارهای تشکیل شده است. با تعیین پارامترهای بالا، تضاد موجود بین معیار  $j$  با معیارهای دیگر از روی رابطه ۱۲، محاسبه می‌شود.

$$C_{jk} = \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad \text{رابطه ۱۲}$$

<sup>۱</sup>. Measurement Alternatives and Ranking according to Compromise Solution

<sup>۲</sup>. CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation

که در آن  $C_j k$  معرف مجموع تضاد معیار  $j$  با معیارهای  $k$  است که از  $k = 1$  شروع شده و تا  $k = m$  ادامه دارد و  $r_{jk}$  همبستگی بین دو معیار  $k$  و  $j$  را نشان می‌دهد. میزان اطلاعات عامل  $j$  را می‌توان با استفاده از رابطه ۱۳، محاسبه نمود.

$$C_j = \delta_j \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad \text{رابطه ۱۳}$$

که در آن  $C_j$ ، معرف میزان اطلاعات معیار  $j$  و انحراف معیار در مقادیر مربوط به عامل یا معیار  $j$  را نشان می‌دهد. با توجه به روابط یادشده، معیارهایی که دارای  $C_j$  بیشتری باشند وزن زیادی به خود اختصاص خواهند داد. وزن هر عامل مانند  $j$  از رابطه ۱۴، تعیین می‌گردد.

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^m C_k} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

که در آن  $W_j$  معرف وزن معیار  $j$  و  $C_k$  نشانگر میزان اطلاعات مجموع معیارهای  $k$  است که از  $k = 1$  شروع شده و تا  $k = m$  ادامه دارد. لذا، وزن نهایی هر معیار، از تقسیم میزان اطلاعات هر معیار بر مجموع میزان کل اطلاعات تمامی معیارها بدست می‌آید است (علی‌نژاد و خلیلی<sup>۱</sup>، ۱۹۹۹:۲۰۱۹). در راستای انجام مراحل وزن‌دهی کرتیک ابتدا در محیط ادریسی انحراف معیار و همبستگی میان لایه‌های اطلاعاتی مربوطه به هر یک از عوامل، با استفاده از تابع REGRESS به دست آمد و در مرحله بعد، با توجه به روابط مربوطه نسبت به محاسبه ماتریس تضاد، میزان اطلاعات و وزن نهایی در اکسل اقدام گردید.

#### استانداردسازی فازی

در پیاده‌سازی تمامی الگوریتم‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر و جهت دستیابی به الگوی پهنه‌بندی مکانی خطر زمین لغزش حوضه بالادست سد یامچی، مرحله استانداردسازی، با توجه به تابع عضویت فازی انجام شده است (جدول ۱). استاندارد نمودن داده‌ها به معنی همسان کردن دامنه تغییرات داده‌ها بین صفر و یک و یا یک دامنه مشخص دیگر است. در مجموعه‌های فازی، بیشترین ارزش یعنی مقدار یک به حداکثر عضویت و کمترین ارزش یعنی صفر به حداقل عضویت در مجموعه تعلق می‌گیرد (بایوم گرتل و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۹:۵؛ حسینی<sup>۳</sup>، ۲۰۱۹:۱۳).

جدول ۱: نوع توابع فازی ساز لایه‌های موضوعی تأثیرگذار بر خطر زمین لغزش حوضه بالادست سد یامچی

متغیر	توضیحات	نوع تابع فازی
شیب	کلاسه‌بندی مجدد و اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر زمین لغزش و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
جهت شیب	کلاسه‌بندی مجدد و اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر زمین لغزش و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
طبقات ارتفاعی	با افزایش ارتفاع، خطر زمین لغزش افزایش می‌یابد.	تابع خطی افزایشی
کاربری اراضی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر زمین لغزش و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از راه ارتباطی	در مناطق مجاور راه ارتباطی، پتانسیل وقوع مخاطره زمین لغزش افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
لیتولوژی	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر زمین لغزش و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
خاک	اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر زمین لغزش و سپس فازی کردن.	تابع بزرگ فازی
فاصله از گسل	در مناطق مجاور گسل، پتانسیل وقوع مخاطره زمین لغزش افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
فاصله از رودخانه	در مناطق مجاور رودخانه، پتانسیل وقوع مخاطره زمین لغزش افزایش می‌یابد.	تابع نزدیک فازی
بارش	با افزایش مقدار بارش، خطر زمین لغزش افزایش می‌یابد.	تابع خطی افزایشی

<sup>1</sup>. Alinezhad and Khalili

<sup>2</sup>. Baumgertel et al

<sup>3</sup>. Hoseini



### ارزیابی نقشه‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش

پس از تهیه نقشه حساسیت به زمین‌لغزش، لازم است تا صحت مدل حساسیت به زمین‌لغزش مورد استفاده، مورد بررسی قرار گیرد. منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC<sup>۱</sup>)، از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در پیش‌بینی و تعیین دقت مدل‌سازی است (محمدنیا و فلاح، ۱۳۹۷:۱۱۹). در منحنی ROC، در محور افقی، پیکسل‌هایی که وقوع یا عدم وقوع زمین‌لغزش به وسیله مدل را به درستی پیش‌بینی کرده (مثبت درست<sup>۲</sup>) و در محور عمودی، نسبت پیکسل‌هایی که نادرست پیش‌بینی شده‌اند (مثبت غلط<sup>۳</sup>)، ترسیم می‌گردد (جورسفسکی<sup>۴</sup>، ۲۰۰۶:۳۹۸). طبقه‌بندی ارائه شده برای سطح زیر منحنی (AUC)، به صورت ۰/۹-۱: عالی، ۰/۸-۰/۹: خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸: خوب، ۰/۶-۰/۷: متوسط، ۰/۵-۰/۶: ضعیف، می‌باشد (ناندی و شاکور<sup>۵</sup>، ۲۰۱۰:۳۹۴). مدلی که بیشترین مقدار AUC را دارا باشد، دارای عملکرد نسبی بالاتری است.

### نتایج و بحث

#### معیارهای مطرح در پهنه‌بندی زمین‌لغزش حوضه بالادست سد یامچی

شیب: شیب به عنوان عامل اصلی دخیل در وقوع زمین‌لغزش و از شاخص‌های توپوگرافیک مهم، در نظر گرفته می‌شود (ال جازولی و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۱۹:۴). در حوضه بالادست سد یامچی مقدار شیب بین ۰ تا ۷۵ درصد می‌باشد (شکل ۳، الف). این حوضه با داشتن متوسط شیب ۳۸ درصد مستعد برای وقوع زمین‌لغزش است.

جهت شیب: جهت شیب در مقدار درجه حرارت، میزان رطوبت، نوع و تراکم پوشش گیاهی و در نهایت در نوع و همچنین مقدار هوازگی، نقش به‌سزایی دارد (مددی و همکاران، ۱۳۹۹:۱۰). ۱۱۰/۱۹ کیلومترمربع از مساحت حوضه بالادست سد یامچی، دارای جهت شیب شمالی، ۱۱۲/۸۱ کیلومترمربع جنوبی، ۷۲/۴۸ کیلومترمربع غربی، ۸۳/۴۰ کیلومترمربع شرقی می‌باشند. همچنین به ترتیب ۶۸/۷۹، ۶۶/۴۷، ۶۶/۲۰ و ۶۱/۳۹ کیلومترمربع در جهت شمال شرق، جنوب شرق، جنوب غرب و شمال غرب قرار دارند (شکل ۳، ب).

ارتفاع: متغیر ارتفاع بسیاری از ویژگی‌های محیطی تأثیرگذار بر رخداد زمین‌لغزش را تحت تأثیر قرار می‌دهد که از جمله می‌توان به کنترل‌های ارتفاع بر عناصر اقلیمی، پوشش گیاهی، فرایندهای هوازگی و غیره اشاره نمود (کدوی و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۱۸:۵). ارتفاع متوسط حوضه ۲۱۶۰ متر از سطح دریا، حداکثر ارتفاع ۴۵۰۵ متر، حداقل ارتفاع ۱۵۰۶ متر و اختلاف بلندترین و پست‌ترین نقطه‌ی حوضه ۲۹۹۹ متر و اختلاف ارتفاع سرچشمه‌ی اصلی (رود آق لاقان) و ساختگاه سد یامچی ۲۴۹۴ متر است (شکل ۳، ج) و این مقدار اختلاف ارتفاع باعث تنوع محیطی و همچنین انرژی دینامیکی بالا در سطح حوضه مطالعاتی شده است. بخش شمال حوضه به صورت واحد کوهستان مرتفع، در برگیرنده‌ی ارتفاعات هرم داغی، کوه قره‌گونی طرنجی، قرخ بلاغ داغی، بوز داغی و ساریمساقلو داغی به ترتیب با ارتفاع ۴۵۰۵، ۳۸۸۲، ۳۸۷۸، ۴۲۰۰، ۳۶۹۸ متر از سطح دریا می‌باشد و عامل ارتفاع و توپوگرافی خشن و به تبع آن شرایط اقلیمی محلی حاکم در این بخش از حوضه از مهم‌ترین عوامل محدود کننده‌ی استقرار جمعیت انسانی شده است؛ به طوری که از ارتفاع ۲۴۰۰ متر به بالا هیچ گونه سکونتگاه دائمی به صورت آبادی و ده مشاهده نمی‌شود. از مهم‌ترین ارتفاعات غرب حوضه می‌توان به مخروط آتشفشانی قصرداغ با ارتفاع ۲۶۹۵ متر از سطح دریا اشاره کرد. اغلب اراضی واقع در قسمت غربی حوضه، از نوع مرتعی می‌باشد. تنها آبادی که در این قسمت وجود دارد، روستای دکالانو است که در غرب قصرداغ و شرق کوچک داغ یعنی در محل خط‌القعر

1. Receiver operating characteristic

2. Specificity

3. Sensitivity

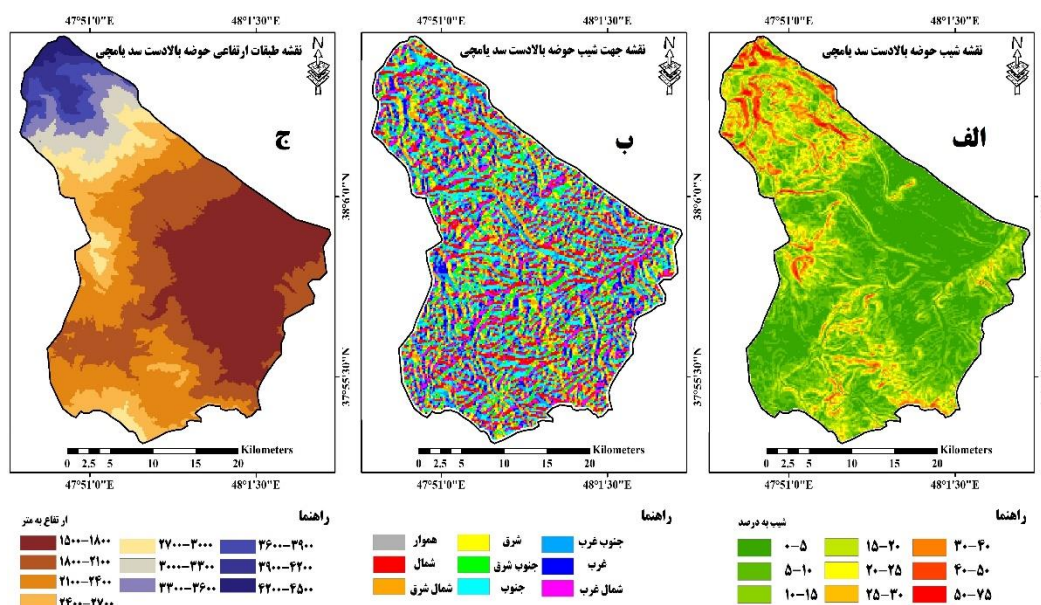
4. Gorsevski

5. Nandi and Shakoore

6. El Jazouli et al

7. Kadavi et al

این دو کوه واقع شده است. عمدتاً قسمت‌های مرکزی و شرق حوضه به صورت، کوهپایه‌های کم ارتفاع، دره‌های عریض، مخروط‌افکنه‌ها، دشت‌های بین کوهی و گاهاً دشت‌های سیلابی می‌باشد.



شکل ۳: نقشه معیارهای شیب، جهت شیب و طبقات ارتفاعی حوضه بالادست سد یامچی

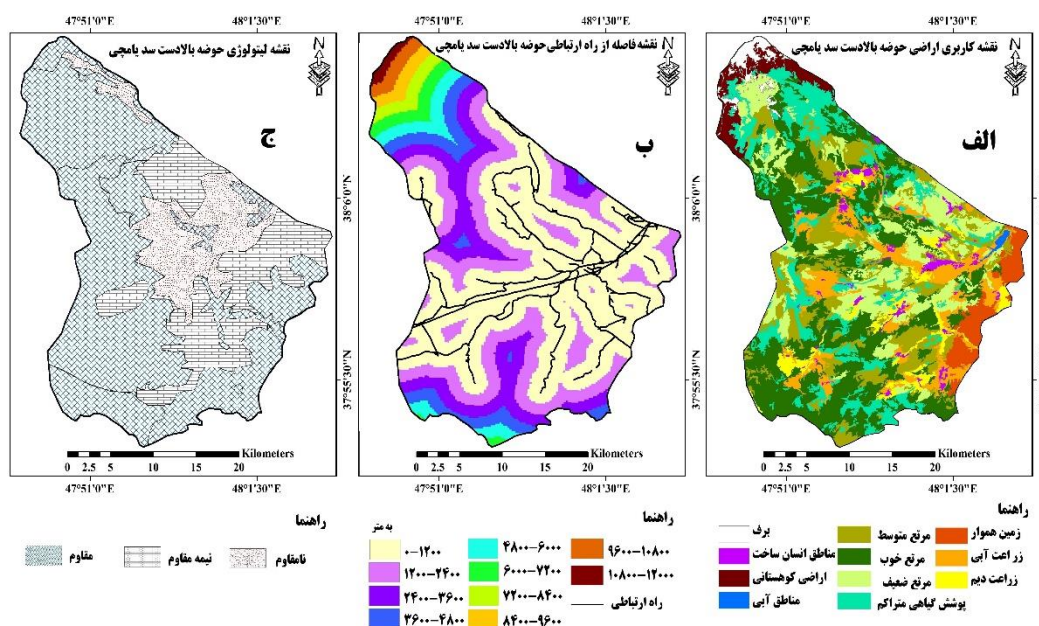
**کاربری اراضی:** تغییر کاربری اراضی تحت تأثیر عوامل مربوط به نیازهای جمعیت، مانند تبدیل زمین‌های کشاورزی و جنگلی به مناطق شهری، تبدیل جنگل به زمین‌های کشاورزی و کاهش شیب، برای توسعه زیرساخت‌ها قرار دارد. کاربری زمین عامل اصلی در تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش است (ال جازولی و همکاران، ۱۹۹۴). انواع کاربری‌ها، در حوضه به صورت زراعت آبی با مساحت  $70/63$  کیلومترمربع، زراعت دیم با مساحت  $27/87$  کیلومترمربع، پوشش گیاهی متراکم و باغات با مساحت  $103/37$  کیلومترمربع، مناطق انسان‌ساخت با مساحت  $13/71$  کیلومترمربع، مراتع خوب با مساحت  $109/98$  کیلومترمربع، مراتع متوسط با مساحت  $108/7$  کیلومترمربع، مراتع ضعیف با مساحت  $199/46$  کیلومترمربع، مناطق آبی با مساحت  $2/01$  کیلومترمربع، زمین هموار با مساحت  $27/48$  کیلومترمربع، اراضی کوهستانی با مساحت  $21/7$  کیلومتر-مربع، اراضی پوشیده از برف با مساحت  $13/07$  کیلومترمربع، می‌باشد (شکل ۴، الف).

**فاصله از جاده:** فاصله تا جاده‌ها یکی از عوامل اصلی انسانی است که بر وقوع زمین‌لغزش تأثیر می‌گذارد (جمال‌آبادی و همکاران، ۱۴۰۰: ۵۲). در هنگام کارهای عمرانی، برخی از رانش‌های زمین به دلیل زیربری و از بین بردن پاشنه دامنه و تغییر در شیب دامنه‌ها ایجاد می‌گردد (ال جازولی و همکاران، ۱۹۹۴). در محدوده مطالعاتی فاصله از جاده در حد فاصل صفر تا ۱۲۰۰۰ متر، می‌باشد (شکل ۴، ب). جاده‌ی ارتباطی اردبیل به تبریز از این حوضه عبور می‌کند، لذا این حوضه از لحاظ ترانسپورت بین گمرکات سرو (در مرز ترکیه) در شمال غرب و گمرک بيله سوار و آستارا (در مرز جمهوری آذربایجان) در شمال شرق نقشی حیاتی ایفا می‌کند و به طور مکرر، در این محورهای ارتباطی شاهد وقوع لغزش‌های کوچک و بزرگ هستیم.

<sup>1</sup> . El Jazouli et al

<sup>2</sup> . El Jazouli et al

**لیتولوژی:** ویژگی‌های لیتولوژیک به صورت گسترده‌ای بر خصوصیات فیزیکی همچون استحکام و نفوذپذیری مواد سطحی و زیر سطحی و احتمال وقوع زمین‌لغزش تأثیر می‌گذارد و به همراه شیب، ماهیت و شدت زمین‌لغزش را تعیین می‌کند (خان و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۳۹۰:۲۰). نقشه سنگ‌شناسی استخراج شده، نشان داد که منطقه مورد مطالعه با انواع واحدهای سنگ‌شناسی پوشانده شده است. از جمله این واحدها می‌توان به گدازه‌های آندزیتی و داسیتی، تراکی آندزیت، بازالت و توف، به همراه سنگ‌های رسوبی، پادگانه‌های آبرفتی جوان و قدیمی و مستعد فرسایش، می‌باشد و هر یک از این سازندها از مقاومت متفاوتی برخوردارند. از لحاظ مقاومت سازندهای محدوده به ۳ طبقه، از مقاوم، نیمه مقاوم و نامقاوم، تقسیم گردیده است (شکل ۴، ج). با توجه به بررسی‌های انجام گرفته، ۴۴۹/۶۸ کیلومتر مربع (۶۴/۴۴ درصد) از مساحت این حوضه از نظر زمین‌شناسی مقاوم بوده و کمترین حساسیت را نسبت به فرسایش دارند. گرانیت‌ها و گرانودیوریت‌های الیگوسن که با سنگ‌های دگرگونی همراه می‌باشند و ریبولیت‌ها و ریبوداسیت‌های میوسن، مقاوم‌ترین واحدهای لیتولوژیک حوضه می‌باشند. حدود ۱۴۲/۵۶ کیلومتر مربع (۲۰/۴۲ درصد) از مساحت این حوضه نیمه مقاوم بوده و از نظر فرسایش-پذیری، حد بین واحدهای مقاوم و نامقاوم می‌باشد. عمده‌ترین سازندهای نیمه مقاوم حوضه شامل کنگلومرا، لاهار، پومیس و برش می‌باشند. اغلب این سازندها به صورت نواحی کم ارتفاع حوضه هستند. سازندهای نیمه مقاوم از لحاظ پراکندگی اغلب در قسمت مرکزی حوضه گسترش یافته‌اند. حدود ۱۰۵/۶۸ کیلومتر مربع (۱۵/۱۴ درصد) از سطح حوضه به واحدهای نامقاوم اختصاص دارد که کمترین مقاومت را در برابر فرسایش داشته و فرسایش‌پذیرترین بخش‌های حوضه‌ی بالادست سد یامچی را در بر می‌گیرد. مارن‌های ژیبس‌دار و ماسه سنگ‌های نئوژن به همراه آبرفت‌های جوان و نهشته‌های یخچالی، کم مقاوم‌ترین واحدهای لیتولوژیک در برابر فرسایش می‌باشند.



شکل ۴: نقشه معیارهای کاربری اراضی، فاصله از راه ارتباطی و لیتولوژی حوضه بالادست سد یامچی

**فاصله از گسل:** مناطق نزدیک به گسل به طور کلی بسیار مستعد رانش زمین هستند، زیرا قدرت سنگ‌های اطراف گسل به دلیل شکست زمین‌ساختی کاهش می‌یابد (چن و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۷:۳۱۴). فاصله از گسل در حوضه مطالعاتی بین صفر

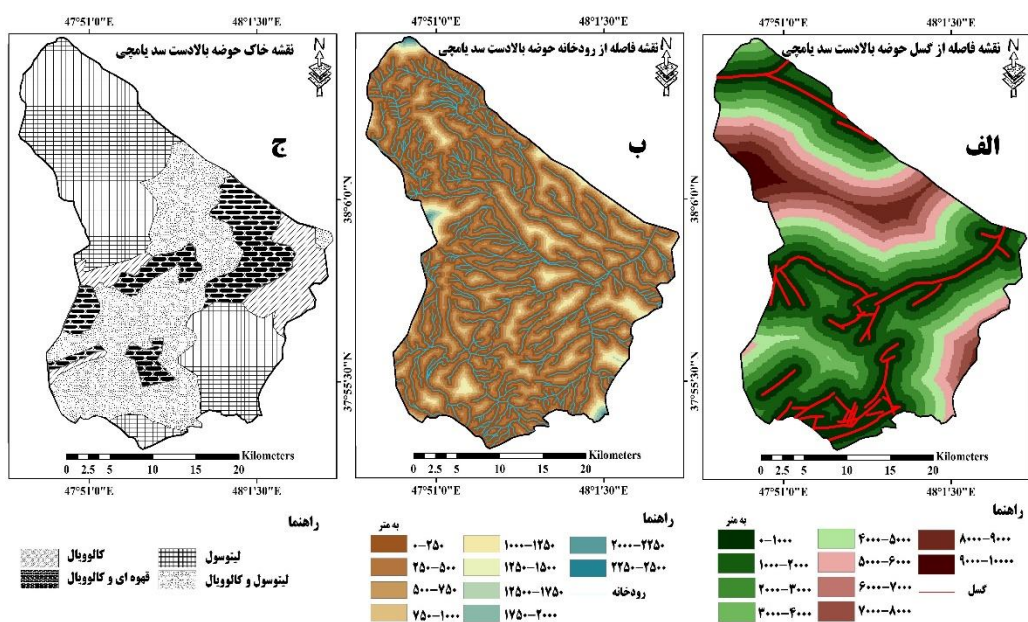
۱. Khan et al

۲. Chen et al

تا ۱۰۰۰۰ می‌باشد (شکل ۵، الف). از جمله اصلی‌ترین گسل‌های موجود در محدوده‌ی منطقه گسل‌های دامنه‌های جنوبی سبلان شامل: گسل قصر داغ- برجلو در مجاورت قصر داغ به طول ۹/۵ کیلومتر، گسل کلانتر در شمال روستای کلانتر به طول ۲/۴ کیلومتر، گسل شرق دکلانو به طول ۴/۵ کیلومتر، گسل فرعی قزخ بلاغ در یک کیلومتری شمال شرقی روستای قزخ بلاغ به طول ۱ کیلومتر و گسل آوارس که به طول ۱۵ کیلومتر با روند شمال غربی-جنوب شرقی از روستای آوارس تا کالدیرای سبلان کشیده شده است، اشاره داشت.

**فاصله از شبکه آبراهه:** رودخانه‌ها نقش عمده‌ای در توسعه زمین‌لغزش ایفا می‌کنند و می‌توانند منجر به زیرشویی دامنه‌ها و از بین بردن تکیه‌گاه دامنه‌ها شوند و در نتیجه فرسایش و اشباع دامنه‌ها، ممکن است بر شروع زمین‌لغزش تأثیر بگذارد (بوی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۱:۱۴۲۱). حوضه‌ی آبریز گیوی‌چای متشکل از رودخانه‌های اصلی به نام‌های آق لاقان‌چای، امام‌چای و کمال‌آبادچای می‌باشد. فاصله از آبراهه در حوضه مطالعاتی بین صفر تا ۲۵۰۰ متر می‌باشد (شکل ۵، ب).

**خاک:** خاک هر منطقه از عوامل مؤثر در ایجاد حرکات دامنه‌ای می‌باشد و انواع خاک‌ها منجر به شکل‌گیری انواع مختلفی از حرکات توده‌ای می‌شود. انواع خاک حوضه به صورت: از نوع لیتوسل به مساحت ۲۹۹/۱۵ کیلومترمربع، با خاک بسیار کم عمق تا نیمه عمیق با بافت سنگین، لیتوسل - کالوویال به مساحت ۲۴۰/۶۸ کیلومترمربع، با خاک کم عمق تا نیمه عمیق با بافت متوسط تا سنگین، سنگ ریزه‌ای و ساختمان فشرده و مکعبی. کالوویال و قهوه‌ای - کالوویال با خاک کم عمق تا نیمه عمیق با بافت متوسط تا سنگین، ساختمان خاک مکعبی به ترتیب؛ با مساحت ۵۷/۸۳ و ۱۰۰/۳۴ کیلومترمربع می‌باشد (شکل ۵، ج).



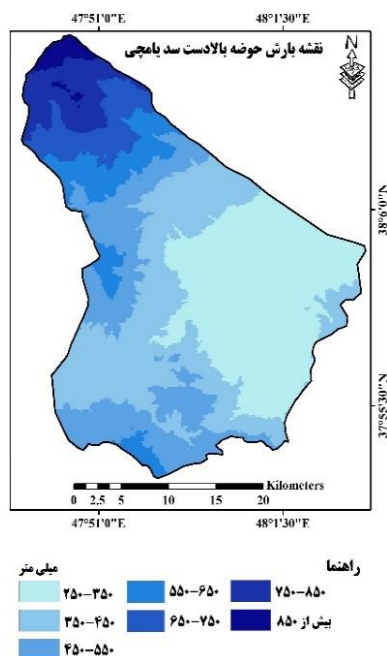
شکل ۵: نقشه معیارهای فاصله از گسل، فاصله از رودخانه و خاک حوضه بالادست سد یامچی

بارندگی: بارندگی یکی از عوامل بسیار مهم در ایجاد و یا تسریع زمین‌لغزش‌ها می‌باشد. نقش آب در گسیختگی شیب‌ها و وقوع آن‌ها و همچنین به صورت عامل کاهش دهنده مقاومت برشی سطوح می‌باشد (شریفی پیچون و همکاران، ۱۴۸:۱۴۰۰). مقدار بارش سالیانه در حوضه مطالعاتی (بیش از ۸۵۰-۲۵۰ میلی‌متر) می‌باشد (شکل ۶). ماه‌های فروردین و اردیبهشت بیشترین بارندگی در حوضه را دارد و کمترین بارندگی در مرداد اتفاق می‌افتد به علاوه، مناطق با

<sup>1</sup>. Bui et al



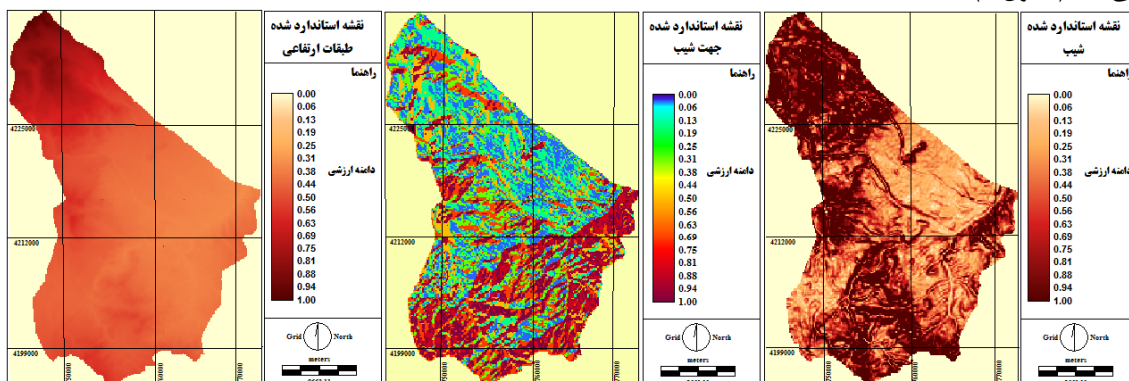
بارش زیاد عمدتاً در نواحی کوهستانی و مرتفع حوضه گسترده شده‌اند و مناطق با بارش کم، در نواحی کم ارتفاع حوضه قرار دارند.

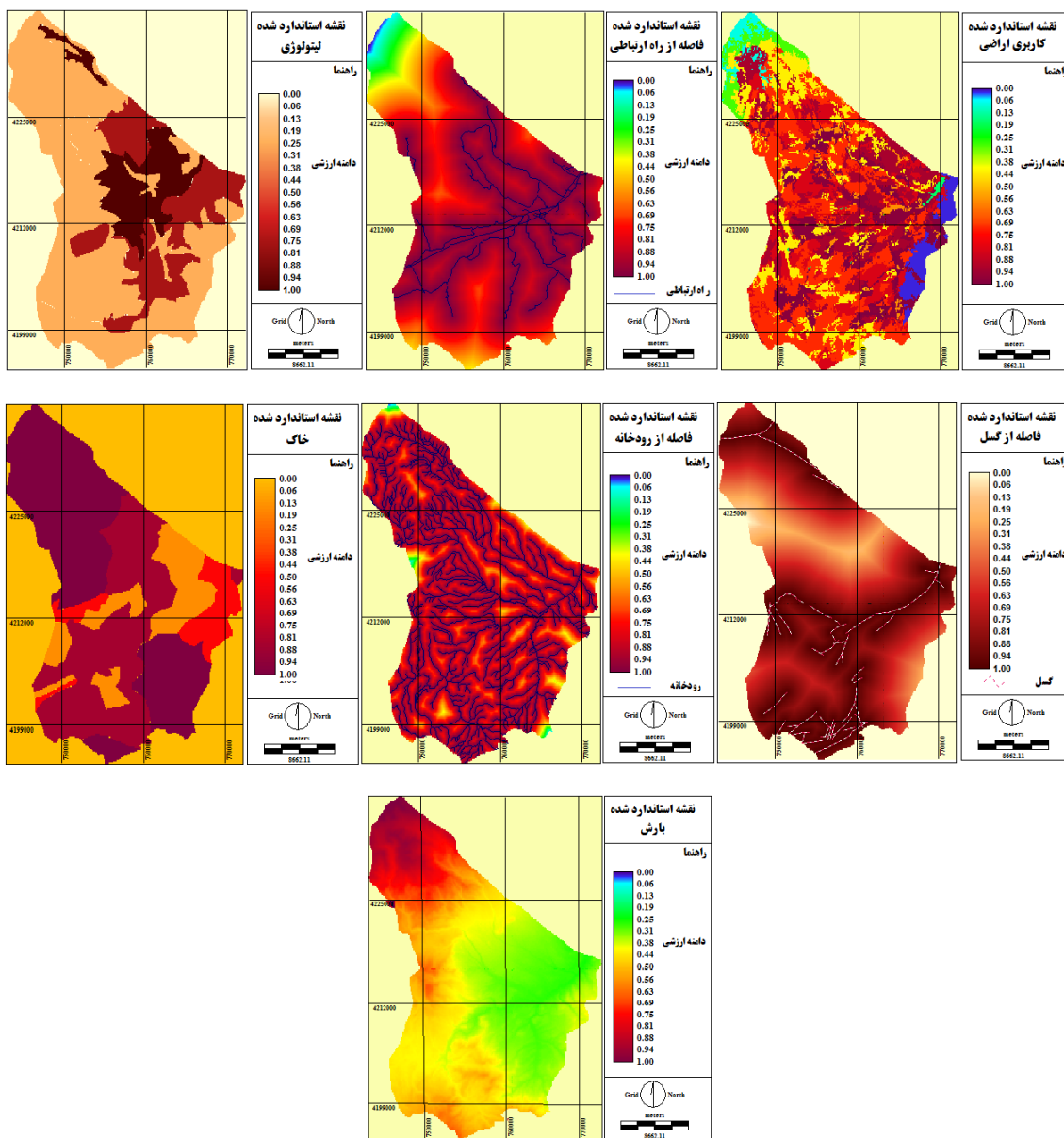


شکل ۶. نقشه معیار بارش حوضه بالادست سد یامچی

### پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

پس از تهیه ی نقشه‌های استاندارد شده (شکل ۷)، در رابطه با هر یک از معیارهای مطرح در نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه بالادست سد یامچی و اعمال کردن وزن‌های مربوطه (جدول ۲)، نقشه‌های حاصله وارد تکنیک‌های مورد بررسی شده و با اعمال مراحل مختلف بر روی نقشه‌های خروجی نهایی در ۵ طبقه‌ی بسیار پرخطر تا بسیار کم خطر، بدست آمد (شکل ۸). با توجه به خروجی حاصل از به کارگیری روش CODAS،  $58/17$  کیلومترمربع از مساحت حوضه در کلاس بسیار پرخطر و  $139/46$  کیلومترمربع در کلاس پرخطر قرار دارد. طبق نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به دست آمده از روش MARCOS، به ترتیب:  $54/07$  و  $114/01$  کیلومترمربع از مساحت حوضه را طبقات بسیار پرخطر و پرخطر تشکیل می‌دهد (جدول ۳).





شکل ۷: نقشه استاندارد شده معیارهای مطرح در پهنه‌بندی زمین لغزش حوضه بالاد ست سد یامچی

جدول ۲: ماتریس همبستگی، ماتریس تضاد و محاسبه وزن نهایی معیارها با استفاده از روش کورتیک

ماتریس همبستگی										
معیار	شیب	جهت شیب	ارتفاع	کاربری	راه ارتباطی	گسل	لیتولوژی	خاک	رودخانه	بارش
شیب	۱									
جهت شیب	۰/۲۰۸	۱								
ارتفاع	۰/۶۲۵	۰/۱۸۴	۱							
کاربری	۰/۰۳۰	۰/۰۵۹	۰/۰۱۷	۱						
راه ارتباطی	۰/۱۴۵	۰/۱۴۰	۰/۳۰۵	۰/۳۵۹	۱					
گسل	۰/۱۶۵	۰/۲۴۵	۰/۰۷۱	۰/۰۱۵	۰/۰۵۶	۱				
لیتولوژی	۰/۲۲۰	۰/۱۰۸	۰/۱۴۰	۰/۱۷۹	۰/۳۲۱	۰/۰۲۰	۱			
خاک	۰/۲۳۸	۰/۰۳۰	۰/۲۳۷	۰/۰۰۳	۰/۲۴۲	۰/۱۵۸	۰/۲۴۲	۱		

رودخانه	۰/۲۰۵	۰/۰۸۴	۰/۱۸۰	۰/۱۱۱	۰/۰۲۷	۰/۰۹۸	۰/۰۴۳	۰/۰۰۳	۱	۰/۱۶۷
بارش	۰/۶۲۳	۰/۱۱۸	۰/۹۸۰	-۰/۰۸۷	-۰/۴۲۴	۰/۰۴۹	-۰/۲۲۵	۰/۲۹۴	۰/۱۶۷	۱
ماتریس تضاد										
معیار	شیب	جهت شیب	ارتفاع	کاربری	راه ارتباطی	گسل	لیتولوژی	خاک	رودخانه	بارش
شیب	۰	۰/۷۹۱	۰/۳۷۴	۰/۹۶۹	۱/۱۴۵	۰/۸۳۴	۱/۲۲۰	۰/۷۶۱	۰/۷۹۴	۰/۳۷۶
جهت شیب	۰/۷۹۱	۰	۰/۸۱۵	۰/۹۴۰	۰/۸۵۹	۰/۷۵۴	۰/۱۰۸	۱/۰۳۰	۰/۹۱۵	۰/۸۸۱
ارتفاع	۰/۳۷۴	۰/۸۱۵	۰	۱/۰۱۷	۱/۳۰۵	۰/۹۲۸	۱/۱۴۰	۰/۷۷۲	۰/۸۱۹	۰/۰۱۹
کاربری	۰/۹۶۹	۰/۹۴۰	۱/۰۱۷	۰	۰/۶۴۰	۰/۹۸۴	۰/۸۲۰	۰/۰۱۶	۰/۸۸۸	۰/۰۸۷
راه ارتباطی	۱/۱۴۵	۰/۸۵۹	۱/۳۰۵	۰/۶۴۰	۰	۱/۰۵۶	۰/۶۷۸	۱/۳۲۳	۰/۹۷۲	۱/۴۲۴
گسل	۰/۸۳۴	۰/۷۵۴	۰/۹۲۸	۰/۹۸۴	۱/۰۵۶	۰	۱/۰۲۰	۱/۱۵۸	۰/۹۰۱	۰/۹۵۰
لیتولوژی	۱/۲۲۰	۰/۱۰۸	۱/۱۴۰	۰/۸۲۰	۰/۶۷۸	۱/۰۲۰	۰	۱/۲۴۲	۰/۹۵۶	۱/۲۲۵
خاک	۰/۷۶۱	۱/۰۳۰	۰/۷۷۲	۰/۰۱۶	۱/۳۲۳	۱/۱۵۸	۱/۲۴۲	۰	۰/۹۹۶	۰/۷۰۵
رودخانه	۰/۷۹۴	۰/۸۱۹	۰/۸۱۹	۰/۸۸۸	۰/۹۷۲	۰/۹۰۱	۰/۹۵۶	۰/۹۹۶	۰	۰/۸۳۲
بارش	۰/۳۷۶	۰/۸۸۱	۰/۰۱۹	۰/۰۸۷	۱/۴۲۴	۰/۹۵۰	۱/۲۲۵	۰/۷۰۵	۰/۸۳۲	۰
محاسبه وزن نهایی										
معیار	شیب	جهت شیب	ارتفاع	کاربری	راه ارتباطی	گسل	لیتولوژی	خاک	رودخانه	بارش
مجموع تضاد	۷/۲۶۸	۸/۱۰۰	۷/۱۹۲	۸/۳۶۵	۹/۴۰۶	۸/۵۹۱	۹/۴۱۲	۹	۸/۰۷۷	۷/۵۰۳
انحراف معیار	۰/۳۷۸	۰/۲۳۱	۰/۱۷۶	۰/۳۰۴	۰/۱۹۱	۰/۲۲۷	۰/۲۵۸	۰/۲۵۲	۰/۱۱۹	۰/۲۰۹
میزان اطلاعات	۲/۷۴۸	۱/۸۷۷	۱/۲۶۹	۲/۵۴۷	۱/۸۰۲	۱/۹۵۴	۲/۴۳۰	۲/۲۷۳	۰/۹۶۵	۱/۵۷۰
وزن نهایی	۰/۱۴۱	۰/۰۹۶	۰/۰۶۵	۰/۱۳۱	۰/۰۹۲	۰/۱۰۰	۰/۱۲۵	۰/۱۱۶	۰/۰۴۹	۰/۰۸۰

بررسی نقاط بسیار پرخطر و پرخطر معرفی شده توسط الگوریتم‌های مورد بررسی نشان می‌دهد؛ از لحاظ معیار شیب، طبق خروجی الگوریتم CODAS، مناطق دارای احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد، بین شیب‌های ۶۵-۱۰ درصد، قرار دارند. بررسی خروجی MARCOS و مقایسه با نقشه شیب نیز نشان می‌دهد که مقدار شیب نقاط پرخطر و بسیار پرخطر، بین ۵۰-۱۵ درصد، قرار دارند. مقایسه بین نقاط لغزشی موجود در حوضه با نقشه شیب، نشان می‌دهد، در طبقات شیب بالاتر از ۵۰ درصد و شیب‌های پایین‌تر از ۱۰، نقطه لغزشی مشاهده نمی‌گردد. معمولاً بر روی دامنه‌های با شیب بیش از ۵۰ درصد، ضخامت خاک کاهش می‌یابد و احتمال خطر زمین‌لغزش کاهش می‌یابد. در شیب‌های کمتر از ۱۰ درصد نیز از شدت ناهمواری تا حد زیادی کاسته شده و احتمال وقوع زمین‌لغزش در این پهنه‌ها کاهش پیدا می‌کند. بنابراین می‌توان اذعان داشت که از لحاظ معیار شیب خروجی تمامی الگوریتم‌ها قابل قبول می‌باشد. در رابطه با عامل جهت شیب، نقاط بسیار پرخطر و پرخطر ارائه شده، توسط الگوریتم‌های مورد بررسی؛ در دامنه‌های شمالی و غربی و سپس دامنه‌هایی با جهات شمال شرقی، شرقی قرار دارند. دامنه‌های شمالی، غربی و شمال غربی به دلیل دریافت بارش زیاد، ماندگاری بلند مدت برف و داشتن رطوبت بیشتر، برای لغزش بسیار مستعد می‌باشد. لذا، نتایج حاصل از الگوریتم‌های مورد استفاده از نظر معیار جهت شیب نیز مورد قبول می‌باشد. بررسی مقایسه‌ای بین معیار ارتفاع و خروجی الگوریتم‌ها نشان می‌دهد، مناطق بسیار پرخطر و پرخطر، در سطوح ارتفاعی ۴۲۰۰-۱۵۰۰ متر قرار دارند. با مقایسه بین نقاط لغزشی موجود در حوضه مشاهده می‌گردد، پراکنش نقاط لغزشی نیز در سطوح ارتفاعی ۳۳۰۰-۱۵۰۰ متر، می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که از لحاظ معیار سطوح ارتفاعی نتایج روش‌های مورد استفاده، قابل قبول می‌باشد. ولی با توجه به نقاط لغزشی موجود در حوضه و با نظر به حداقل و حداکثر مقادیر ارتفاعی معرفی شده به عنوان مناطق دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد، می‌توان اذعان داشت که خروجی حاصل از روش MARCOS، قابل قبول‌تر به نظر می‌رسد.

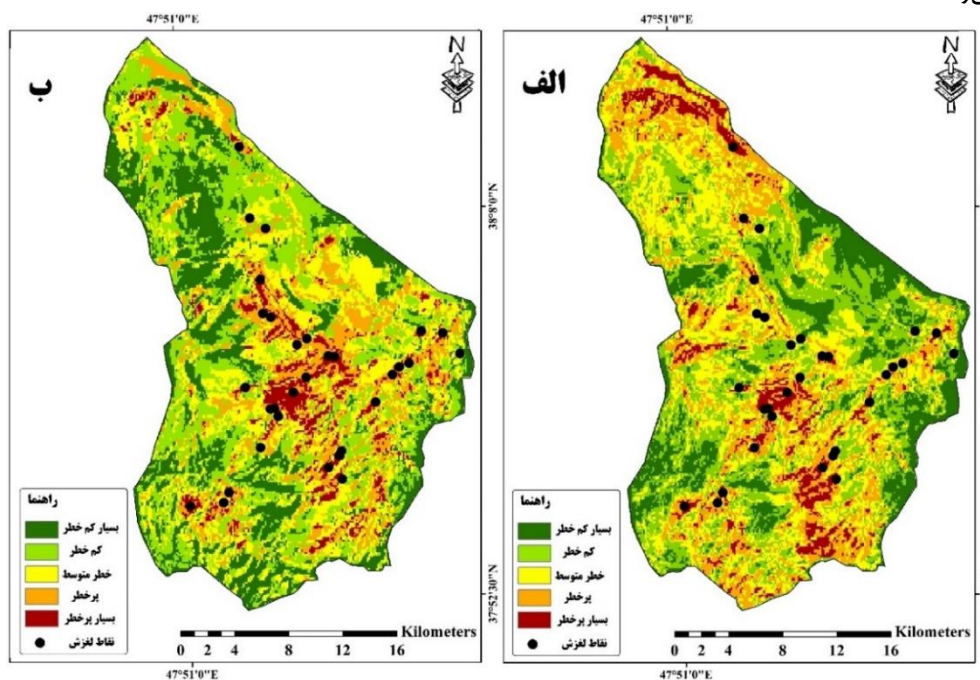
بررسی خروجی حاصل از هر دو روش مورد بررسی، نشان می‌دهد که از لحاظ معیار کاربری اراضی، کاربری زراعی، مراتع و نواحی انسان ساخت، بیشترین سطح از مساحت مناطق داری احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد را به خود اختصاص داده است و بررسی نسبت بین پراکنش نقاط لغزشی و معیار کاربری نیز با این نتیجه منطبق می‌باشد. لذا، می‌توان گفت؛ رعایت نکردن تناوب زراعی، کشت در اراضی شیب‌دار، چرای بیش از حد دام‌های در مراتع و نابودی پوشش گیاهی، به رخداد زمین لغزش در کاربری‌های کشاورزی و مراتع، سرعت بخشیده است. بر اساس تلفیق نقشه شیب و کاربری؛ مشاهده می‌گردد، عمده دیم‌زارهای شیب‌دار حوضه که کانون فرسایش و مستعد زمین لغزش‌اند، در نیمه میانی و تا حدودی در بخش‌های جنوبی در شیب‌های ۱۵ تا ۳۵ درصد پراکنده‌اند. با توجه به این که اغلب اراضی کشاورزی به ویژه؛ دیم‌زارهای منطقه بر روی دامنه‌های شیب‌دار قرار گرفته‌اند، بنابراین انجام شخم در جهت شیب به خصوص در زمان وقوع بارندگی-های با شدت زیاد، منجر به فرسایش خاک و زمین لغزش می‌شود. نکته حائز اهمیت دیگر در مورد سکونتگاه مسکونی است که رشدی زیادی را در طی سال‌های اخیر، داشته است و افزایش مناطق مسکونی و رشد زمین‌های غیر قابل نفوذ بر فرآیندهای حاکم بر حوضه تاثیرگذار بوده و به افزایش سطوح پرخطر، در سطح حوضه منجر شده است. در رابطه با نقشه لیتولوژی می‌توان گفت که با توجه به نقشه پهنه‌بندی حاصل از به کارگیری روش‌های CODAS و MARCOS، طبقات بسیار پرخطر و پرخطر، به طور عمده؛ در سازندهایی با مقاومت بسیار کم و متوسط و به صورت محدود، در مناطقی با لیتولوژی مقاوم دیده می‌شوند. لذا، در مناطقی که سنگ‌ها توسط مواد آبرفتی و دیگر سازندهای سطحی که عموماً مستعد جهت ایجاد لغزش‌اند، پوشیده شده است، دارای حساسیت بالایی نسبت به وقوع لغزش‌اند و نتایج حاصل از به کارگیری روش‌های مورد بررسی، از لحاظ معیار لیتولوژی نیز قابل قبول می‌باشد.

از لحاظ معیار فاصله از راه ارتباطی، باید اشاره داشت، مناطق بسیار پرخطر و پرخطر، از فاصله صفر تا ۱۲۰۰ متری از راه ارتباطی قرار دارند. مقایسه نقاط لغزشی و نقش موضوعی راه ارتباطی حاکی از این امر هست که، لغزشی موجود، به طور نسبی، در فواصل نزدیک از جاده، قرار دارند. با بررسی معیار فاصله از گسل به این نتیجه دست یافتیم که طبق نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حاصل از تمامی الگوریتم‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر، بخش عمده ای از نقاط بسیار پرخطر و پرخطر، تا فواصل ۱۰۰۰ متری، از گسل واقع شده‌اند. مقایسه نقشه فاصله از گسل با نقشه پراکنش نقاط لغزشی، نشان می‌دهد که تعداد کمی از نقاط لغزشی موجود نیز در فواصل دور قرار داد و مابقی نقاط لغزشی در فواصل زیاد از گسل رخ داده‌اند. از لحاظ معیار فاصله از رودخانه، می‌توان نتیجه گرفت، به ترتیب طبق خروجی‌های حاصل از روش‌های مورد بررسی، مناطق بسیار پرخطر و پرخطر، تا فاصله ۰ تا ۲۵۰ متری از رودخانه قرار دارند. نسبت پراکنش لغزش‌ها با این معیار مورد بررسی، نشان می‌دهد، اغلب نقاط لغزشی موجود در حوضه در فواصل نزدیک از رودخانه در فاصله ۱۰۰-۰ متری از رودخانه‌ها اتفاق افتاده است و رودخانه‌ها (به ویژه رودخانه‌های دائمی و پرآب آق‌لاقان‌چای، لای‌چای، امام‌چای و کمال-آبادچای)، با زیرسویی دامنه‌ها و از بین بردن تکیه‌گاه در رخداد لغزش‌های محدوده دارای اهمیت‌اند. رودخانه‌های پرآب در مسیر خود از میان سنگ‌های آتشفشانی سبلان عبور کرده و در بخش‌های نامقاوم و فرسایش‌پذیر رسوبات آذرآواری را دچار آب بردگی کرده و با زیرسویی دامنه‌ها و نفوذ دادن آب به خاک و سنگ موجب تشدید لغزش می‌گردد و مناطق پرخطر، بیشتر بستر طغیانی رود را شامل می‌شود و این بخش از حوضه در معرض مستقیم فرسایش توسط جریان رود می‌باشد. لذا می‌توان ادعان داشت، که از نظر معیارهای فاصله از راه ارتباطی، فاصله از گسل و رودخانه نیز نتایج حاصل از الگوریتم‌های چند معیاره، قابل قبول و نزدیک به واقعیت موجود در محدوده هست.

طبق نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حاصل از الگوریتم‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر، خاک‌های ریزدانه (به ترتیب شامل: لیتوسول، لیتوسول - کالوویال و کالوویال)، که از درصد زیادی رس، مارن و سیلت تشکیل شده‌اند و از عمق زیادی نیز برخوردارند، اهمیت زیادی در وقوع زمین لغزش دارند و نحوه فعالیت بدین گونه می‌باشد که آب در داخل دامنه‌هایی که از خاک‌های ریزدانه با درصد زیادی از رس، مارن و سیلت تشکیل شده‌اند و از عمق زیادی نیز برخوردارند، نفوذ می‌یابد و



فشار آب منفذی خاک و تنش‌های برشی افزایش می‌یابد. لذا، با به هم خوردن حالت کلوئیدی و چسبندگی خاک، پایداری واحدهای مستعد کاهش یافته و موجب گسیختگی می‌گردد. با توجه به معیار بارش؛ در حالت کلی باید اشاره داشت، ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت به جهت دریافت بارش قابل توجه اهمیت بسیار زیادی در رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه دارد. در واقع، بارش مستمر در طی این ماه‌ها (همراه با ذوب برف و یخ) یکی از شرایط لازم برای رخداد زمین‌لغزش را مهیا می‌سازد که همان حضور آب می‌باشد. با در نظر داشتن نقشه عامل بارش، به این نتیجه می‌توان رسید که مناطق با پتانسیل خطر زیاد و بسیار زیاد، در مناطقی با بارش مابین ۸۵۰-۲۵۰ میلی‌متر قرار گرفته است. بررسی نسبت نقاط لغزشی و مقادیر بارش نیز نشان می‌دهد، پراکنش نقاط لغزشی موجود در حوضه، در مقدار بارشی ۶۵۰-۲۵۰ میلی‌متر، قرار دارند. می‌توان نتیجه گرفت که از لحاظ معیار بارش نتایج روش‌های مورد استفاده تقریباً، قابل قبول می‌باشد. ولی با توجه به نقاط لغزشی موجود در حوضه، طبق خروجی حاصل از روش‌ها و با در نظر داشتن حداقل و حداکثر مقادیر بارش معرفی شده به عنوان مناطق دارای احتمال خطر بسیار زیاد و زیاد، می‌توان اذعان داشت که خروجی حاصل از روش MARCOS، قابل قبول‌تر به نظر می‌رسد.



شکل ۸: نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه بالادست سد یامچی؛ (الف) خروجی حاصل از روش MARCOS (ب) خروجی حاصل از روش CODAS

جدول ۳: مساحت کلاس‌های طبقه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره CODAS و

#### MARCOS

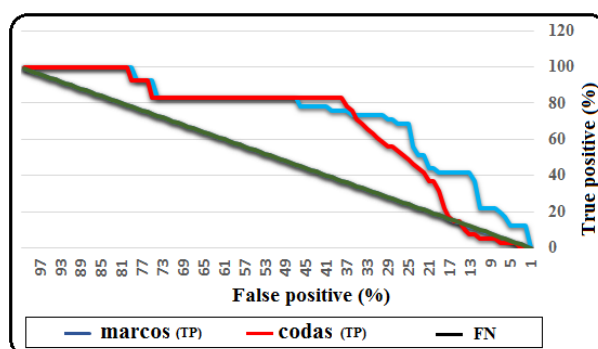
میزان خطر	بسیار کم خطر	کم خطر	متوسط	پرخطر	بسیار پرخطر	CODAS
بسیار کم خطر	۱۱۵/۷۶	۱۹۲/۰۳	۱۹۲/۵۸	۱۳۹/۴۶	۵۸/۱۷	
کم خطر	۱۶/۵۸	۲۷/۵۱	۲۷/۵۹	۱۹/۹۸	۸/۳۴	
بسیار کم خطر	۱۵۷/۳۸	۲۰۰/۴۶	۱۷۲/۰۸	۱۱۴/۰۱	۵۴/۰۷	MARCOS
کم خطر	۲۲/۵۵	۲۸/۷۲	۲۴/۶۵	۱۶/۳۳	۷/۷۵	

نتایج حاصل از هم‌پوشانی خروجی حاصل از مدل‌های مورد بررسی، با پراکنش نقاط لغزشی (جدول ۴)؛ نشان داد که به ترتیب با توجه به الگوریتم تصمیم‌گیری چند معیاره CODAS، ۲۲/۵۸ و ۵۴/۸۴ درصد از نقاط لغزشی موجود در طبقه‌ی بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارد و طبق حاصل از روش MARCOS، ۵۱/۶۲ و ۲۹/۰۳ درصد از نقاط لغزشی در طبقه‌ی بسیار پرخطر و پرخطر می‌باشد. تطبیق سطوح لغزش یافته و پهنه‌های مواجه با خطر نشان می‌دهد که در خروجی حاصل از الگوریتم‌های مورد بررسی، مناطقی که در رده بسیار پرخطر، پرخطر قرار دارند، دارای بیشترین تعداد و درصد از سطوح لغزشی هستند. به علاوه در طبقات کم خطر معرفی شده توسط الگوریتم‌های چند معیاره مورد بررسی، تعداد محدودی از نقاط لغزش مشاهده می‌گردد و در طبقات بسیار کم خطر معرفی شده نیز، هیچ پراکنشی از نقاط لغزشی رخ داده در حوضه، دیده نمی‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به پراکنش زمین لغزش‌های موجود در هر یک از طبقات خطر، الگوریتم‌های مورد بررسی و به خصوص روش MARCOS با پوشش ۱۶ نقطه لغزشی در طبقه بسیار پرخطر، از دقت نسبی بالایی در ارزیابی خطر زمین لغزش برخوردار هستند.

جدول ۴: تعداد و درصد نقاط پراکنش لغزشی در هر طبقه خطر

مدل CODAS					
طبقه خطر	بسیار پرخطر	پرخطر	خطر متوسط	کم خطر	بسیار کم خطر
تعداد	۷	۱۷	۴	۳	-
درصد	۲۲/۵۸	۵۴/۸۴	۱۲/۹۰	۹/۶۸	-
مدل MARCOS					
طبقه خطر	بسیار پرخطر	پرخطر	خطر متوسط	کم خطر	بسیار کم خطر
تعداد	۱۶	۹	۴	۲	-
درصد	۵۱/۶۲	۲۹/۰۳	۱۲/۹۰	۶/۴۵	-

جهت مستندسازی بیشتر اعتبار نقشه‌های پهنه‌بندی، دقت هر یک از تکنیک‌های مورد استفاده، به وسیله‌ی منحنی ROC مورد ارزیابی قرار گرفته است. طبق نتیجه به دست آمده، دقت روش CODAS، با مساحت زیر منحنی ۰/۷۲، خیلی خوب است و دقت روش MARCOS، با مساحت زیر منحنی ۰/۸۱، عالی می‌باشد (شکل ۹).



شکل ۹: منحنی تشخیص عملکرد نسبی و سطح زیر منحنی مربوط به نقشه‌های پهنه‌بندی زمین لغزش حوضه بالادست سد یامچی

### نتیجه‌گیری

زمین‌لغزش از پدیده‌های مهم و قابل‌توجه در مسائل زیست‌محیطی، آب‌خیزداری و منابع طبیعی می‌باشد و زمانی که جوامع انسانی را تحت تأثیر قرار دهد، تبدیل به مخاطره خواهد شد. شناسایی مناطق مخاطره آمیز به منظور پیشگیری از وقوع مخاطره و همچنین برنامه ریزی در راستای مقابله با آن بسیار حائز اهمیت است. با توجه به اهمیت موضوع در این پژوهش به شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش پرداخته شده است. برای ارزیابی و شناسایی مناطق پرخطر با استفاده ویژگی-های طبیعی، انسانی و مورفولوژیکی از ده فاکتور موثر در وقوع زمین‌لغزش، شامل؛ فاصله از آبراهه، لیتولوژی، خاک، شیب، جهت شیب، طبقات ارتقاعی، بارش، کاربری اراضی، فاصله از راه ارتباطی و فاصله از گسل استفاده گردیده است. سپس با استفاده از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه بالادست سد یامچی، پرداخته شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، به ترتیب؛ عوامل شیب با وزن ۰/۱۴، کاربری اراضی با وزن ۰/۱۳ و لیتولوژی با وزن ۰/۱۲، بیشترین نقش را در وقوع زمین‌لغزش حوضه، به خود اختصاص دادند. بررسی‌های انجام‌گرفته در این تحلیل نشان دهنده‌ی این است که در حوضه بالادست سد یامچی، به دلیل کوهستانی بودن، کشت در اراضی شیب‌دار، چرای بیش از حد دام‌های در مراتع، وجود خاک‌های عمیق بر روی دامنه‌های پرشیب و نفوذ آب به لایه‌های زیرین خاک، زمینه‌ای مناسبی برای شکل‌گیری پدیده‌ی زمین‌لغزش به وجود آمده و خسارات زیادی را به دنبال خواهد داشت. با توجه به خروجی حاصل از روش CODAS، به ترتیب؛ ۱۳۹/۴۶ و ۵۸/۱۷ کیلومترمربع از مساحت حوضه و طبق نتایج حاصل از به کارگیری روش MARCOS، ۱۱۴/۰۱ و ۵۴/۰۷ کیلومترمربع از مساحت محدوده، در طبقه‌ی پرخطر و بسیار پرخطر قرار دارد. با توجه به پراکنش زمین‌لغزش‌های موجود در هر یک از طبقات خطر، الگوریتم‌های مورد بررسی، از دقت نسبی بالایی در ارزیابی خطر زمین‌لغزش برخوردار هستند. مقایسه مدل‌ها نسبت به یکدیگر، با توجه به نتایج حاصل از منحنی ROC، نشان داد، دقت روش CODAS، با مساحت زیر منحنی ۰/۷۲، خیلی خوب است و دقت روش MARCOS، با مساحت زیر منحنی ۰/۸۱، عالی می‌باشد. لذا نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌های MCDM در مطالعه حاضر، همانند نتایج حاصل از مطالعات؛ مددی و همکاران (۱۳۹۷)، انتظاری و همکاران (۱۳۹۸)، مددی و همکاران (۱۳۹۹)، نادری و همکاران (۱۴۰۰)، اصغری سراسکانرود و پیروزی (۱۴۰۱)، میشل و همکاران (۲۰۱۶)، گیگووایس و همکاران (۲۰۱۹)، دیکشیت و همکاران (۲۰۲۰)، صالح‌پور جم و همکاران (۲۰۲۱)، عملکرد خوب مدل‌های تحلیل چند معیاره را برای تولید خطر زمین‌لغزش، نشان می‌دهد. اما باید توجه داشت که همانند نتایج حاصل از پژوهش مددی و همکاران (۱۳۹۹)، که به ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره MABAC و CODAS، در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش پرداخته بودند، دقت روش CODAS در طبقه‌ی خیلی خوب قرار دارد. ولی دقت روش MARCOS، در مقایسه با روش CODAS در این پژوهش عالی به دست آمده است. همان‌گونه که می‌دانیم، هر یک از روش‌های مطالعه‌ی زمین‌لغزش‌ها به‌نوبه خود دارای مزایا و معایبی می‌باشند. این امر که یک روش در یک منطقه تا چه حد از کارایی برخوردار است به شرایط بسیاری از جمله، اقلیم و توپوگرافی و دیگر عوامل بستگی دارد. نتایج حاصل از پژوهش حاضر، با معرفی بهترین روش تحلیل چند معیاره، به منظور مطالعه خطر زمین‌لغزش، در امر انتخاب روش مناسب بررسی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه‌هایی با شرایط طبیعی و انسانی مشابه با محدوده حوضه بالادست سد یامچی، می‌تواند بسیار مفید بوده و مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد. در نهایت می‌توان ادعان داشت؛ انتظار می‌رود، این مطالعه و نتایج حاصل از این تحقیق، با معرفی مناطق دارای احتمال وقوع بالای زمین‌لغزش، راه‌گشایی برای اعمال مدیریت بهتر و علمی‌تر مدیران و برنامه‌ریزان ذی‌صلاح در این زمینه گردد و در نواحی با پتانسیل خطر بالا، با انجام اقدامات حفاظتی، آب‌خیزداری مناسب و البته کارشناسی شده توسط متخصصان، از وقوع زمین‌لغزش‌های احتمالی در سطح حوضه بالادست سد یامچی، جلوگیری شود.

## منابع

- اصغری سراسکانرود، ص، و پیروزی، الف، ۱۴۰۱. ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره WLC، OWA، VIKOR و MABAC در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه گیوی-چای استان اردبیل)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۴، شماره ۱، صص ۶۵-۹۴.
- انتظاری، م، خدادادی، ف، و ساسان‌پور، ف، ۱۳۹۸. تحلیل و پهنه‌بندی مخاطرات ژئومورفولوژیک (لغزش و سیل) استان البرز با استفاده از مدل‌های AHP-VIKOR و FR، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۱، شماره ۱، صص ۱۸۳-۱۹۹.
- پورطاهری، م، سبحانی قیداری، ح، و صادقلو، طاهره، ۱۳۹۰. ارزیابی تطبیقی روش‌های رتبه‌بندی مخاطرات محیطی در مناطق روستایی (مطالعه موردی: استان زنجان). فصلنامه پژوهش‌های روستایی. سال ۲. شماره ۳. صص ۳۱-۵۴.
- جمال آبادی، ج، صفری، ف، برآبادی، ع، و آل محمد، م، ۱۴۰۰. شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در دهستان ژاورود بر اساس مدل تلفیقی فازی و فرایند تحلیل شبکه، مدیریت بحران، دوره ۱۰، شماره ۲، صص ۴۷-۵۵.
- جهانگیری، ع، ۱۳۹۹. تحلیل روند آبرسانی به شهرها و روستاهای ایران و دفع فاضلاب از آن‌ها طی سال‌های ۹۱ تا ۹۷ با استفاده از رویکرد ترکیبی تصمیم‌گیری چند شاخصه. تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، دوره ۵، شماره ۲، صص ۲۳۳-۲۴۸.
- جهانگیری، ع، ۱۴۰۰. انتخاب بهترین فرآیند تصفیه‌ی فاضلاب در شهر فرمهین با استفاده از تصمیم‌گیری چند شاخصه. تصمیم‌گیری و تحقیق در عملیات، ۶ (شماره ویژه)، ۱-۱۱.
- شریفی پیچون، م، شیرانی، ک، و شیرانی، م، ۱۴۰۰. اولویت بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره‌ی خطی مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبریز وهرگان-غرب استان اصفهان، هیدروژئومورفولوژی، دوره ۸، شماره ۲۶، صص ۱۶۳-۱۳۹.
- محمدرضا، م، و فلاح قاله‌ری، غ.ع، ۱۳۹۷. شبیه‌سازی احتمال وقوع زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۱۸، شماره ۴۸، صص ۱۳۲-۱۱۷.
- مددی، ع، ۱۳۸۹. بررسی ناپایداری ژئومورفولوژیک گردنه صائین (بین شهر نیر و سراب، منطقه آذربایجان) با استفاده از روش آنبالگان، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۱، شماره ۱، صص ۷۷-۹۴.
- مددی، ع، پیروزی، الف، و شکرزاده فرد، الف، ۱۳۹۷. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه‌ی آبخیز آق‌لاقان-چای، با استفاده از مدل ELECTRE، فصلنامه‌ی فضای جغرافیایی، سال هجدهم، شماره ۶۴، صص: ۱۹۹-۱۷۷.
- مددی، ع؛ پیروزی، الف، و فعال نذیری، م، ۱۳۹۹. ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره MABAC و CODAS در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش؛ نمونه پژوهش: شهرستان کوثر. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۳۱، شماره ۴، صص ۱-۲۴.
- ملکی، ا، دهساری، م، و رضائی، پ، ۱۳۹۴. تنگناهای ژئومورفولوژیک توسعه کالبدی شهر جوانرود با استفاده از مدل منطق فازی. مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا. دانشگاه تربیت مدرس. دوره ۱۹، شماره ۴. صص ۱۵۹-۱۸۳.
- نادری، ف، ناصری، ب، و بسطامی، ن، ۱۴۰۰. کارایی مدل ویکور در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز سد گللال استان ایلام، جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۱۰، شماره ۱، صص ۳۹-۲۱.

- وثیق، ی.، ۱۳۹۰ بررسی زمین‌لغزش مسیر جاده اردبیل - سراب، نشریه آموزش زمین‌شناسی، دوره هفدهم، شماره ۱، صص ۲۳-۱۹.
- Aher, P., Adinarayana, J., & Gorantiwar, S.D., 2013. Prioritization of watersheds using multi-criteria evaluation through the fuzzy analytical hierarchy process, *Agric Eng Int CIGR J*, 15(1), 11-18.
- Alimohammadlou, Y., Najafi, A., & Yalcin, A., 2013. Landslide process and impacts: A proposed classification method, *Catena*, 104, 219-232.
- Alinezhad, A., & Khalili, J., 2019. *New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM)*. International Series in Operations Research & Management Science, vol 277, Springer, Cham.
- Arab Ameri, A., Pourghasemi, H.R., & Cerda, A., 2018. Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models, *Science of The Total Environment*, 613-614, 1385-1400.
- Baumgertel, A., Lukić, S., Belanović Simić, S., & Kadović, R., 2019. Identifying Areas Sensitive to Wind Erosion- A Case Study of the AP Vojvodina (Serbia), *Appl Sci*, 19 (23), 1-12.
- Bui, D.T., Lofman, O., Revhaug, I., & Dick, O., 2011. Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards*, 59(3), 1413-1444
- Chen, W., Panahi, M., & Pourghasemi, H.R., 2017. Performance evaluation of GIS-based new ensemble data mining techniques of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) with genetic algorithm (GA), differential evolution (DE), and particle swarm optimization (PSO) for landslide spatial modelling, *CATENA* 157, 310-324.
- Colkesen, I., Sahin, E., & Kavzoglu, Taskin., 2016. Susceptibility mapping of shallow landslides using kernel-based Gaussian process, support vector machines and logistic regression, *Journal of African Earth Sciences*, 118, 53-64.
- Crosta, B.G., 2009. Dating, triggering, modeling and hazard assessment of large landslides, *Geomorphology*, Vol 103, 1-4.
- Dikshit, A., Sarkar, R., Pradhan, B., Acharya, S., & Alamri, A.M., 2020. Spatial Landslide Risk Assessment at Phuentsholing, Bhutan. *Geosciences*, 10(4), 1-17.
- El Jazouli, A., Barakat, A., & Khellouk, R., 2019. GIS-multi-criteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). *Geoenvirom Disasters* 6, 3.
- Georgiou, D., Mohammed, E.S., & Rozakis, S., 2015. Multi-criteria decisionmaking on the energy supply configuration of autonomous desalination units. *Renew. Energy*, 75, 459-467.
- Gigovic, L., Drobnjak, S., & Pamucar, D., 2019. The Application of the Hybrid GIS Spatial Multi-Criteria Decision Analysis Best-Worst Methodology for Landslide Susceptibility Mapping. *ISPRS Int. J. Geo Inf.*, 8, 79.
- Gorsevski, P.V., Gessler, P.E., Foltz, R.B., & Elliot, W.J., 2006. Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and ROC analysis. *Transactions in GIS*, 10, 395-415.
- Hattanjai, T., & Moriwaki, H., 2009. Implications for forecasting travel distance of future landslides. *Geomorphology*, Volume 103, Issue 3, 447-454.
- Hoseini, H., 2019. Use fuzzy interface systems to optimize land suitability evaluation for surface and trickle irrigation. *Information Processing in Agriculture*, 6(1), 11-19.
- Kadavi, P., Lee, C.W., & Lee, S., 2018. Application of ensemble-based machine learning models to landslide susceptibility mapping, *Remote Sensing*, Vol 10, Issue 8, 1-18.

- Khan, H., Shafique, M., Khan, M., Mian, A., Safeer, U., & Chiara, C., 2019. Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 22 (1), 11-24.
- Mathew, M., & Sahu, S., 2018. Comparison of new multi-criteria decision making methods for material handling equipment selection, *Management Science Letters*, Vol 8, 139-150.
- Michael, E.A., & Samanta, S., 2016. Landslide vulnerability mapping (LVM) using weighted linear combination (WLC) model through remote sensing and GIS techniques, *Model. Earth Syst. Environ.* 2, 88.
- Nandi, A., & A. Shakoor., 2010. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses, *Engineering Geology*, 110, 11-20.
- Rabby, Y.W., Li, Y., Abedin, J., & Sabrina, S., 2022. Impact of Land Use/Land Cover Change on Landslide Susceptibility in Rangamati Municipality of Rangamati District, Bangladesh. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11 (89). 1-16.
- Roering, J. J., Kirchner, J. W., Dietrich, W. E., 2005. Characterizing structural and lithologic controls on deep-seated landsliding: Implications for topographic relief and landscape evolution in the Oregon Coast Range, USA. *Geological Society of America Bulletin*, 117(5-6), 654-668.
- Salehpour, Jam., Mosaffaie, A., & Sarfaraz, F., 2021. GIS-based landslide susceptibility mapping using hybrid MCDM models. *Nat Hazards*, 108, 1025-1046.
- Sorbi, A., & Farrokhnia, A., 2018. Landslide hazard evaluation and zonation of Karaj-CHaluse road (North of Iran), *International Journal of Geography and Geology*, 7 (2), 2305-7041.
- Tanyas, H., & Lombardo, L., 2019. Variation in landslide-affected area under the control of ground motion and topography, *Engineering Geology*, Vol 260, 1-13.
- Tuş, A., & Aytaç Adalı, E 2019. The new combination with CRITIC and WASPAS methods for the time and attendance software selection problem, *opsearch*, 56 (3), 528-538.