# بررسی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه نیرچای با استفاده از مدل ANP

موسی عابدینی [۱*]، لیلا اسمعیلی نیری [۲]، امیرحسام پاسبان [۳]، الناز پیروزی [۴]

۱*- استاد گروه جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۲- کارشناسی ارشد، رشته ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۳- دانشجوی دکترای، رشته ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۴- الناز پیروزی، دارای مدرک دکترای دانشکده علوم اجتماعی از دانشگاه محقق اردبیلی.

*ایمیل نویسنده مسئول: abedini@uma.ac.ir

تاریخ دریافت : ۱۴۰۱/۰۳/۲۱ تاریخ پذیرش : ۱۴۰۱/۰۲/۲۴

## چکیده

زمین‌لغزش یکی از مهم‌ترین فرایندهای ژئومورفولوژیکی دامنه‌ای می‌باشد که علاوه بر نقش قابل توجهی که در تحول و تکامل دامنه‌ها دارد گاها به عنوان یک مخاطره جدی نیز مطرح می‌گردد. در این رابطه، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش یکی از راهکارهای اساسی برای مدیریت کاهش خطرات این پدیده به‌شمار می‌رود. در پژوهش حاضر خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای، واقع در استان اردبیل، مورد ارزیابی قرار گرفت. روش‌شناسی پژوهش مبتنی بر مدل فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌باشد. بدین منظور تعداد ۱۰ متغیر موثر بر وقوع زمین‌لغزش شامل متغیرهای شیب، جهت شیب، ارتفاع، طول دامنه، تحدب سطح زمین، سازندهای زمین‌شناسی، بارش، فاصله از آبراهه، پوشش گیاهی و کاربری اراضی وارد مدل گردیدند. نتایج نشان می‌دهد که سه متغیر شیب (با وزن ۰/۲۱۷)، لیتولوژی (با وزن ۰/۲۱۷) و بارش (با وزن ۰/۱۶۷) از بیشترین میزان اهمیت برخوردار بوده و در واقع، کنترل‌کننده‌های اصلی فرایند زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای به شمار می‌روند. نتایج پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش نیز حاکی از این است که حدود ۹/۸ درصد از سطح حوضه نیرچای در کلاس خطر بسیار زیاد و درحدود ۱۹/۳ درصد آن نیز در کلاس خطر زیاد قرار می‌گیرد. پهنه‌های بسیار پرخطر و پرخطر عمدتا در قسمت‌های میانی حوضه نیرچای پراکنده شده‌اند. در این قسمت از حوضه، متغیرهای مختلفی از قبیل شیب مناسب (مخصوصا ۲۰ تا ۴۰ درصد)، سازندهای زمین‌شناسی آسیب‌پذیر، ارتفاع متوسط، دریافت نزولات جوی مطلوب، تراکم زهکشی بالا و غیره باعث افزایش پتانسیل وقوع زمین‌لغزش گردیده است.

## کلمات کلیدی

"پهنه‌بندی"، "زمین‌لغزش"، "مدل ANP"، "GIS"، "نیرچای".

## مقدمه

زمین لغزش‌ها، پدیده‌هایی خطرناک و فاجعه‌بار به‌شمار می‌روند (هاک و همکاران، ۲۰۱۹). که هر ساله اثرات زیادی ازجمله خسارت‌های اقتصادی، تخریب زیرساخت‌ها و شکست زیست محیطی بر جوامع بشری وارد می‌کند (چن[1] و همکاران، ۲۰۱۷). عوامل مختلفی بر وقوع این پدیده تأثیر دارند که در این میان می‌توان به شدت و مدت بارندگی، پراکنش فضایی پوشش گیاهی، توپوگرافی، شرایط خاک، واحدهای زمین شناختی ، هیدرولوژی و فعالیت‌های انسان اشاره کرد (اقدم و همکاران، ۲۰۱۷). مطالعات درمورد زمین لغزش بیانگر این است که زمین لغزش مخاطره‌ای است که اغلب به فراوانی روی می‌دهد و در همهٔ قاره‌ها وجود دارد و برای انسان‌ها، زیرساخت‌ها و محیط زیست تهدید جهانی است (بروک و همکاران، ۲۰۱۸). در این خصوص تولید نقشه‌های دقیق منطقه بندی حساسیت به زمین لغزش از موضوعات مهم برای مطالعات مدیریت خطر است (کلوکسین و همکاران، ۲۰۱۶). در دهه‌های اخیر با توجه به روند افزایشی خسارت-های ناشی از سوانح طبیعی، بالاخص زمین‌لغزش، مقوله پیش‌بینی و جلوگیری از خسارت‌های وارده به طور جدی مطرح گردیده است (ایزدی و انتظاری، ۱۳۹۲). در این پژوهش خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. حوضه آبریز نیرچای در حدود ۱۷۰ کیلومتر مربع از دامنه‌های جنوبی توده آتشفشانی سبلان را زهکشی می‌کند. چندین توده لغزشی بزرگ در محدوده این حوضه وجود دارد که نشان از مستعد بودن حوضه مذکور نسبت به وقوع زمین‌لغزش دارد. عدم توجه به این مهم در برنامه‌ریزی‌های عمران منطقه‌ای می‌تواند نتایج غیرقابل جبرانی را به همراه داشته باشد. بنابراین، در پژوهش حاضر به پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح این حوضه اقدام می‌شود که می‌تواند پهنه‌های پایدار و ناپایدار از نظر وقوع زمین‌لغزش را شناسایی نماید. تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای از طریق ترکیب و روی‌هم‌گذاری متغیرهای موثر بر رخداد این پدیده با استفاده از مدل فرایند تحلیل شبکه (ANP) و در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) صورت گرفت. در طی سال‌های اخیر تحقیقات بیشماری در رابطه با ارزیابی مکانی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش صورت گرفته است. در ادامه تنها به چند مورد از این تحقیقات که به نوعی با روش‌شناسی مورد استفاده در پژوهش حاضر مرتبط هستند اشاره‌ای مختصر می‌شود. امیراحمدی و همکاران (۱۳۹۴)، به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای (ANP) در حوضه پیوه‌ژن دامنه جنوبی بینالود پرداختند. در این راستا تعداد ۱۰ لایه موضوعی در تهیه نقشه خطر وقوع زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفتند. یافته‌ها حاکی از این است که فاکتورهای فاصله از رودخانه و فاصله از جاده به ترتیب بالاترین امتیاز وزنی (۰/۲۲۸ و ۰/۲۰۴) و دو لایه شیب و جهت شیب پایین‌ترین وزن (۰/۰۱۲ و ۰/۰۲۱) را کسب نمودند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل ANP می‌تواند به‌عنوان مدلی مطلوب و کارآمد به منظور پیش‌بینی خطر وقوع زمین-لغزش مورد استفاده قرار گیرد. اسفندیاری و بهشتی جاوید (۱۳۹۵)، در

[1] Chen et al

پژوهشی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در منطقه گردنه حیران اردبیل را مورد بررسی قرار دادند. جهت انجام این کار از ترکیب مدل‌های چندمعیاره (فرآیند تحلیل شبکه) و آماری (قضیه‌ی بیز) و ۱۲ پارامتر موثر بر رخداد زمین‌لغزش استفاده شد. نتیجه‌ی کار به صورت یک نقشه‌ی طبقه‌بندی شده در پنج طبقه است که به ترتیب پهنه‌های با پتانسیل وقوع زمین‌لغزش بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد را شامل می‌شود. عابدینی و همکاران (۱۳۹۸)، در پژوهشی خطر زمین‌لغزش در پهنه گسلی قوشاداغ-ارسباران را با استفاده از مدل‌های ANP و LR مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. بدین منظور ۱۴ فاکتور مؤثر در وقوع زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در وقوع زمین‌لغزش‌ها، عامل فاصله از گسل و بارش بیشترین و کاربری زمین کمترین نقش را داشته‌اند. یوسفی و یاراحمدی (۱۳۹۸)، به منظور ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل ترکیبی تحلیل شبکه‌ای (ANP) و منطق فازی در حوضهٔ صلوات‌آباد سنندج پرداختند. نتایج نشان داد که از میان ۸ عامل بررسی‌شده روی وقوع زمین‌لغزش، معیارهای شیب و زمین‌شناسی به‌ترتیب با وزن‌های ۰/۲۴۳ و ۰/۱۹۴، بیشترین وزن را در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش به خود اختصاص دادند. جعفری و همکاران (۱۳۹۸)، با استفاده از روش فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز بدرانلو پرداختند. بر اساس این پژوهش، مهمترین فاکتورهای موثر بر رخداد زمین‌لغزش‌های حوضه مطالعاتی شیب دامنه، لیتولوژی، فاصله از رودخانه و بارندگی سالانه می‌باشند. جمال آبادی و همکاران (۱۳۹۹)، به منظور شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمینلغزش در دهستان ژاورود براساس مدل تلفیقی فازی و فرایند تحلیل شبکه (ANP) پرداختند. نتایج نشان داد منطقه از نظر پتانسیل لغزش در ۴ رده طبقه‌بندی و میزان لغزش‌پذیری منطقه از خیلی زیاد (۷/۵ درصد)، زیاد (۲۷ درصد)، متوسط (۳۱ درصد) و کم (۳۴/۵ درصد) متغیر است. کیانی و همکاران (۱۴۰۰)، به منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و آنفیس در حوضه آبریز هشتجین استان اردبیل پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که دقت مدل آنفیس و رگرسیون لجستیک به‌ترتیب برابر ۸۸/۲۳٪ و ۸۶/۴۵٪ بوده است. همچنین نتایج براساس مدل آنفیس بیانگر آن است که حدود ۴۸۵۴ هکتار، معادل ۲۰/۶٪ از منطقه هشتجین از نظر مخاطره زمین لغزش در کلاسه زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. یالچین[1] (۲۰۰۸)، به تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش براساس سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و کاربست فرایند تحلیل سلسله مراتبی و روش‌های آماری دومتغیره در آردسن ترکیه اقدام نمود. نتایج این تحقیق حاکی از این است که سه متغیر شیب، زمین‌شناسی و پوشش زمین دارای اهمیت بیشتری در رابطه با رخداد زمین لغزش در منطقه مطالعاتی می‌باشند. گمیتزی[2] و همکاران (۲۰۱۱)، به ارزیابی پهنه‌های مستعد زمین‌لغزش با استفاده از متغیرهای محیطی در شهر تـرس یونان پرداختند. در راستای اهداف تحقیق از توابع عضویت فازی در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بهره گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان داد که زاویـه‌ی شیب کنترل‌کننده اصلی وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی می‌باشد.

آنبالاگان[3] و همکاران (۲۰۱۵)، به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در دره لاچونگ[4] هیمالیا با استفاده از نسبت فراوانی و منطق فازی پرداختند. آنها در این تحقیق از تصاویر دورسنجی برای استخراج فاکتورهای موثر بر رخداد زمین‌لغزش و توزیع فضایی زمین‌لغزش‌ها استفاده به عمل آوردند. نتایج نشان داد که زاویه شیب بالا (بین ۳۵ تا ۴۵ درجه)، طبقات با درجه ناهمواری نسبی بالا، جهت‌های جنوبی، جنوب شرقی و جنوب غربی، فاصله بین ۰ تا ۱۵۰ متری از آبراهه‌ها، لیتولوژی مرتبط با شیست‌ها، خاک‌های لومی، اراضی آیش و پوشش گیاهی پراکنده زمین‌لغزش‌های منطقه را در کنترل خود دارند. حمزه[5] و همکاران (۲۰۱۷)، در مقاله‌ای مخاطرات زمین‌لغزش در مرکز اتیوپی را با بهره-گیری از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی مورد ارزیابی قرار دادند و یک نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش برای منطقه مورد مطالعه ارائه نمودند. ووجتکووا و ووجتک[6] (۲۰۲۰)، حساسیت زمین‌لغزش در بخشی از اسلوواکی را با کاربست تحلیل چندمعیاره و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مورد ارزیابی قرار دادند. بدین منظور متغیرهای موثر بر زمین‌لغزش را با استفاده از وزن‌های حاصل از مدل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) در بستر GIS ترکیب نمودند و نقشه پهنه-بندی خطر زمین‌لغزش را تهیه نمودند. پسومیادیس[7] و همکاران (۲۰۲۰) به تهیه نقشه و ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش قسمت‌های غربی جزیره کرت[8] پرداختند. در این تحقیق از روش‌های تحلیل مکانی و داده‌های دورسنجی برای بررسی تأثیر عوامل مختلف فیزیکی و انسانی بر روی زمین‌لغزش و ارزیابی حساسیت به زمین‌لغزش استفاده شد. برای ارزیابی شاخص حساسیت به زمین‌لغزش (LSI) از روش نیمه‌کمی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و ترکیب خطی وزنی (WLC) بهره گرفته شد.

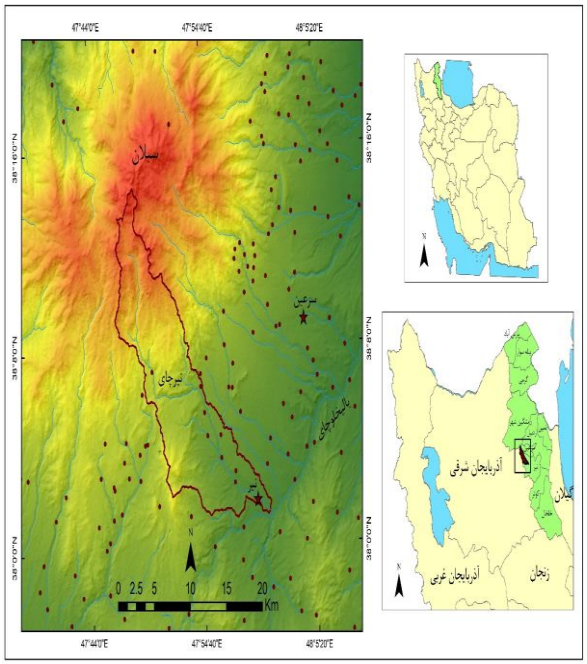
## ۱- روش انجام تحقیق

### • محدوده مورد مطالعه

در پژوهش حاضر به پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای (آغلاغان‌چای) پرداخته می‌شود. حوضه مطالعاتی در مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۱ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی واقع شده و جزو زیرحوضه‌های بالیخلوچای محسوب می‌گردد. نیرچای از نظر سیاسی- اداری در محدوده شهرستان‌های نیر و سرعین در استان اردبیل و سراب در استان آذربایجان شرقی قرار گرفته است. البته بخش اعظم این حوضه در محدوده شهرستان نیر واقع شده است (شکل ۱). حوضه مطالعاتی دارای شکلی کشیده بوده و با روند کلی شمال غرب – جنوب شرق قسمت‌هایی از دامنه جنوبی توده آتشفشانی سبلان را مورد زهکشی قرار می‌دهد. مساحت حوضه آبریز نیرچای بالغ بر ۱۷۰ کیلومتر مربع و محیط آن در حدود ۱۱۴ کیلومتر می‌باشد. رودخانه نیرچای با

[1] - Yalcin
[2] - Gemitzi
[3] - Anbalagan
[4] - Lachung
[5] - Hamza
[6] - Vojtekova & Vojtek
[7] - Psomiadis
[8] - Crete Island

طولی درحدود ۴۲ کیلومتر مهم‌ترین آبراهه حوضه مطالعاتی به شمار می‌رود که از اراضی پوشیده از برف پیرامون قله سبلان سرچشمه می‌گیرد. این رودخانه پس از دریافت انشعابات مختلف از شهر نیر عبور کرده و وارد رودخانه بالیخلوچای می‌گردد. در محدوده حوضه آبریز نیرچای تعداد هشت روستا و یک شهر (شهر نیر) استقرار یافته‌اند. در این میان، شهر نیر با جمعیتی بالغ بر ۵۸۷۳ نفر (مطابق سرشماری سراسری سال ۱۳۹۵) مهم‌ترین سکونتگاه این حوضه محسوب می‌گردد. قسمت‌هایی از سکونتگاه‌های حوضه مطالعاتی بر روی اراضی شیب‌دار حوضه توسعه یافته‌اند که اهمیت مطالعات مرتبط با ناپایداری‌های دامنه‌ای را برجسته می‌نماید.




**شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز نیرچای در شمال غرب کشور**

## • مواد و روش

در این تحقیق تعداد ۱۰ متغیر به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفت. این متغیرها عبارتنداز: بارش، فاصله از رودخانه، زمین‌شناسی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاکتور طول دامنه، تحدب سطح زمین، کاربری اراضی و پوشش گیاهی. برای آماده‌سازی و تهیه این متغیرها از داده‌هایی بدین شرح بهره گرفته شد: متغیرهای ارتفاع، شیب، جهت شیب، طول دامنه و تحدب سطح زمین از روی تصویر مدل رقومی ارتفاع منطقه (DEM) با قدرت تفکیک ۲۷ متر استخراج گردیدند. از طریق این تصاویر آبراهه‌های منطقه نیز با استفاده از ابزار Hydrology نرم‌افزار ArcGIS استخراج گردید. سازندهای زمین‌شناسی از روی نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (برگه مشگین‌شهر) در محیط نرم‌افزار ArcGIS رقومی گردید. با توجه به اینکه در سطح حوضه آبریز نیرچای گسلی بر روی نقشه زمین‌شناسی مذکور وجود ندارد و درنتیجه متغیر فاصله از گسل در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش حوضه مشارکت داده نشد. لایه کاربری اراضی حوضه مطالعاتی از طریق تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث منطقه استخراج گردید. برای تهیه نقشه پوشش گیاهی حوضه مطالعاتی از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel (سنتینل) با قدرت تفکیک ۱۰ متر (اوایل تابستان ۱۳۹۹) بهره گرفته شد. در نهایت، برای تهیه توزیع فضایی بارش منطقه از نقشه لایه هم‌بارش استان اردبیل (تهیه شده توسط آب منطقه‌ای استان اردبیل) استفاده به عمل آمد. در تحقیق حاضر به منظور پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای از مدل فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در قالب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بهره گرفته شد. در ادامه کار توضیحاتی در خصوص مدل مورد استفاده ارائه می‌گردد. فرایند تحلیل شبکه‌ای، یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره محسوب می‌گردد و در مجموعه مدل‌های جبرانی قرار می‌گیرد. این مدل بر مبنای فرایند تحلیل سلسله مراتبی طراحی گردیده و در آن، شبکه جایگزین سلسله مراتب شده است. فرایند تحلیل شبکه برعکس روش تحلیل سلسله مراتبی ساختاری غیرخطی دارد و وابستگی درون‌خوشه‌ای و وابستگی میان‌خوشه‌ای را مورد توجه قرار می‌دهد. دلیل موفقیت مدل، همبستگی بالای نتایج آن با دنیای واقعی و تصمیم‌گیری مردمی و در دنیای واقعی با پیچیدگی‌هایش می‌باشد. این مدل به منظور پر کردن خلا عدم ایجاد ارتباطات بین عناصر و معیارها در مدل سلسله مراتبی معرفی شد و مبنای آن شکل‌دهی یک شبکه‌ای از ارتباطات و وابستگی‌ها و پیوندها و بین عناصر و خوشه‌ها می‌باشد (فرجی سبکبار، ۱۳۹۲). برای استخراج وزن‌های لایه‌های موضوعی موثر بر رخداد زمین‌لغزش بر اساس مدل مبتنی بر فرایند تحلیل شبکه (ANP) مراحلی به شرح زیر طی می‌شود:

**گام ۱:** طراحی ساختار مدل و مساله مورد بررسی: در مرحله نخست می‌بایست مساله پژوهش به روشنی مشخص شده و در چارچوب یک سیستم منطقی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. در پژوهش حاضر معیارهای تحقیق به سه خوشه قابل تقسیم می‌باشند. خوشه زمین‌شناسی- ژئومورفولوژیکی که شامل معیارهای سازندهای زمین‌شناسی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، تحدب سطح زمین و طول دامنه می‌باشد؛ خوشه هیدرواقلیم که شامل معیارهای توزیع فضایی بارش و فاصله از رودخانه می‌باشد؛ خوشه پوشش زمین که شامل معیارهای کاربری اراضی و پوشش گیاهی می‌باشد. زیرمعیارهای تحقیق نیز شامل طبقات هر یک از معیارهای مذکور می‌باشد.

**گام ۲:** مقایسات زوجی و محاسبه وزن نسبی: در مدل فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) محاسبه مقادیر اهمیت نسبی مشابه با مدل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) بوده و با کمک طیف ۱ تا ۹ صورت می‌پذیرد (قنبری و روستایی، ۱۳۹۲). بدیهی است که در طی این فرایند بالاترین وزن یا ارجحیت به تاثیرگذارترین متغیر در رابطه با رخداد زمین‌لغزش اختصاص داده می‌شود. در نرم‌افزار Super Decisions این کار به طرق مختلف (عددی، گرافیکی و شفاهی) قابل انجام است. پس از اینکه وزن‌های نسبی هر معیار از طریق مقایسات زوجی حاصل شد؛ به منظور اعتبارسنجی مقایسات صورت گرفته می‌بایست نرخ ناسازگاری محاسبه شود. در صورتی که نرخ ناسازگاری کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ گردد سازگاری سیستم قابل قبول می‌باشد و اگر بیشتر از ۰/۱ گردد بهتر است تصمیم‌گیرنده در قضاوت‌های خود تجدید نظر نماید (دی و رامچارن[1]، ۲۰۰۰). این محاسبات توسط نرم‌افزار Super Decisions به صورت اتوماتیک محاسبه می‌گردد.

[1] - Dey & Ramcharen

**گام ۳:** تشکیل سوپرماتریس اولیه: برای دستیابی به اولویت‌های کلی در یک سیستم با تاثیرات متقابل، بردارهای اولویت‌های داخلی (یعنی w های محاسبه شده) در ستون‌های مناسب یک ماتریس وارد می‌گردند. در نتیجه، یک سوپر ماتریس (در واقع یک ماتریس تقسیم‌بندی شده) که هر بخش از این ماتریس ارتباط بین دو خوشه در یک سیستم را نشان می‌دهد، به دست می‌آید.

**گام ٤:** تشکیل سوپرماتریس وزنی: در گام بعدی برای اینکه سوپرماتریس فوق (اولیه) تبدیل به سوپرماتریس وزن‌دهی شده گردد می‌بایست سوپرماتریسی تشکیل شود که مجموع ستون‌های آن برابر با ۱ باشد (که ماتریس تصادفی نیز نامیده می‌شود). در واقع، ماتریس وزنی از حاصل‌ضرب داده‌های ماتریس خوشه‌ای در سوپرماتریس وزن‌دهی نشده و نرمالیزه نمودن ماتریس حاصل شده به دست می‌آید (داداش‌پور و همکاران، ۱۳۹۱).

**گام ۵:** محاسبه بردار وزنی عمومی (ماتریس حد): در این مرحله، سوپرماتریس موزون (وزنی) به توان حدی می‌رسد تا عناصر ماتریس همگرا شده و مقادیر سطری آن با هم برابر شوند. بر اساس ماتریس به دست آمده، بردار وزن عمومی مشخص می‌گردد (مکانیکی و صادقی، ۱۳۹۱). سرانجام با مراجعه به جدول سوپرماتریس حد، وزن نهایی هر معیار و زیرمعیار حاصل می‌گردد. هر یک از معیارها با توجه به وزن‌های حاصل شده در محیط نرم‌افزار ArcGIS طبقه‌بندی مجدد می‌شوند. در نهایت، معیارهای مورد استفاده (معیارهای بازطبقه‌بندی شده) با توجه به وزن‌های حاصل از مدل ANP ترکیب می‌شوند و نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش حاصل می‌گردد.

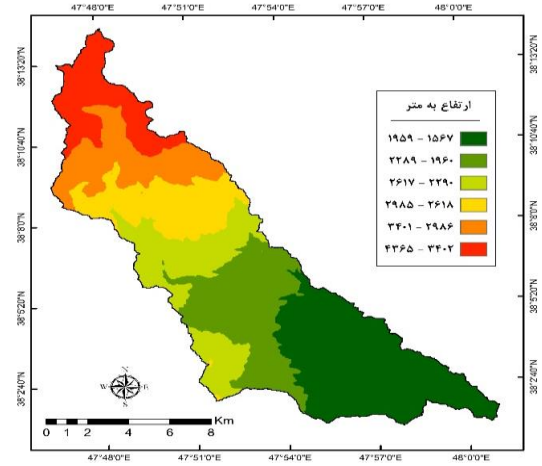
## ۳- نتایج

### • ارزیابی توزیع فضایی متغیرهای موثر بر زمین‌لغزش

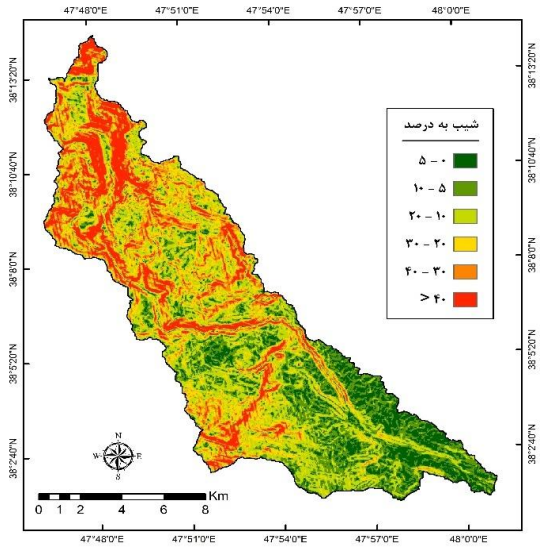
در این بخش به ارزیابی مکانی متغیرهای موثر بر زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای پرداخته می‌شود:

ارتفاع: توزیع ارتفاعات حوضه آبریز نیرچای در شکل ۲، ارائه شده است. طبقات ارتفاعی پایین‌دست و بالادست حوضه از میزان اهمیت پایین‌تری درخصوص رخداد زمین‌لغزش برخوردارند. در واقع، ارتفاع پایین و وجود اراضی کم‌شیب در قسمت‌های پایین‌دست حوضه مطالعاتی تا حد زیادی به عنوان یک عامل محدودکننده زمین‌لغزش مطرح می‌باشد زیرا نقش چندانی در افزایش بارش، تراکم پوشش گیاهی و سایر متغیرهای تاثیرگذار بر رخداد زمن‌لغزش ایفا نمی‌کند. در ترازهای ارتفاعی بسیار مرتفع حوضه نیز خشونت عناصر اقلیمی و غلبه مورفولوژی تند و پرتگاهی باعث تبدیل فرایندهای لغزشی به سایر فرایندهای ناپایداری دامنه‌ای از قبیل سقوط‌سنگ‌ها و واژگونی‌ها می‌گردد. بنابراین در فرایند مقایسات زوجی از وزن کمتری برخوردار شده‌اند. بدین ترتیب، می‌توان گفت که رخداد زمین‌لغزش در ترازهای میانی حوضه از احتمال وقوع بالاتری برخوردار می‌باشند. بخش عمده‌ای از زمین‌لغزش‌های منطقه نیز در این ترازهای ارتفاعی واقع شده‌اند؛ از اینرو از وزن بالاتری نیز برخوردار شده‌اند.

شیب: متوسط شیب در سطح حوضه مطالعاتی درحدود ۲۱ درصد می‌باشد که حاکی از پرشیب بودن حوضه است. در حالت کلی، شیب زیاد حوضه نشان‌دهنده پتانسیل بالای ناپایداری‌های دامنه‌ای- مخصوصا زمین‌لغزش- می‌باشد. تنها در حدود ۱۱ درصد از سطح حوضه نیرچای دارای شیب‌های کمتر از ۵ درصد است. از نظر توزیع فضایی، بخش قابل توجهی از این اراضی در قسمت‌های پایین‌دست حوضه پراکنده شده‌اند (شکل ۳). بنابراین، از نظر متغیر شیب احتمال وقوع زمین‌لغزش در این پهنه‌ها کاهش پیدا می‌کند و مطابق مدل ANP کلاس شیب ۰ تا ۵ درصد با وزن ۰/۰۰۹ از کم‌ترین میزان اهمیت در رابطه با رخداد زمین‌لغزش برخوردار می‌باشد. طبقه شیب ۵ تا ۱۰ درصد بالغ بر ۱۸ درصد از سطح حوضه را دربرمی‌گیرد. این طبقه شیب نیز با ضریب ۰/۰۳۴ از وزن بالایی در رخداد زمین‌لغزش برخوردار نمی‌باشد. با افزایش شیب بر احتمال وقوع زمین‌لغزش افزوده می‌شود. در این رابطه، طبقه شیب ۳۰ تا ۴۰ درصد با ضریب ۰/۳۱۲ از بیشترین میزان اهمیت در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه برخوردار است. اکثر زمین‌لغزش‌های حوضه مطالعاتی نیز در این طبقه شیب رخ داده‌اند. طبقه شیب بیشتر از ۴۰ درصد وزن نسبتا کمتری (با مقدار ۰/۲۹۹) را نسبت به طبقه مذکور کسب نموده است. علت این امر مربوط به مورفولوژی پرتگاهی این طبقه است که بخش عمده‌ای از ناپایداری‌های دامنه‌ای در این طبقه جزو زمین‌لغزش نبوده و عمدتا جزو ناپایداری‌هایی مانند سقوط منفرد سنگ‌ها و غیره قرار می‌گیرد.



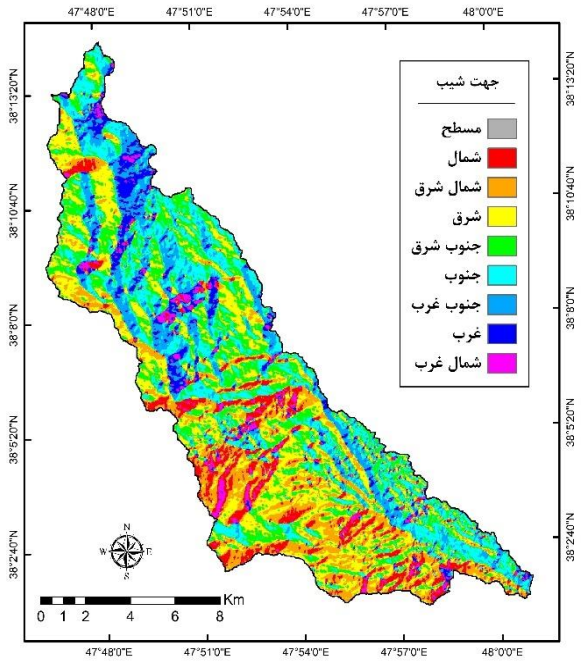

**شکل ۲- توزیع فضایی ارتفاع در حوضه نیرچای**



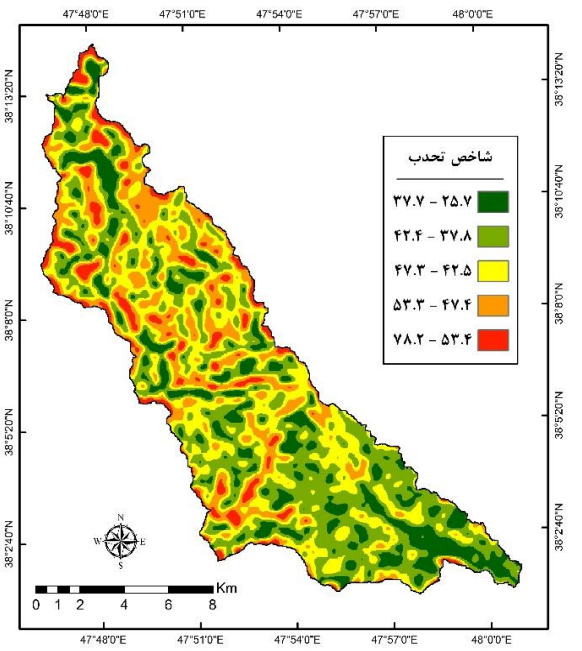

**شکل ۳- توزیع فضایی شیب در حوضه نیرچای**

جهت شیب: حوضه نیرچای بخش‌هایی از دامنه‌های جنوبی سبلان را زهکشی می‌کند؛ به همین دلیل، جهت‌های جنوبی با حدود ۱۸ درصد، جهت‌های جنوب شرقی با حدود ۲۰ درصد و جهت‌های جنوب غربی با حدود ۱۲ درصد سهم قابل‌توجهی از جهات جغرافیایی حوضه آبریز نیرچای را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴). با این حال، از نظر فرایند زمین‌لغزش شیب‌های مذکور از درجه اهمیت پایینی برخوردار می‌باشند. شیب‌های شمالی، شمال شرقی و شمال غربی از بیشترین میزان اهمیت در وقوع زمین‌لغزش برخوردارند و به ترتیب درحدود ۸، ۱۴ و ۳ درصد از سطح حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. وزن شیب‌های شمالی ۰/۳۱۴، وزن شیب‌های شمال شرقی ۰/۲۲۱ و وزن شیب‌های شمال غربی ۰/۱۵۹ می‌باشد و درنتیجه، به صورت محلی از اهمیت بالاتری در رخداد زمین‌لغزش برخوردارند.

تحدب سطح زمین: در پژوهش حاضر برای دخالت دادن شکل دامنه‌ها در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش از شاخص تحدب سطح زمین استفاده به عمل آمد. شاخص تحدب سطح زمین[1] برای نخستین بار توسط ایواهاشی و پیکه[2] (۲۰۰۷) با هدف طبقه‌بندی عوارض زمین ارائه گردید. مقادیر بالاتر این شاخص دلالت بر سطوح با تحدب بالا و مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده سطوح با تحدب پایین می‌باشندحوضه آبریز نیرچای براساس مقادیر شاخص تحدب سطح زمین به پنج کلاس طبقه‌بندی شده است (شکل ۵). کلاس اول با مقادیر تقریبی ۲۶ تا ۳۸ دارای کم-ترین میزان شاخص تحدب می‌باشد. این سطوح در واقع سطوح مقعر حوضه مطالعاتی بوده و عمدتا منطبق بر بستر دره‌های منطقه می‌باشند. در قسمت‌های بالادست حوضه وجود این سطوح نشانه‌ای از دره‌های U شکل می‌باشد که حاکمیت فرایندهای یخچالی در طی دوره‌های یخچالی کواترنری را نشان می‌دهد. این سطوح به دلیل تحدب بسیار اندک از پتانسیل پایینی جهت وقوع زمین‌لغزش برخوردار می‌باشند و بنابراین وزن ۰/۰۱۳ را در مدل ANP کسب نموده‌اند که پایین‌ترین وزن در بین کلاس‌های شاخص تحدب می‌باشد. با افزایش تحدب سطح زمین بر احتمال وقوع زمین‌لغزش نیز افزوده می‌شود و درنتیجه وزن آنها در مدل ANP افزایش پیدا می‌کند. در این رابطه، سطوح با مقادیر تحدب ۵۳ تا ۷۸ با وزنی بالغ بر ۰/۴۱۲ از بیشترین میزان اهمیت در رابطه با رخداد زمین‌لغزش برخوردار می‌باشند. سطوح با شاخص تحدب ۴۷ تا ۵۳ نیز با وزن ۰/۳۱۰ در مرتبه بعدی اهمیت قرار می‌گیرند.




**شکل ٤- توزیع فضایی جهت شیب در حوضه نیرچای**




**شکل ۵- توزیع فضایی شاخص تحدب در حوضه نیرچای**

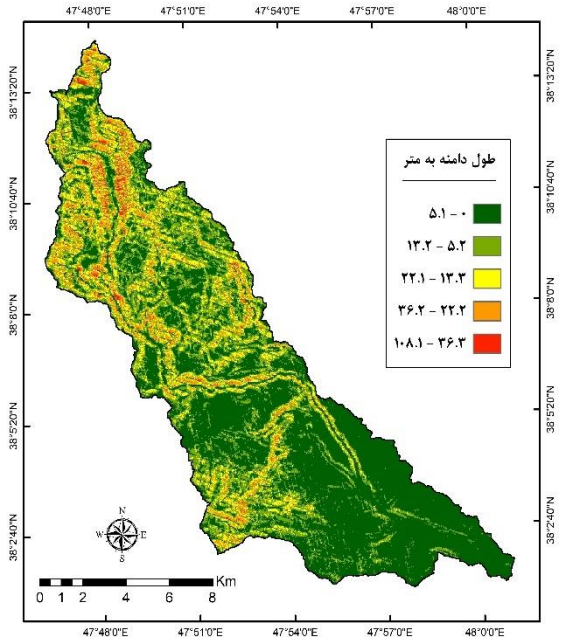
طول دامنه: لایه موضوعی طول دامنه با بهره‌گیری از لایه‌های موضوعی شیب و تجمع جریان حوضه مطالعاتی استخراج گردید. برای اینکار از رابطه زیر بهره گرفته شد (لوکا[3] و همکاران، ۲۰۱۱: ۲۹۷-۳۰۸):

رابطه۱: $LSF=(fa*Cell_size/22.3)^{0.4}*(Sin\sigma/0.0896)^{1.3}$

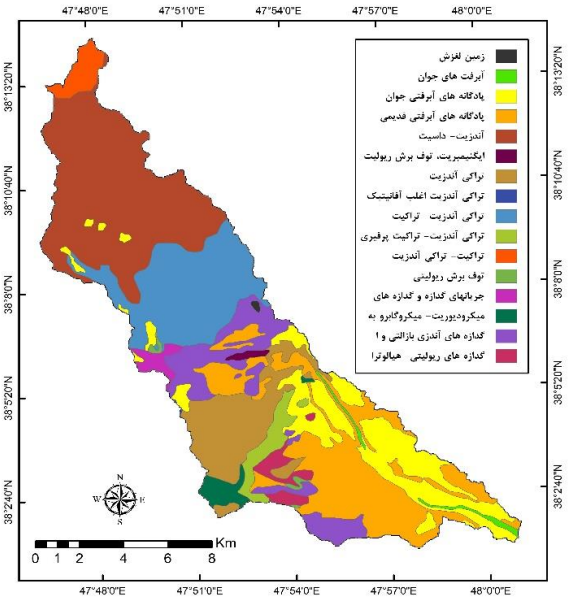
[1] - Terrain Surface Convexity
[2] - Iwahashi & Pike
[3] - Luca

که در آن: LSF: فاکتور طول دامنه و Fa: تجمع جریان می‌باشد. مقادیر طول دامنه در سطح حوضه آبریز نیرچای از حداقل ۰ تا حداکثر ۱۰۸/۱ متغیر است (شکل ۶). حوضه مطالعاتی براساس مقادیر این شاخص به پنج کلاس طبقه‌بندی گردید. می‌توان بیان داشت که رابطه-ای مستقیم بین طول دامنه و ناپایداری‌های دامنه‌ها و فرسایش وجود دارد؛ بدین ترتیب طول دامنه بالاتر به فرسایش و ناپایداری‌های دامنه‌ای بیشتر منجر می‌گردد. بنابراین، در حوضه آبریز مطالعاتی سطوحی که از مقادیر طول دامنه بیشتری برخوردار هستند دارای پتانسیل بالاتری جهت وقوع زمین‌لغزش می‌باشند. بدیهی است که در طی فرایند مقایسات زوجی طبقه با بالاترین میزان فاکتور طول دامنه (کلاس ۳۶/۳ تا ۱۰۸/۱) از بالاترین میزان اهمیت برخوردار است و وزن ۰/۴۰۷ را کسب نموده است. این در حالی است که طبقه با پایین‌ترین مقادیر طول دامنه (کلاس ۰ تا ۵/۱) از کمترین میزان اهمیت برخوردار بوده و وزن ۰/۰۱۴ را به خود اختصاص داده است.

زمین‌شناسی: به طور کلی سازندهای موجود در سطح حوضه مطالعاتی را می‌توان به دو دسته سنگ‌های آذرین و آبرفت‌های کواترنری تقسیم-بندی کرد. قسمت‌های میانی و بالادست حوضه به طور عمده شامل سنگ‌های آتشفشانی مرتبط با فعالیت‌های آتشفشانی سبلان می‌باشند. آبرفت‌های کواترنری نیز به طور عمده در قسمت‌های پایین‌دست حوضه پراکنده شده‌اند (شکل ۷). پادگانه‌های آبرفتی قدیمی با وزن ۰/۳۱۲ از بیشترین میزان اهمیت در رابطه با رخداد زمین‌لغزش برخوردار می‌باشند. این واحد درحدود ۱۱ درصد از سطح حوضه مطالعاتی را پوشش می-دهند. وزن بالاتر این سازند به دلیل قرارگیری در ارتفاع بالاتر و توانایی آن در جذب آب می‌باشد. این در حالی است که پادگانه‌های آبرفتی جوان با مساحتی در حدود ۱۴ درصد به دلیل قرارگیری در سطوح ارتفاعی پایین از پتانسیل اندکی جهت وقوع زمین‌لغزش برخوردار می-باشند و بدین ترتیب وزن ۰/۰۲۴ را کسب نموده‌اند. گدازه‌های ریولیتی، آندزیتی و بازالتی در منطقه مطالعاتی به شدت تحت تاثیر فرایندهای هوازدگی قرار گرفته‌اند و درنتیجه به دلیل فراهم نمودن مواد منفصل ریز و درشت از پتانسیل نسبتا بالایی جهت وقوع زمین‌لغزش برخوردار می‌باشند. بخش قابل توجهی از زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی نیز بر روی این واحد اتفاق افتاده‌اند. بنابراین، واحد مذکور با وزن ۰/۳۰۹ از اهمیت بالایی در رخداد زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای برخوردار می‌باشد. واحد توف با وزن ۰/۱۳۱ در مرتبه سوم اهمیت قرار می‌گیرند. واحدهای بعدی جزو واحدهایی به شمار می‌روند که از درجه اهمیت پایین‌تری در رخداد زمین‌لغزش برخوردارند.




**شکل ٦- توزیع فضایی طول دامنه در حوضه نیرچای**




**شکل ۷- توزیع فضایی سازندهای زمین‌شناسی در حوضه نیرچای**

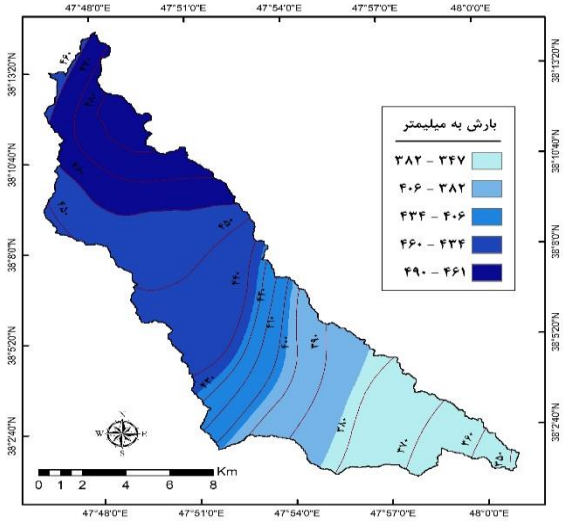
بارش: با توجه به محدود بودن ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی در سطح منطقه برای تهیه لایه بارش حوضه مطالعاتی از معادله ارائه شده توسط سازمان هواشناسی استان اردبیل استفاده به عمل آمد. این معادله به شرح زیر است (مطالعات طرح آمایش استان اردبیل، هواشناسی، ۱۳۹۱):

رابطه ۱: $Rain = 471.162 - (x * 4.81282) - (y * 0.002095) + (z * 0.063953)$

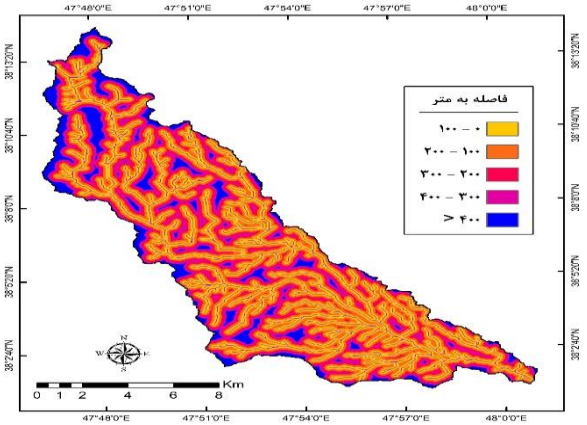
که در آن x = طول جغرافیایی (دقیقه بر حسب صدم)، y = عرض جغرافیایی (دقیقه بر حسب صدم) و z = ارتفاع (بر حسب متر). بر این اساس بارش در سطح حوضه آبریز نیرچای از حداقل ۳۴۷ تا حداکثر ۴۹۰ میلی‌متر متغیر می‌باشد (شکل ۸). رابطه مستقیمی بین متغیر بارش

و متغیر ارتفاع در سطح حوضه مطالعاتی وجود دارد. بدین ترتیب، با افزایش ارتفاع بر میزان بارش نیز افزوده می‌شود. بدیهی است که میزان بارش بیشتر منجر به افزایش پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در سطح منطقه می‌شود. طبقه بارشی ۴۶۰ تا ۴۹۰ با وزن ۰/۴۰۷ دارای بیشترین اهمیت و طبقه بارشی ۳۴۷ تا ۳۸۲ با وزن ۰/۰۱۴ دارای کمترین اهمیت در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه مطالعاتی می‌باشد.

فاصله از آبراهه: فاصله از آبراهه به دلیل تامین رطوبت و آبشستگی پای دامنه‌ها در رابطه با رخداد زمین‌لغزش از اهمیت زیادی برخوردار است. در واقع، آبشستگی و فرسایش پای دامنه‌ها شرایط مساعدی را برای وقوع زمین‌لغزش در مجاورت آبراهه‌ها فراهم می‌نماید (شکل ۹). بدیهی است که سطوح مجاور آبراهه‌های منطقه در رابطه با رخداد زمین‌لغزش از اهمیت بالاتری برخوردار می‌باشند و از این‌رو در طی مقایسات زوجی با استفاده از مدل ANP وزن بالاتری را کسب کردند. در این رابطه پهنه‌های در فاصله ۰ تا ۱۰۰ متری از آبراهه‌ها با وزن ۰/۴۱۹ از بیشترین میزان اهمیت برخوردار می‌باشند. در واقع این پهنه‌ها در صورت مساعدت سایر شرایط از پتانسیل بالایی برای رخداد زمین‌لغزش برخوردارند. این در حالی است که در شرایط برابر احتمال وقوع زمین‌لغزش در پهنه‌های دور از آبراهه‌ها بسیار پایین است؛ بدین ترتیب آخرین طبقه فاصله از آبراهه (بیش از ۴۰۰ متر) وزن ناچیزی (در حدود ۰/۰۱۶) را کسب نموده است.




**شکل ۸- توزیع فضایی بارش در حوضه نیرچای**




**شکل ۹- فاصله از آبراهه در حوضه نیرچای**

کاربری اراضی: در پژوهش حاضر لایه کاربری اراضی حوضه آبریز نیرچای از روی تصاویر ماهواره‌ای Google Earth استخراج گردید (شکل ۱۰). ماهیت کوهستانی حوضه مطالعاتی موجب شده است که مراتع با پوشش گیاهی ضعیف تا خوب کاربری عمده حوضه مطالعاتی باشند. در این رابطه بالغ بر ۶۶ درصد از سطح حوضه مطالعاتی شامل انواع مراتع می‌باشد که در این میان سهم مراتع خوب، متوسط و ضعیف به ترتیب در حدود ۱۹، ۳۵ و ۱۲ درصد می‌باشند. اراضی کشاورزی دیم در حدود ۱۹ درصد از سطح حوضه را شامل می‌شوند و به طور عمده در پایین‌دست حوضه و بر روی اراضی با شیب کم تا متوسط تمرکز یافته‌اند. اراضی کشاورزی آبی تنها در حدود ۷/۸ درصد از سطح حوضه را شامل می‌شوند. این اراضی عمدتا در پایین دست حوضه متمرکز هستند و منطبق بر دره اصلی نیرچای می‌باشند. در قسمت‌های پایین‌دست حوضه عرض دره نیرچای افزایش پیدا کرده و درنتیجه دشت سیلابی در بستر آن شکل گرفته است. سنگلاخ‌ها و برون‌زدهای سنگی در حدود ۵/۶ درصد از سطح حوضه را به خود اختصاص داده‌اند و منطبق بر سطوح بسیار ناهموار اطراف قله سبلان می‌باشند. مراتع با پوشش گیاهی ضعیف، اراضی دیم و اراضی بایر به دلیل نقش حفاظتی محدود از درجه اهمیت بالاتری در رابطه با رخداد زمین‌لغزش برخوردارند و از اینرو وزن بالاتری را به خود اختصاص داده‌اند.

پوشش گیاهی: به طور کلی، گیاهان تنها در لغزش‌های کم‌عمق (تا عمق نفوذ ریشه) تاثیر دارند و در لغزش‌های عمیق نقش مهمی ندارند (حافظی مقدس و غفوری، ۱۳۸۸). در این تحقیق به منظور تهیه لایه توزیع فضایی پوشش گیاهی حوضه آبریز نیرچای از شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی[1] (NDVI) بهره گرفته شد. بدین منظور باندهای قرمز و مادون قرمز تصاویر ماهواره‌ای Sentinel2 (مربوط به اوایل تابستان ۱۳۹۹) مورد استفاده قرار گرفت. شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) یکی از متداول‌ترین و بهترین شاخص‌ها برای رشد گیاه و تراکم توزیع فضایی پوشش گیاهی است که از رابطه زیر بدست می آید (لیلسند[2] و همکاران، ۲۰۰۴: ۱۴۱):

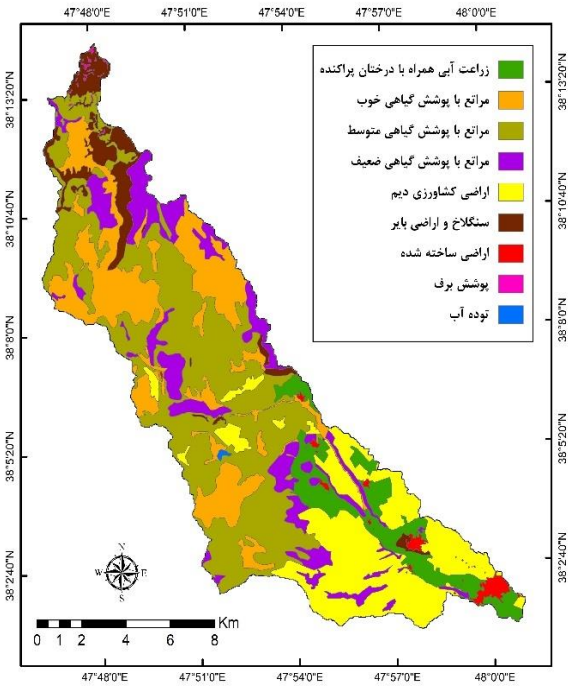
رابطه ۱:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}.$$

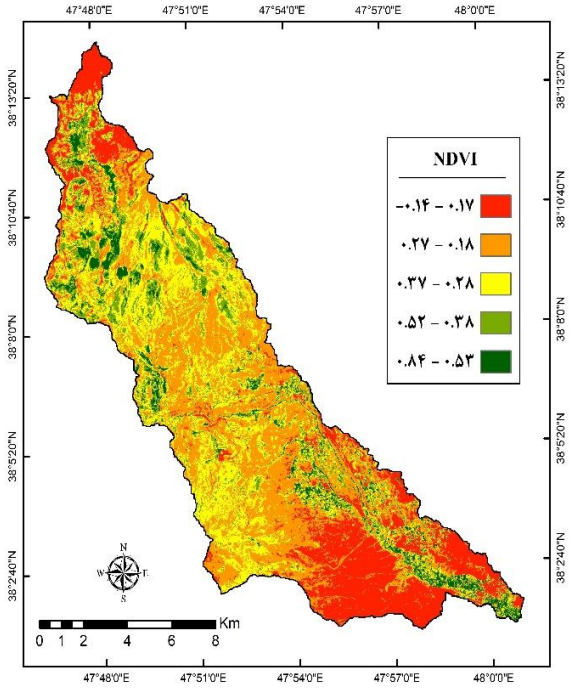
که در آن NIR: باند مادون قرمز نزدیک و RED به ترتیب بازتاب‌ها در باند مادون قرمز نزدیک (باند ۸ در ماهواره سنتینل) و باند قرمز (باند ۴ در ماهواره سنتینل) هستند. هر چه مقادیر این شاخص به ۱+ نزدیک‌تر باشند نشان‌دهنده پوشش گیاهی متراکم‌تری هستند. حوضه مطالعاتی با توجه به مقادیر شاخص NDVI به پنج کلاس (از پوشش گیاهی بسیار ضعیف تا پوشش گیاهی بسیار متراکم) طبقه‌بندی گردید (شکل ۱۱). پهنه‌های با مقادیر پایین این شاخص عمدتا در سطوحی از بالادست (اطراف قله سبلان)، پایین دست و دامنه‌های پرشیب قسمت‌های میانی حوضه مطالعاتی قابل مشاهده هستند. در واقع، مجموعه‌ای از شرایط خاک‌شناسی، فیزیوگرافی، هیدرولوژی و اقلیمی باعث شده است که امکان استقرار پوشش گیاهی انبوه در این سطوح میسر نباشد. کلاس با مقادیر NDVI کمتر از ۰/۱۷ در حدود ۲۰ درصد از سطح

[1] - Normalized difference water index (NDVI)
[2] - Lillesand

حوضه آبریز نیرچای را شامل می‌شود. این پهنه‌ها یا فاقد پوشش گیاهی هستند و یا از پوشش گیاهی بسیار محدودی برخوردار می‌باشند؛ از اینرو در این سطوح پوشش گیاهی از نقش چندانی در تثبیت و پایداری دامنه-ها برخوردار نیست. در نتیجه، در شرایط برابر از احتمال وقوع زمین‌لغزش بالاتری برخوردار می‌باشند و وزن بالاتری را به خود اختصاص داده‌اند. تنها در حدود ۵ درصد از سطح حوضه مطالعاتی از مقادیر NDVI بیش از ۰/۵۳ برخوردار می‌باشند که عمدتا منطبق بر اراضی کشاورزی پایین-دست یا مراتع با پوشش گیاهی متراکم قسمت‌های بالادست می‌باشند. در این پهنه‌ها پوشش گیاهی نقش مهمی در پایداری و تثبیت پوشش دامنه‌ها ایفا می‌کند و درنتیجه از وزن پایینی نیز برخوردار شده‌اند.




**شکل ۱۰- توزیع فضایی کاربری اراضی در حوضه نیرچای**




**شکل ۱۱- توزیع فضایی شاخص NDVI در حوضه نیرچای**

- **محاسبه وزن متغیرهای موثر بر زمین‌لغزش**

همانگونه که قبلا بیان گردید در پژوهش حاضر برای محاسبه وزن هر یک از متغیرهای موثر بر وقوع زمین‌لغزش از مدل تحلیل شبکه‌ای (ANP) استفاده به عمل آمد. در جدول (۱)، سوپرماتریس ناموزون اولیه مدل ANP، در جدول (۲) سوپرماتریس موزون اولیه مدل ANP و در جدول (۳) سوپر ماتریس حد مدل ANP ارائه گردیده است.

جدول ۱- سوپرماتریس اولیه و ناموزن پژوهش

| | | Alternatives | | | | Criteria | | | | | | | | Goal | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | زمین شناسی | هیدرواقلیم | پوشش زمین | ژئومورفولوژی | ارتفاع | بارش | تحدب زمین | جهت شیب | شیب | طول دامنه | فاصله از آبراهه | لیتولوژی | پوشش گیاهی | کاربری اراضی | پهنه‌بندی زمین لغزش |
| Alternatives | زمین شناسی | 0.000 | 0.342 | 0.297 | 0.570 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.289 |
| | هیدرواقلیم | 0.271 | 0.000 | 0.163 | 0.333 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.176 |
| | پوشش زمین | 0.085 | 0.081 | 0.000 | 0.097 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.059 |
| | ژئومورفولوژی | 0.644 | 0.577 | 0.540 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.476 |
| Criteria | ارتفاع | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.200 | 0.000 | 0.102 | 0.098 | 0.081 | 0.108 | 0.082 | 0.085 | 0.108 | 0.080 | 0.079 | 0.000 |
| | بارش | 0.000 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.177 | 0.000 | 0.186 | 0.170 | 0.222 | 0.171 | 0.173 | 0.222 | 0.169 | 0.169 | 0.000 |
| | تحدب زمین | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.200 | 0.126 | 0.146 | 0.000 | 0.117 | 0.155 | 0.118 | 0.121 | 0.155 | 0.116 | 0.116 | 0.000 |
| | جهت شیب | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.200 | 0.032 | 0.034 | 0.033 | 0.000 | 0.035 | 0.031 | 0.031 | 0.035 | 0.027 | 0.026 | 0.000 |
| | شیب | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.200 | 0.256 | 0.279 | 0.264 | 0.250 | 0.000 | 0.251 | 0.253 | 0.312 | 0.249 | 0.250 | 0.000 |
| | طول دامنه | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.200 | 0.046 | 0.048 | 0.047 | 0.039 | 0.051 | 0.000 | 0.045 | 0.051 | 0.038 | 0.037 | 0.000 |
| | فاصله از آبراهه | 0.000 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.066 | 0.070 | 0.068 | 0.056 | 0.074 | 0.058 | 0.000 | 0.074 | 0.055 | 0.054 | 0.000 |
| | لیتولوژی | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.256 | 0.279 | 0.264 | 0.250 | 0.312 | 0.251 | 0.253 | 0.000 | 0.249 | 0.250 | 0.000 |
| | پوشش گیاهی | 0.000 | 0.000 | 0.500 | 0.000 | 0.023 | 0.024 | 0.023 | 0.022 | 0.025 | 0.022 | 0.023 | 0.025 | 0.000 | 0.019 | 0.000 |
| | کاربری اراضی | 0.000 | 0.000 | 0.500 | 0.000 | 0.017 | 0.018 | 0.017 | 0.016 | 0.018 | 0.017 | 0.017 | 0.018 | 0.016 | 0.000 | 0.000 |
| Goal | پهنه بندی زمین لغزش | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

**جدول ۲- سوپرماتریس موزون پژوهش**

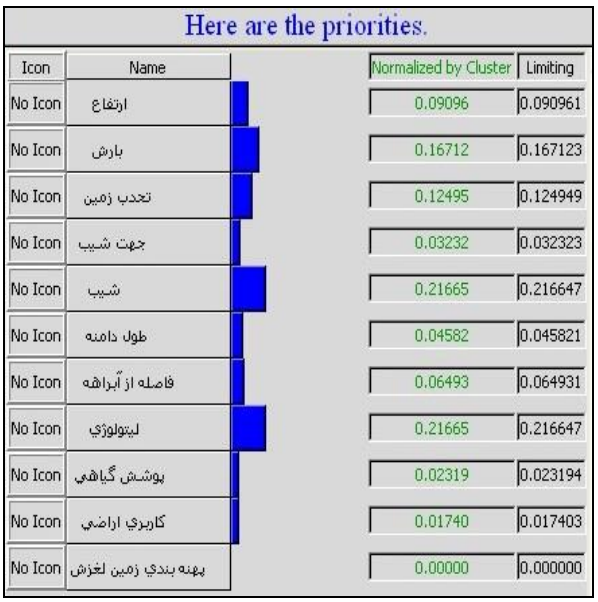
| | | Alternatives | | | | Criteria | | | | | | | | | | Goal |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | زمین شناسی | هیدرواقلیم | پوشش زمین | ژئومورفولوژی | ارتفاع | بارش | تحدب زمین | جهت شیب | شیب | طول دامنه | فاصله از آبراهه | لیتولوژی | پوشش گیاهی | کاربری اراضی | پهنه‌بندی زمین لغزش |
| Alternatives | زمین شناسی | 0.00 | 0.17 | 0.15 | 0.28 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.29 |
| | هیدرواقلیم | 0.14 | 0.00 | 0.08 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.18 |
| | پوشش زمین | 0.04 | 0.04 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.06 |
| | ژئومورفولوژی | 0.32 | 0.29 | 0.27 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.48 |
| Criteria | ارتفاع | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.00 | 0.10 | 0.10 | 0.08 | 0.11 | 0.08 | 0.09 | 0.11 | 0.08 | 0.08 | 0.00 |
| | بارش | 0.00 | 0.25 | 0.00 | 0.00 | 0.18 | 0.00 | 0.19 | 0.17 | 0.22 | 0.17 | 0.17 | 0.22 | 0.17 | 0.17 | 0.00 |
| | تحدب زمین | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.13 | 0.15 | 0.00 | 0.12 | 0.16 | 0.12 | 0.12 | 0.16 | 0.12 | 0.12 | 0.00 |
| | جهت شیب | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.00 |
| | شیب | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.26 | 0.28 | 0.26 | 0.25 | 0.00 | 0.25 | 0.25 | 0.31 | 0.25 | 0.25 | 0.00 |
| | طول دامنه | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.00 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.00 |
| | فاصله از آبراهه | 0.00 | 0.25 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.06 | 0.00 | 0.07 | 0.05 | 0.05 | 0.00 |
| | لیتولوژی | 0.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.26 | 0.28 | 0.26 | 0.25 | 0.31 | 0.25 | 0.25 | 0.00 | 0.25 | 0.25 | 0.00 |
| | پوشش گیاهی | 0.00 | 0.00 | 0.25 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.00 |
| | کاربری اراضی | 0.00 | 0.00 | 0.25 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.00 |
| Goal | پهنه بندی زمین لغزش | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

**جدول ۳- سوپرماتریس حد پژوهش**

| | | Alternatives | | | | Criteria | | | | | | | | | | Goal |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | زمین شناسی | هیدرواقلیم | پوشش زمین | ژئومورفولوژی | ارتفاع | بارش | تحدب زمین | جهت شیب | شیب | طول دامنه | فاصله از آبراهه | لیتولوژی | پوشش گیاهی | کاربری اراضی | پهنه‌بندی زمین لغزش |
| Alternatives | زمین شناسی | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | هیدرواقلیم | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | پوشش زمین | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | ژئومورفولوژی | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Criteria | ارتفاع | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 |
| | بارش | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 |
| | تحدب زمین | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| | جهت شیب | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| | شیب | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 |
| | طول دامنه | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | فاصله از آبراهه | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| | لیتولوژی | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 |
| | پوشش گیاهی | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| | کاربری اراضی | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Goal | پهنه بندی زمین لغزش | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

پس از مقایسات زوجی و محاسبات مرتبط با سوپرماتریس‌های مدل ANP وزن هر یک از معیارهای موثر بر رخداد زمین‌لغزش حاصل گردید (شکل ۱۲).




**شکل ۱۲- وزن متغیرهای موثر بر رخداد زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای با کاربست مدل ANP**

نتایج نهایی حاصل از اجرای مدل تحلیل شبکه‌ای (ANP) به منظور پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

– متغیرهای شیب، لیتولوژی و بارش به ترتیب با وزن ۰/۲۱۷، ۰/۲۱۷ و ۰/۱۶۷ از بیشترین میزان اهمیت در رابطه با رخداد زمین‌لغزش در سطح حوضه مطالعاتی برخوردار می‌باشند. متغیر شیب جزو خوشه ژئومورفولوژی، لیتولوژی جزو خوشه زمین‌شناسی و بارش جزو خوشه هیدرواقلیم به شمار می‌روند. در واقع، این متغیرها در مقیاس کل حوضه نیرچای، و حتی بسیاری از حوضه‌های دیگر، کنترل کننده اصلی زمین‌لغزش‌ها محسوب می‌شوند. سه شرط اساسی حضور آب، مواد آسیب‌پذیر بر روی دامنه‌ها و دخالت نیروی جاذبه به شدت توسط این متغیرها کنترل می‌شوند. بنابراین، وزن بالایی را در خصوص وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه نیرچای کسب نموده‌اند. تحدب سطح زمین با وزن ۰/۱۲۵ چهارمین متغیر مهم در رخداد زمین‌لغزش در سطح منطقه مطالعاتی می‌باشد.

– متغیرهای ارتفاع، فاصله از آبراهه و طول دامنه با وزن‌های ۰/۰۹۱، ۰/۰۶۵ و ۰/۰۴۶ متغیرهایی به شمار می‌روند که از درجه اهمیت متوسطی در رخداد زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای برخوردار می‌باشند.

– سه متغیر جهت شیب با وزن ۰/۰۳۲، پوشش گیاهی با وزن ۰/۰۲۳ و کاربری اراضی با وزن ۰/۰۱۷ جزو متغیرهای نسبتا کم‌اهمیت در رابطه با رخداد زمین‌لغزش در سطح منطقه مطالعاتی به شمار می‌روند. عملکرد این متغیرها را می‌توان در سطح محلی در نظر گرفت. دلیل اهمیت پایین متغیرهای پوشش گیاهی و کاربری اراضی در ارتباط با نوع، تراکم و توزیع فضایی این متغیرها می‌باشد. در حوضه آبریز نیرچای تا قسمت‌های میانی حوضه تراکم پوشش گیاهی نسبتا پایین است. در قسمت‌های میانی و تاحدودی بالادست نیز تراکم پوشش گیاهی (به صورت مراتع) در بسیاری از پهنه‌ها به نحوی نیست که بتواند مانعی جدی در رخداد زمین‌لغزش به شمار آید.

## پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه نیرچای

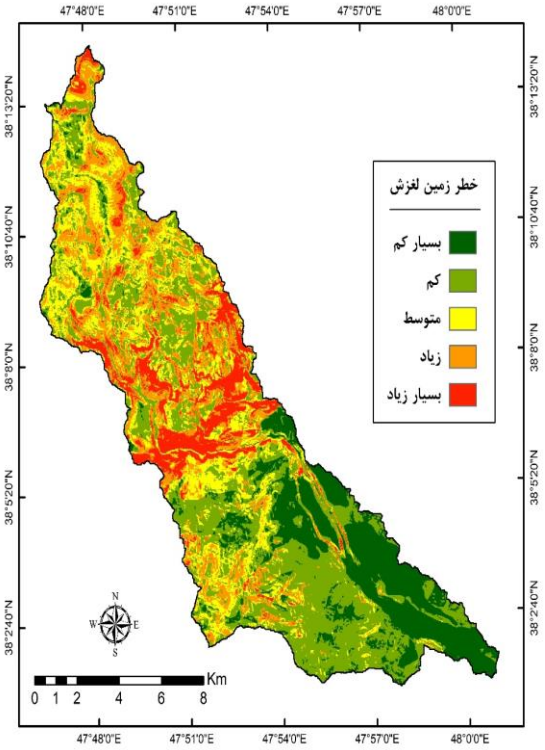
در مراحل قبلی پژوهش هم توزیع فضایی متغیرهای موثر بر رخداد زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای مورد ارزیابی قرار گرفت و هم وزن هر کدام از این متغیرها با استفاده از مدل ANP مورد محاسبه قرار گرفت. در ادامه کار لایه‌های موضوعی موثر بر رخداد زمین‌لغزش بر اساس وزن هر کدام از آنها در بستر یک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ترکیب می‌شوند. لایه حاصل از ترکیب ۱۰ متغیر موثر بر رخداد زمین‌لغزش به پنج کلاس (از کلاس با خطر زمین‌لغزش بسیار کم تا کلاس با خطر زمین‌لغزش بسیار زیاد) طبقه‌بندی شد (شکل ۱۳). نتایج حاصل از نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

– نتایج تحقیق حاکی از کارایی بالای مدل ANP در ترکیب و یکپارچه نمودن متغیرهای موثر بر رخداد زمین‌لغزش می‌باشد. درواقع، رویکرد مذکور امکان ترکیب انعطاف‌پذیر انواع لایه‌های موضوعی را میسر می‌سازد. اکثریت زمین‌لغزش‌هایی که در سطح حوضه آبریز نیرچای اتفاق افتاده‌اند (با توجه به نقشه زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث) در نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در کلاس‌های خطر زیاد و بسیار زیاد واقع شدند که نشان از دقت بالای مدل مورد استفاده است.

– مطابق نتایج روی‌هم‌گذاری لایه‌ها با کاربست مدل ANP بالغ بر ۱۰ درصد از مساحت حوضه آبریز نیرچای (با مساحتی در حدود ۱۶/۵ کیلومترمربع) در کلاس خطر بسیار زیاد وقوع زمین‌لغزش جای می‌گیرد. تمرکز اساسی این کلاس در قسمت‌های میانی حوضه مطالعاتی می‌باشد. همچنین در حدود ۱۹ درصد حوضه مطالعاتی با مساحتی بالغ بر ۳۲/۸ کیلومترمربع در کلاس خطر زمین‌لغزش زیاد قرار دارد. این پهنه‌ها عمدتا در قسمت‌های میانی و بالادست حوضه پراکنده شده‌اند. درصد مساحت کلاس‌های خطر متوسط، کم و بسیار کم به ترتیب در حدود ۱۹/۵، ۳۳/۹ و ۱۷/۵ می‌باشد (شکل ۴- ۱۵). تمرکز اساسی کلاس‌های

خطر کم و بسیار کم در قسمت‌های پایین‌دست حوضه مطالعاتی می‌باشد.

– تمرکز اساسی کلاس‌های خطر زیاد و بسیار زیاد در قسمت‌های میانی و به صورت لکه‌هایی در قسمت‌های بالادست حوضه مطالعاتی می‌باشد. در واقع در قسمت‌های میانی مجموعه‌ای از شرایط مستعد باعث افزایش پتانسیل وقوع زمین‌لغزش شده است. از این شرایط می‌توان به دریافت بارش مناسب همراه با مشارکت ذوب برف‌ها در اواخر زمستان و اوایل فصل بهار، شیب‌های مناسب زمین‌لغزش، ارتفاع متوسط، شرایط لیتولوژیکی مناسب مخصوصا وجود مواد هوازده بر روی دامنه‌ها و سایر شرایط مساعدت کننده محلی اشاره داشت. خوشبختانه بخش قابل‌توجهی از قسمت‌های پایین‌دست حوضه آبریز نیرچای در کلاس خطر بسیار کم و کم زمین‌لغزش قرار گرفته‌اند. در این پهنه‌ها عوامل زیادی از قبیل غلبه شیب‌های ملایم، دریافت نزولات جوی نسبتا پایین، تحدب کم سطح زمین، لیتولوژی با حساسیت پایین نسبت به زمین‌لغزش، ارتفاع پایین و غیره باعث شده است که پتانسیل وقوع زمین‌لغزش به شدت کاهش پیدا کند. با توجه به استقرار بخش عمده سکونتگاه‌های حوضه مطالعاتی در این قسمت‌ها می‌توان بیان داشت که زمین‌لغزش‌ها مخاطره مستقیم و جدی را متوجه جوامع انسانی ساکن حوضه نمی‌سازد. با این حال، رخداد زمین‌لغزش در قسمت‌های میانی و بالادست می‌تواند باعث تخریب منابع طبیعی و فرسایش خاک گردد.




**شکل ۱۳- پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای با کاربست مدل ANP**

## ۲- نتیجه‌گیری

در راستای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای از ۱۰ متغیر مهم موثر بر وقوع زمین‌لغزش بهره گرفته شد. این متغیرها در قالب چهار خوشه قابل سازماندهی می‌باشند: خوشه ژئومورفولوژیکی که مشتمل بر متغیرهای شیب، جهت شیب، ارتفاع، طول دامنه و تحدب سطح زمین می‌باشد. می‌توان گفت که این متغیرها جزو مهم‌ترین متغیرهای موثر بر رخداد زمین‌لغزش (به عنوان یک فرایند ژئومورفولوژیکی) به شمار می‌روند. خوشه زمین‌شناسی که شامل پراکندگی سازندهای زمین‌شناسی منطقه می‌باشد. این متغیر نیز به دلیل اختلافات زیاد در حساسیت سنگ‌ها و واحدهای زمین‌شناسی نسبت به فرایند زمین‌لغزش از اهمیت شایان توجهی برخوردارند. خوشه هیدرواقلیم که شامل دو متغیر فاصله از رودخانه و بارش می‌باشد. متغیر بارش عمدتا از نظر تامین رطوبت و متغیر فاصله از آبراهه از نظر فرایندهای فرسایش کناره و زیربری مواد پای دامنه‌ها از اهمیت زیادی برخوردارند. خوشه پوشش زمین که خود شامل دو متغیر پوشش گیاهی و کاربری اراضی می‌باشد و از نقش تقریبا یکسانی در رخداد زمین‌لغزش برخوردارند و بیشتر به عنوان متغیرهای مکمل هم مورد توجه قرار گرفتند. نتایج حاصل از مدل فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) نشان می‌دهد که دو متغیر شیب و زمین‌شناسی از بیشترین میزان اهمیت در رابطه با رخداد زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای برخوردار می‌باشند. در واقع، متغیرهای مذکور همراه با متغیر بارش (حضور آب) کنترل‌کننده‌های اصلی زمین‌لغزش‌های حوضه مطالعاتی به شمار می‌روند. زمین‌لغزش‌های منطقه مخصوصا بر روی شیب‌های ۲۰ تا ۴۰ درصد و منطبق بر دامنه‌های متشکل از گدازه‌های آتشفشانی به شدت هوازده یافته اتفاق افتاده‌اند. بنابراین، متغیرهای مذکور در مقیاس کل حوضه عمل نموده و تعیین کننده پتانسیل زمین‌لغزش در سطوح مختلف حوضه مطالعاتی می‌باشند. عملکرد سایر متغیرها بیشتر به صورت محلی باقی می‌ماند. نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای نشان می‌دهد که در حدود ۹/۸ درصد از سطح حوضه در کلاس خطر بسیار زیاد و ۱۹/۳ درصد از سطح حوضه مطالعاتی در کلاس خطر زیاد قرار گرفته است. بخش قابل توجهی از قسمت‌های میانی حوضه نیرچای در این کلاس‌ها واقع شده‌اند. در واقع، عملکرد مشترک بسیاری از متغیرهای موثر بر رخداد زمین‌لغزش باعث شده که این پهنه‌ها از پتانسیل لغزشی بالایی برخوردار باشند. وجود شیب‌های مناسب زمین‌لغزش (مخصوصا شیب‌های ۲۰ تا ۴۰ درصد)، سازندهای زمین‌شناسی هوازده، ارتفاع متوسط، بارش فراوان همراه با آب ناشی از ذوب برف، تراکم زهکشی بالا، تحدب بالای سطح زمین و غیره منجر به حساسیت بالایی قسمت‌های میانی حوضه آبریز نیرچای نسبت به زمین‌لغزش شده است.

**منابع**


- اسفندیاری دارآباد، ف.، بهشتی جاوید، ا. ۱۳۹۵. پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل هیبریدی قضیه‌ی بیز ANP (مطالعه‌ی موردی: گردنه‌ی حیران). مجله هیدروژئومورفولوژی، دوره ۲، شماره ۸، صص ۹۳-۱۱۱.
- امیراحمدی، ا.، شکاری بادی، ع.، معتمدی‌راد، م.، بینقی، م. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل ANP (مطالعه موردی: حوضه پیوه‌ژن دامنه جنوبی بینالود). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۳، صص ۲۱۴-۲۳۰.
- ایزدی، ز.، انتظاری، م. ۱۳۹۲. زمین‌لغزش‌های ایران (معرفی، عوامل و مدیریت). رشد آموزش جغرافیا، صص ۳۲-۳۷.
- جعفری، ت.، گلی مختاری، ل.، ناعمی‌تبار، م. ۱۳۹۸. پهنه‌بندی خطر لغزش در حوضه آبریز بدرانلو با استفاده از روش فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP). نشریه فضای جغرافیایی، دوره ۱۹، شماره ۶۶، صص ۱-۱۷.
- جمال آبادی، ج.، صفری، ف.، برآبادی، ع.، آل محمد، م. ۱۳۹۹. شناسایی و پهنهبندی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در دهستان ژاورود براساس مدل تلفیقی فازی و فرایند تحلیل شبکه، مدیریت بحران، دوره ۱۰، شماره ۲، ۵۵-۴۷.
- داداش‌پور، هـ.، خدابخش، ح. ر.، رفیعیان، م. ۱۳۹۱. تحلیل فضایی و مکان‌یابی مراکز اسکان موقت با استفاده از تلفیق فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS). مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره اول، صص ۱۱۱-۱۳۱.
- عابدینی، م.، رنجبری، ا.، مختاری، د. ۱۳۹۸. تجزیه و تحلیل خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های ANP و LR در محیط GIS (مطالعه موردی پهنه گسلی قوشاداغ-ارسباران در آذربایجانشرقی). مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، دوره ۸، شماره ۱، شماره پیاپی ۲۹، صص ۷۰-۸۸.
- قنبری، ح.، روستایی، ش. ۱۳۹۲. بررسی اولویت‌های برنامه‌ریزی و آمایش مناطق مرزی در استان آذربایجان شرقی با به‌کارگیری مدل تحلیل شبکه(ANP). آمایش سرزمین، دوره ۵، شماره ۲، صص ۳۳۵-۳۶۰.
- کیانی، ش.، کریمخانی، ا.، مزیدی، ا. ۱۴۰۰. پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از رگرسیون لجستیک و آنفیس در حوضه آبریز هشتجین استان اردبیل، جغرافیا و پایداری محیط، دوره ۱۱، شماره ۲، صص ۷۳-۵۵.
- مکانیکی، ج.، صادقی، ح. ۱۳۹۱. مکان‌یابی مراکز بهداشتی- درمانی (بیمارستان‌ها) شهر بیرجند، از طریق فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و مقایسه زوجی در محیط GIS. فصلنامه آمایش محیط، شماره ۱۹، صص ۱۲۱-۱۴۲.
- یوسفی، ح.، یاراحمدی، ی. ۱۳۹۸. ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل ترکیبی تحلیل شبکه (ANP) و منطق فازی (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ صلوات‌آباد، سنندج). مجله اکوهیدرولوژی، دوره ۶، شماره ۴، صص ۹۹۳-۱۰۰۲.
- Aghdam, I. N., Pradhan, B., Panahi, M. 2017. Landslide susceptibility assessment using a novel hybrid model of statistical bivariate methods (FR and WOE) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) at southern Zagros Mountains in Iran. Environmental Earth Sciences, 76 (6), pp.237.
- Anbalagan, R., R. Kumar, K. Lakshmanan, S. Parida and S. Neethu. 2015. Landslide hazard zonation mapping using frequency ratio and fuzzy logic approach, a case study of Lachung Valley, Sikkim. Geoenvironmental Disasters volume 2, Article number: 6, pp. 1-17.
- Ayalew, L., and H. Yamagishi. 2005. The application of GIS–based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the KakudaYahiko Mountains, Central Japan. Geomorphology, v.65, pp.15-31.
- Broeckx, J., Vanmarcke, M., Duchateau, R. & Poesen, J. 2018. A data-based landslide susceptibility map of Africa. Earth-Science Reviews, pp 102-121.
- Chen, W., He, B., Zhang, L., Nover, D. 2016. Developing an integrated 2D and 3D WebGIS based platform for effective landslide hazard management , InternationalJournal of Disaster Risk Reduction, Vol. 20, pp. 28-38.
- Gemitzi, A., G. Falalakis and C. Petalas. 2011. Evaluating Landslide Susceptibility Using Environmental Factors, Fuzzy Membership Functions And GIS. Journal of Global NEST, 13(1), pp.28- 40.
- Hamza, T., and T. K. Raghuvanshi. 2017. GIS based landslide hazard evaluation and zonation–A case from Jeldu District, Central Ethiopia. Journal of King Saud University-Science, 29 (2), pp.151-165.
- Haque, U., Paula, F. D., Silva Graziella, Devoli., Pilz, J., Zhao, B., Khaloua, A., Wilopoi, W.,Andersen,P., Luk, P., Lee, J., Yamamoto, T., Keellings, D. & Wuo, J. H., 2019. The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995-2014). Science of The Total Environment, 682, 673-684.

- Iwahashi, J., Pike, R. J.. 2007. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. Geomorphology, Vol. 86, pp. 409–440.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., Chipman, J. W. 2004. Remote sensing and image interpretation. Fifth edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Luca, F., Conforti, M., Robustelli, G. 2011. Comparison of GIS-based gullying susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. Geomorphology, 134: pp. 297-308.
- Psomiadis, E., Papazachariou, A., Soulis, X. k., Alexiou, D., Charalampopoulos, I. 2020. Landslide Mapping and Susceptibility Assessment Using Geospatial Analysis and Earth Observation Data. Land, 9(5), pp.133; https://doi.org/10.3390/land9050133.
- Vojtekova, J., Vojtek, M. 2020. Assessment of landslide susceptibility at a local spatial scale applying the multi-criteria analysis and GIS: a case study from Slovakia. Geomatics, natural hazards and risk, Volume 11, Issue 1, pp. 131-148.
- Yalcin, A. 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. CATENA, v.72, p.1-12.

# Investigation and landslide risk zoning in Nirchai basin using ANP model

**Mousa Abedini[1*], Leyla Esmaeili niri[2], Elnaz Piroozi[3], Amir Hesam Pasban[4].**

[*]1-Professor of geomorphology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Department of Natural Geography (Geomorphology), Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran.

3- PhD Student of Geomorphology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

4 - PhD in Geomorphology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

[*]Email Address: abedini@uma.ac.ir

**Abstract**

**Introduction**

Landslides are dangerous and catastrophic phenomena. Which each year has many effects on human societies, including economic damage, infrastructure destruction and environmental failure. In this regard, the production of accurate zoning maps of landslide sensitivity is an important issue for risk management studies. In this study, the risk of landslides in the Nirchai catchment area is evaluated. Nirchai catchment area drains about 170 square kilometers of the southern slopes of Sabalan volcanic massif. There are several large landslide massifs in the area of this basin, which indicates that the basin is prone to landslides. Failure to pay attention to this important issue in regional development planning can have irreparable consequences. Therefore, in the present study, landslide risk zoning is attempted in the area of this basin, which can identify stable and unstable zones in terms of landslide occurrence. Preparation of landslide risk zoning map in Nirchai catchment area by combining and superimposing variables affecting the occurrence of this phenomenon using network analysis process (ANP) model and in the framework of GIS Took. In recent years, numerous researches have been done on spatial assessment and landslide risk zoning. The following are just a few of these studies that are somehow related to the methodology used in the present study. Yousefi and Yarahmadi (1398) assessed landslide risk using a combined model of network analysis (ANP) and fuzzy logic in the Salavatabad basin of Sanandaj. The results showed that among the 8 factors studied on landslide occurrence, slope and geological criteria with weights of 0.243 and 0.194, respectively, had the highest weight in landslide risk zoning. Jafari et al. (2017) used landslide risk zoning in Badranloo catchment using ANP method. According to this study, the most important factors affecting the occurrence of landslides in the study basin are slope slope, lithology, distance from the river and annual rainfall.

**Methodology**

In the present study, the risk of landslide occurrence in the Nirchai catchment area (Aghlaghani Chay) is zoned. The study basin is located in the geographical coordinates of 47 degrees and 46 minutes to 48 degrees and 1 minute east longitude and 38 degrees and 1 minute to 38 degrees and 15 minutes north latitude and is considered as one of the sub-basins of Balikheluchay. Nirchai is politically-administratively located within the cities of Nayr and Sarein in Ardabil province and Sarab in East Azerbaijan province. Of course, most of this basin is located within the city of Nayr (Figure 1). The study basin has an elongated shape and with the general trend of northwest-southeast, it drains parts of the southern slope of Sabalan volcanic massif. The area of Nirchai catchment is 170 square kilometers and its perimeter is about 114 kilometers. In this study, 10 variables were used to prepare a landslide risk zoning map. These variables include: rainfall, distance from the river, geology, altitude, slope, slope direction, slope length factor, land convexity, land use and vegetation. To prepare and prepare these variables, data were used as follows: The variables of height, slope, slope direction, slope length and ground surface convexity were extracted from the image of digital area height model (DEM) with a resolution of 27 meters. Through these images, the waterways of the region were also extracted using the Hydrology tool of ArcGIS software. In the present study, in order to zoning the risk of landslides in the Nirchai catchment area, the network analysis process (ANP) model in the form of Geographic Information System (GIS) was used. The following is a description of the model used. Network analysis process is one of the multi-criteria decision-making methods and is included in the set of compensatory models. This model is designed based on the hierarchical analysis process and in it, the network has replaced the hierarchy. The network analysis process, in contrast to the hierarchical

analysis method, has a nonlinear structure and considers intra-cluster dependence and inter-cluster dependence. The reason for the success of the model is the high correlation of its results with the real world and popular decision-making and in the real world with its complexities.

**Discussion**

Evaluate the spatial distribution of variables affecting landslides: In this section, the spatial evaluation of the variables affecting the landslide at the level of Nirchai catchment is discussed: Elevation: The distribution of Nirchai catchment heights is shown in Figure 2. The lower and upper elevations of the basin are of lower importance in the event of landslides. In fact, low altitude and the presence of sloping lands in the downstream parts of the study basin are largely considered as a limiting factor of landslides because they play a significant role in increasing rainfall, vegetation density and other variables affecting A landslide event does not occur. At very high altitudes in the basin, the violence of climatic elements and the dominance of steep and precipice morphology cause slippery processes to other slope instability processes such as rockslides and overturns. Therefore, in the process of pairwise comparisons, they have less weight. Thus, it can be said that landslides occur in the middle levels of the basin are more likely to occur. Most of the landslides in the region are also located at these altitudes; Hence, they have a higher weight. Land use: In the present study, the land use layer of Nirchai catchment was extracted from Google Earth satellite images (Figure 10). The mountainous nature of the study basin has caused the pastures with poor vegetation to good use to be the main study basin. In this regard, over 66% of the study area includes various types of rangelands, among which the share of good, medium and poor rangelands are about 19, 35 and 12%, respectively. Rainfed agricultural lands cover about 19% of the basin area and are mainly concentrated downstream and on low to medium slope lands. Irrigated agricultural lands cover only about 7.8% of the basin area. These lands are mainly concentrated downstream of the basin and correspond to the main valley of Nirchai. Calculate the weight of variables affecting landslides: As previously mentioned, in the present study, the network analysis model (ANP) was used to calculate the weight of each of the variables affecting the occurrence of landslides. In table (1), the initial disproportionate supernatant of the ANP model, in table (2), the initial weighted supermatrix of the ANP model and in table (3), the limit matrix of the ANP model are presented.

**Conclusion**

The results of the network analysis process (ANP) model show that the two variables of slope and geology are the most important in relation to landslide occurrence in the Nirchai catchment. In fact, these variables along with the variable of precipitation (presence of water) are the main controllers of landslides in the study basin. Landslides in the region have occurred especially on slopes of 20 to 40% and corresponding to the slopes consisting of highly aerated volcanic lava. Therefore, the mentioned variables act on the scale of the whole basin and determine the landslide potential at different levels of the study basin. The performance of other variables remains more local. The results of landslide risk zoning in Nirchai catchment area show that about 9.8% of the basin area is in high risk class and 19.3% of the study area is in high risk class. Is. A significant part of the middle parts of Nirchai Basin are located in these classes. In fact, the joint operation of many variables affecting the landslide event has caused these zones to have a high slip potential. Existence of suitable landslide slopes (especially slopes of 20 to 40%), weathering geological formations, medium altitude, heavy rainfall with snowmelt water, high drainage density, high convexity of the ground surface, etc. lead to High sensitivity of the middle parts of Nirchai catchment to landslides.

**Keywords**

Zoning; landslide; ANP model; GIS; Nirchai.