

پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز نهندچای با استفاده از مدل ANP و تکنیک GIS

سمیه معزز- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز.
شهرام روستائی* - استاد ژئومورفولوژی گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز.
توحید رحیم پور - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۰۶ تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۰۶/۱۹

چکیده

این تحقیق با هدف تهیه نقشه پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز نهندچای واقع در استان آذربایجان شرقی انجام شده است. برای تهیه نقشه پهنه‌بندی از مدل ANP و تکنیک GIS استفاده شده است. ابتدا لایه‌های اطلاعاتی مربوط به ۸ فاکتور مؤثر در وقوع زمین‌لغزش شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل و بارش با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. سپس به منظور وزن دهی هر یک از معیارها از نرم‌افزار Super Decisions استفاده شد. بدین صورت که ابتدا مدل شبکه‌ای جهت پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در این نرم‌افزار طراحی و ارتباطات داخلی و خارجی معیارها مشخص شده و وزن دهی معیارها صورت گرفت. نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر نشان داد که وزن معیارهای هشت‌گانه مذکور به ترتیب ۰/۰۶۴، ۰/۰۲۸، ۰/۰۴۴، ۰/۰۲۹۶، ۰/۱۸۰، ۰/۱۳۴، ۰/۰۵۴ و ۰/۱۹۶ است. در نهایت، با تلفیق این لایه‌ها با توجه به وزنشان، در محیط GIS نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش به دست آمد. در نهایت، نقشه پهنه‌بندی در ۵ طبقه با پتانسیل خطر زمین‌لغزش خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم تهیه شد. نتایج تحقیق نشان داد که بیش از ۴۰ درصد از مساحت منطقه پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین‌لغزش را دارا می‌باشد که بیشتر منطبق بر مناطق دارای کاربری مرتع، حاشیه آبراهه‌ها و مناطق دارای سازند مارن است. ارزیابی دقت نقشه پهنه‌بندی تهیه شده از مدل ANP با نقاط لغزشی رخ داده در سطح منطقه نشان داد که بیش از ۸۰ درصد لغزش‌ها در مناطق با خطر زیاد و خیلی زیاد اتفاق افتاده است که نشان‌دهنده دقت خوب مدل ANP در تهیه نقشه خطر وقوع زمین‌لغزش در منطقه می‌باشد.

واژگان کلیدی: زمین‌لغزش، نهندچای، سوپر دیسیژن، GIS ANP

مقدمه

زمین‌لغزش‌ها فرایندهای طبیعی زمین‌شناسی هستند که ناهمواری‌های سطح زمین را متحول کرده، دوباره شکل می‌دهند (گورسیسکی^۱ و همکاران، ۲۰۰۶: ۱۷۹). پدیده زمین‌لغزش یک از پدیده‌های مهم و قابل توجه در مسائل زیست‌محیطی، آبخیزداری و منابع طبیعی می‌باشد. اهمیت زمین‌لغزش‌ها را می‌توان از دیدگاه‌های گوناگونی مورد بحث و بررسی قرار داد. مهم‌ترین دلیل با اهمیت بودن این پدیده، خسارت‌های جانی و مالی ناشی از به وقوع پیوستن آن‌ها می‌باشد (رجب‌زاده، ۱۳۹۲: ۲). ایران به دلیل توپوگرافی عمدتاً کوهستانی، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، پتانسیل طبیعی برای زمین‌لغزش‌های گسترده را دارد (نیک‌اندیش، ۱۳۷۶: ۱۶). بر اساس برآوردهای اولیه در ایران سالانه حدود ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت مالی از طریق وقوع زمین‌لغزش وارد می‌شود (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸: ۲۷). طبق بررسی‌های وزارت جهاد سازندگی تا سال ۱۳۸۵ حدود ۱۵ هزار زمین‌لغزش در ایران رخ داده است (کمک پناه، ۱۳۸۵: ۵). از این رو لزوم شناخت مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش برای دستگاه‌های اجرایی مسئول اهمیت زیادی دارد.

از عوامل مؤثر در ایجاد زمین‌لغزش‌ها می‌توان به پارامترهای مربوط به عوامل هیدرولوژی، اقلیم، فیزیوگرافی، زمین‌شناسی، خاک، پوشش گیاهی اشاره کرد (پتسچیکو^۲ و همکاران، ۲۰۱۴: ۹۵-۱۱۸). علاوه بر عوامل طبیعی شامل لیتولوژی زمین‌ساخت و اقلیم، نقش انسان نیز قابل توجه است. راه‌سازی، دیم‌زارهای کم بازده، ایجاد سکونتگاه‌های غیراصولی و غیره از جمله عوامل انسانی دخیل در حرکات دامنه‌ای هستند. شناخت این عوامل و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، استعدادهای بالقوه منطقه را بهتر سنجیده و یک ناحیه را از نظر خطرپذیری به چند زیر ناحیه تقسیم می‌کند تا کار برنامه‌ریزی آسان‌تر گردد (یمانی و همکاران، ۱۳۹۱: ۴۰). به‌طور کلی می‌توان هدف نهایی از بررسی و مطالعه‌ی زمین‌لغزش‌ها را یافتن راه‌های کاهش خسارت‌های ناشی از آن‌ها ذکر کرد. این کار ممکن است به روش‌های مختلف مانند پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش برای مناطق مستعد و تهیه‌ی دستورالعمل‌ها و آیین‌نامه‌ها برای استفاده مناسب یا پرهیز از این مناطق توسط مطالعه موردی یک زمین‌لغزش و ارائه‌ی راه‌حل برای کنترل آن یا هر روش دیگر صورت گیرد (سفیدگری، ۱۳۷۲: ۹۲).

امروزه به واسطه توسعه سریع قدرت پردازش کامپیوترها و فناوری سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS^۳)، تعداد وسیعی از روش‌های کمی و آماری در ارزیابی حساسیت رخداد زمین‌لغزش گسترش یافته است (وانگ^۴، ۲۰۱۳: ۸۱). از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌هایی مثل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP^۵)، فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP^۶)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN^۷)، مدل LNR و مدل منطق فازی و غیره اشاره کرد.

مدل‌های ارزیابی حساسیت وقوع زمین‌لغزش را می‌توان در چهار طبقه تقسیم‌بندی کرد: (۱) ارزیابی بر اساس زمین‌لغزش‌های موجود (۲) ارزیابی بر اساس مدل‌های اکتشافی (۳) تحلیل‌های آماری (۴) نگرش‌های جبری یا قطعی (کارارا^۸ و همکاران، ۱۹۹۵؛ ارمینی^۹ و همکاران، ۲۰۰۵). تحقیقاتی که بر اساس نگرش زمین‌لغزش‌های ثبت‌شده و مدل‌های اکتشافی انجام می‌شود بر مبنای ارزیابی‌های ذهنی متخصص صورت گرفته و عموماً برای مطالعات ابتدایی در مورد یک منطقه وسیع است. روش‌های آماری مناسب برای مطالعات در سطح منطقه هستند و ارتباط بین زمین‌لغزش و فاکتورهای مورد استفاده

1- Gorsevski

2- Petschko

3- Geographic Information System

4- Wang

5- Analytical Hierarchy Process

6- Analytic Network Process

7- Artificial Neural Network

8- Carrara

9- Ermini

را با روشی دقیق‌تر و علمی‌تر مورد ارزیابی قرار می‌دهند. نگرش‌های جبری یا قطعی بر مبنای الگوهای ریاضی انجام گرفته و تنها در مقیاس‌های محلی کاربرد دارند چون نیازمند اطلاعات جزئی‌تری از منطقه مورد مطالعه هستند (پیاستینی^۱ و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۹۶).

یکی از وظایف دانش ژئومورفولوژی کاربردی، بررسی موقعیت و ارزش محیط‌های انسانی خطرپذیر و آسیب‌پذیر در برابر انواع مخاطرات ژئومورفیک است (روزنفلد^۲، ۲۰۰۴: ۴۲۳). مخاطرات ژئومورفولوژیکی نیز به احتمال ناپایداری پدیده‌های خاص ژئومورفولوژیکی گفته می‌شود که ممکن است در قلمرو معینی با بزرگی و دوره‌های زمانی مشخص رخ دهد (پانیزا^۳، ۲۰۰۴: ۳۱۸). تهیه نقشه وقوع خطر زمین‌لغزش ابزاری اساسی برای فعالیت‌های مدیریت بحران در نواحی کوهستانی است (کومار داهال^۴، ۲۰۰۸: ۴۹۶). پهنه‌بندی زمین‌لغزش شامل تقسیم‌بندی سطح زمین به مناطق مجزا و رتبه‌بندی کردن این مناطق بر اساس درجه‌ی واقعی یا پتانسیل خطر ناشی از بروز زمین‌لغزش بر روی شیب دامنه‌ها است (شریعت جعفری، ۱۳۷۵: ۱۳۸).

مطالعات متعددی در زمینه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در داخل و خارج از کشور طی سال‌های اخیر انجام شده است که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

روستایی و احمدزاده (۱۳۹۱) در پهنه‌بندی مناطق متاثر از زمین‌لغزش در جاده ی تبریز- مرند به این نتیجه رسیدند که ساختار خاص زمین شناختی، شرایط اقلیم محلی و نیز تراکم نهشته‌های کواترنری (در هر دو طرف جاده) در کنار عامل گرادبان شیب، از عوامل اصلی بروز زمین‌لغزش است که ساخت و ساز انسانی آن را تشدید می‌کند. همچنین مناطق قرار گرفته در پهنه با خطر بالا، منطبق بر مناطقی است که در آن‌ها زمین‌لغزش رخ داده است. امیر احمدی و همکاران (۱۳۹۴) در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه پیوه ژن دامنه جنوبی بینالود با استفاده از مدل ANP به این نتیجه رسیدند که عامل فاصله از رودخانه و فاصله از جاده بیشترین امتیاز وزنی را دارند و مدل ANP به عنوان مدلی مناسب برای پیش بینی پدیده لغزش می‌باشد. روستایی و همکاران (۱۳۹۴)، با استفاده از مدل ANP به بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در محدوده محور و مخزن سد قلعه چای پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که مدل ANP با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها ۶۷/۳۳ درصد تناسب دارد. همچنین نتایج این تحقیق نشان که معیارهای کاربری اراضی، جهت شیب و طبقات ارتفاعی نقش مهمی در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه دارند. روستایی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز میمه به روش ANP به این نتیجه رسیدند که فرایند تحلیل شبکه با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها تناسب زیادی دارد و معیارهای بارندگی، لیتولوژی و طبقات ارتفاعی نقش مهمی در زمین‌لغزش‌های منطقه دارد. نظم فر و بهشتی (۱۳۹۵)، در تحقیقی به پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل ANP و منطق فازی در حوضه آبریز چلی چای واقع در استان گلستان پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که ۷۰ درصد زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه در کلاس‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است. عابدینی و همکاران (۱۳۹۵) در پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با مدل هیبریدی قضیه بیزو - ANP در حوضه اهر چای به نتیجه رسیدند که ۳۴/۰۲ درصد از اراضی محدوده مورد مطالعه از پتانسیل بسیار بالایی برای وقوع زمین‌لغزش برخوردار می‌باشند و درصد قابل توجهی از زمین‌لغزش‌ها در طبقه با حساسیت زیاد قرار دارند. نیری و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیقی با استفاده از مدل تحلیل شبکه به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در شهرستان بیجار پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که ۴۱ درصد از محدوده شهرستان بیجار جزو مناطق دارای قابلیت خطر محسوب می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که از بین متغیرهای محیطی مؤثر، فاصله از گسل و ارتفاع،

1- Piacentini

2- Rosenfeld

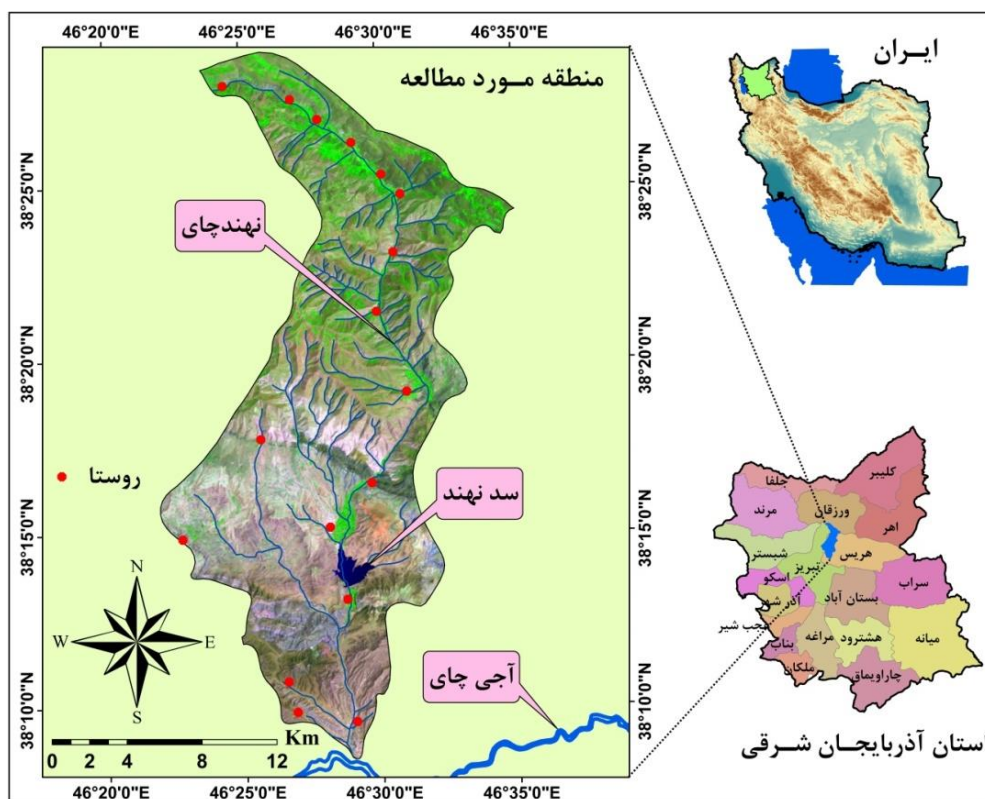
3- Panizza

4- Kumar Dahal

بیشترین و کاربری اراضی کمترین تأثیر را در زمین‌لغزش در محدوده شهرستان بیجار دارند. از مطالعات انجام گرفته در خارج از کشور نیز می‌توان به مطالعات محققانی همچون میلچوری و تریگواسون^۱ (۲۰۱۵)، وانگ و همکاران (۲۰۱۵)^۲ و همکاران (۲۰۱۶)^۳، تیرسانکار باسو و سادس^۴ (۲۰۱۷)، توماس^۴ و همکاران (۲۰۱۸) و وانگ و همکاران (۲۰۱۸) اشاره کرد.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز نهندچای با وسعتی در حدود ۳۲۷ کیلومترمربع در محدوده سیاسی سه شهرستان تبریز، ورزقان و هریس در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. این منطقه از نظر موقعیت جغرافیایی بین $38^{\circ}00'N$ تا $38^{\circ}25'N$ و $46^{\circ}20'E$ تا $46^{\circ}35'E$ طول شرقی و $38^{\circ}00'N$ تا $38^{\circ}25'N$ عرض شمالی قرار گرفته است. بر پایه‌ی گزارش‌های هواشناسی، متوسط بارندگی سالانه بین ۵۰۰-۳۰۰ میلی‌متر در سال متغیر است و بیشترین بارش مربوط به ماه‌های اسفند و اردیبهشت (بارش‌های نپسان) است. طبق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن آب‌وهوای منطقه جزو مناطق نیمه‌خشک می‌باشد. این حوضه جزو زیرحوضه های حوضه آبریز دریاچه ارومیه محسوب می‌شود و آب‌های سطحی آن پس از پیوستن به رودخانه آجی چای به دریاچه ارومیه می‌ریزد. حداکثر ارتفاع حوضه، ۲۸۵۴ متر و حداقل ارتفاع در خروجی حوضه برابر با ۱۴۸۱ متر از سطح دریا می‌باشد. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

- 1- Melchiorre and Tryggvason
- 2- Chen
- 3- Tirthankar Basu and Swades
- 4- Thomas

روش تحقیق

در تحقیق حاضر جهت تهیه نقشه خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز نهندچای از داده، نرم‌افزار و روش‌های زیر استفاده شده است:

- تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده OLI، مربوط به سال ۱۳۹۵ (تیر ماه) با گذر و ردیف‌های ۳۳-۱۶۸ و ۳۴-۱۶۸ جهت پوشش کامل منطقه.
- نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه برگرفته از سازمان زمین‌شناسی کشور
- نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه
- اطلاعات داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک (تبریز، ورزقان و هریس) و کلیماتولوژی موجود در منطقه
- مدل رقومی ارتفاعی تصاویر استر (ASTGTM¹) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر
- نرم‌افزارهای ArcGIS و ENVI جهت تهیه نقشه‌ها
- نرم‌افزار Super Decisions جهت ساخت مدل شبکه‌ای و برقراری روابط داخلی و خارجی معیارها
- مدل ANP جهت وزن‌دهی معیارهای مورد استفاده در تحقیق
- نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های رخ داده در سطح منطقه به منظور ارزیابی دقت مدل مورد استفاده در تحقیق

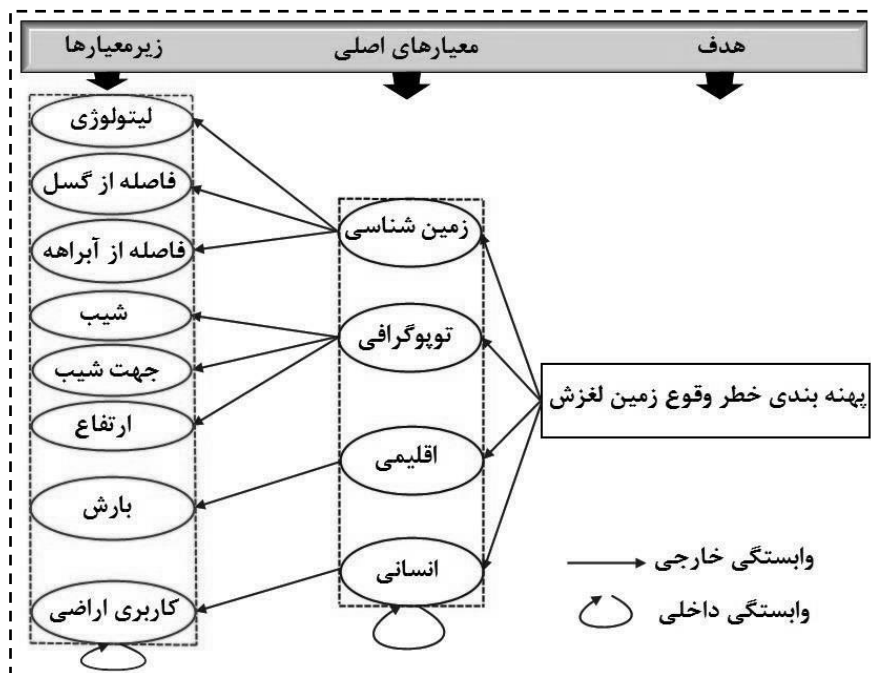
فرایند تحلیل شبکه (ANP)

فرایند تحلیل شبکه‌ای یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است که توسط توماس ال ساعتی در سال ۱۹۸۰ توسعه یافته است. در این مدل معیارها به‌عنوان عناصر داخل دسته‌هایی به نام خوشه قرار می‌گیرند (ساعتی^۲، ۱۹۸۰: ۲۸۷). این مدل شبکه‌ای از ارتباطات بین عناصر خوشه‌های مختلف وابستگی (وابستگی خارجی) و نیز ارتباطات بین عناصر داخل یک خوشه (ارتباطات داخلی) است. در حقیقت مدل ANP روابط متقابل بین مؤلفه‌ها را نیز نشان می‌دهد (ساعتی، ۲۰۰۶: ۳۶۳). مدل ANP به‌جای سلسله مراتب از ساختار شبکه‌ای بهره می‌برد و علاوه بر داشتن کلیه ویژگی‌های مدل AHP شامل سادگی، انعطاف‌پذیری، به‌کارگیری معیارهای کمی و کیفی به‌طور همزمان، انجام مقایسه‌های زوجی و بررسی سازگاری در قضاوت‌ها قادر به برقراری ارتباطات متقابل و دوسویه و وابستگی‌های داخلی علاوه بر روابط سلسله مراتبی در شبکه است (گارسیا^۳ و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۴۳-۱۵۵). فرایند تحلیل شبکه‌ای را می‌توان در ۴ مرحله اجرا کرد. گام نخست، تعیین مسئله تصمیم‌گیری و ارائه آن در یک مدل شبکه‌ای است. در این مرحله، پس از تعیین مسئله تصمیم‌گیری و عوامل مؤثر بر آن باید یک مدل شبکه‌ای تشکیل شود. این مدل شامل مسئله تصمیم‌گیری، خوشه‌ها، عناصر و وابستگی‌های داخلی و خارجی بین آن‌هاست. برای تهیه این ساختار شبکه‌ای روش‌های مختلفی از جمله روش توفان فکری، روش دلفی، روش گروه اسمی و یا روش‌های ریاضی نظیر DEMATEL وجود دارد. در این شبکه وابستگی‌های خارجی به‌صورت پیکان و وابستگی‌های داخلی به‌صورت کمان نشان داده می‌شود (زبردست، ۱۳۹۱: ۹۰).

1- ASTER Global Digital Elevation Model

2- Saaty

3- Garcia



شکل ۲. ساختار مدل شبکه‌ای برای پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش

گام دوم، تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی و استخراج بردارهای اولویت است. در این مرحله عناصر تصمیم‌گیری در هر یک از خوشه‌ها، بر اساس میزان اهمیتشان در ارتباط با معیارهای کنترلی دوبه‌دو مقایسه می‌شوند (زبردست، ۱۳۹۱: ۹۰). همانند مدل AHP برای بیان ارجحیت در ماتریس‌های مقایسه‌ی زوجی از اعداد ۱ تا ۹ و معکوس آن‌ها استفاده می‌شود (جدول ۱). به‌عنوان نمونه عدد a_{ij} نشان‌دهنده‌ی ارجحیت مؤلفه‌ی سطر i به مؤلفه‌ی ستون j است ($a_{ij} = w_i/w_j$). عدد ۱ بدین معناست که دو مؤلفه اهمیت برابر دارند و عدد معکوس ($1/a_{ij}$) نشانگر اهمیت بالای مؤلفه‌ی ستون j نسبت به مؤلفه‌ی سطر i است.

جدول ۱. مقادیر ترجیحات و قضاوت کارشناسی برای مقایسه زوجی

مقدار عددی	ترجیحات (قضاوت شفاهی)
۹	کاملاً مهم‌تر یا کاملاً مطلوب‌تر (Extremely preferred)
۷	اهمیت خیلی قوی (Very strongly preferred)
۵	اهمیت یا مطلوبیت قوی (Strongly preferred)
۳	کمی مطلوب‌تر یا کمی مهم‌تر (Moderately preferred)
۱	اهمیت یا مطلوبیت یکسان (Equally preferred)
۸-۶-۴	اولویت بین فواصل
۲	

پس از نوشتن ارجحیت‌ها در ماتریس‌های مقایسه‌ی زوجی، بردار اهمیت داخلی که بیانگر اهمیت نسبی عناصر یا خوشه‌هاست به دست می‌آید:

$$AW = \lambda_{max}$$

رابطه (۱)

که در آن A: ماتریس مقایسه‌ی دودویی معیارها، W: بردار ویژه (ضریب اهمیت) و λ_{max} : بزرگ‌ترین مقدار ویژه‌ی عددی است. تعیین صحت ماتریس‌های مقایسه‌ی زوجی با محاسبه‌ی نسبت سازگاری (CR) انجام می‌گیرد.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن CI: شاخص سازگاری و n: تعداد مؤلفه‌های مورد مقایسه در ماتریس می‌باشد.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه CR: نسبت پایداری یا نرخ سازگاری و RI: بیانگر شاخص تصادفی است که به تعداد عناصر مورد مقایسه بستگی دارد. مقایسه‌ی دو به دو زمانی قابل قبول و دارای پایداری خواهد بود که نسبت پایداری کمتر از ۰/۱ به دست آید (ساعتی، ۱۹۹۹).

گام سوم، تشکیل سوپر ماتریس است. یک سوپر ماتریس روابط موجود در ساختار شبکه‌ای و نیز وزن‌های نسبی محاسبه‌شده در مرحله دوم را ارائه می‌دهد. در واقع، از اجتماع کلیه‌ی بردارهای اولویت محاسبه‌شده برای تک‌تک ماتریس‌های مقایسه زوجی در یک ماتریس، سوپر ماتریس به دست می‌آید (لامی، ۲۰۱۴: ۱۱). در فرایند تحلیل شبکه‌ای سه نوع سوپر ماتریس ساخته می‌شود:

سوپر ماتریس اولیه (ناموزون): از وارد کردن همه بردارهای ویژه به دست آمده از ماتریس‌های مقایسه زوجی به ماتریس اولیه، سوپر ماتریس ناموزون به دست می‌آید (لامی، ۲۰۱۴: ۱۱).

سوپر ماتریس موزون: از ضرب ارزش‌های موجود در سوپر ماتریس ناموزون در وزن هر خوشه، سوپر ماتریس موزون به دست می‌آید. سپس این سوپر ماتریس نرمالیزه و از نظر ستونی به حالت تصادفی تبدیل می‌شود (ساعتی، ۱۹۹۹: ۱۲).

سوپر ماتریس حد: اگر همه عناصر سوپر ماتریس موزون تا جایی به توان برسد که همگرایی حاصل شود و به بیان دیگر ارزش‌های کلیه ستون‌های ماتریس یکسان شوند، آنگاه سوپر ماتریس حد تشکیل می‌شود که هر ستون آن نشان‌دهنده‌ی بردار اولویت کلی است (رابطه ۴) (لامی، ۲۰۱۴: ۱۱).

$$\lim_{k \rightarrow \infty} w^k \quad \text{رابطه (۴)}$$

گام چهارم: محاسبه وزن نهایی معیارهاست. این گام آخرین مرحله در مدل ANP است که در آن با تشکیل سوپر ماتریس حد بردار، وزن نهایی معیارها و غیرمعیارها به دست می‌آید (لامی، ۲۰۱۴: ۱۱).

بحث و یافته‌ها

تهیه لایه‌های اطلاعاتی

دانشمندان علوم زمین و جغرافیادانان به منظور پهنه‌بندی زمین‌لغزش از نوع و تعداد عوامل متفاوتی بهره گرفته‌اند. در این پژوهش به بررسی ۸ شاخص از مهم‌ترین عوامل موثر در فرایند زمین‌لغزش با توجه به استفاده از تجربیات کارشناسان و پژوهشگران در بررسی‌های صورت گرفته در مناطق مشابه پرداخته شده است که عبارتند از: شیب، جهت شیب، ارتفاع، بارش، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل، کاربری اراضی و زمین‌شناسی (شکل ۳). جهت شیب به علت ارتباطی که با سرعت زمان جذب، از دست دادن رطوبت، فشار منفذی دریافت نور و تخریب موضعی دارد، دارای نقش مهمی در فرایندهای دامنه‌ای است (آیلو و یاماگیشی^۲، ۲۰۰۵). شیب از عوامل مهم در وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. بدین صورت که با ثابت بودن دیگر عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، هر قدر دامنه‌ای پرضیب‌تر باشد، بیشتر مستعد ناپایداری است (مقیم و محمودی، ۱۳۸۳: ۲۸۴). ارتفاع از یک طرف بر روی نحوه پراکنش فعالیت انسانی و استقرار سکونتگاه‌ها و همچنین کنترل نوع کاربری‌ها تاثیر می‌گذارد از طرف دیگر با تغییر شکل بارش میزان نفوذپذیری را به عنوان عامل مهم در وقوع زمین‌لغزش

1- Lami

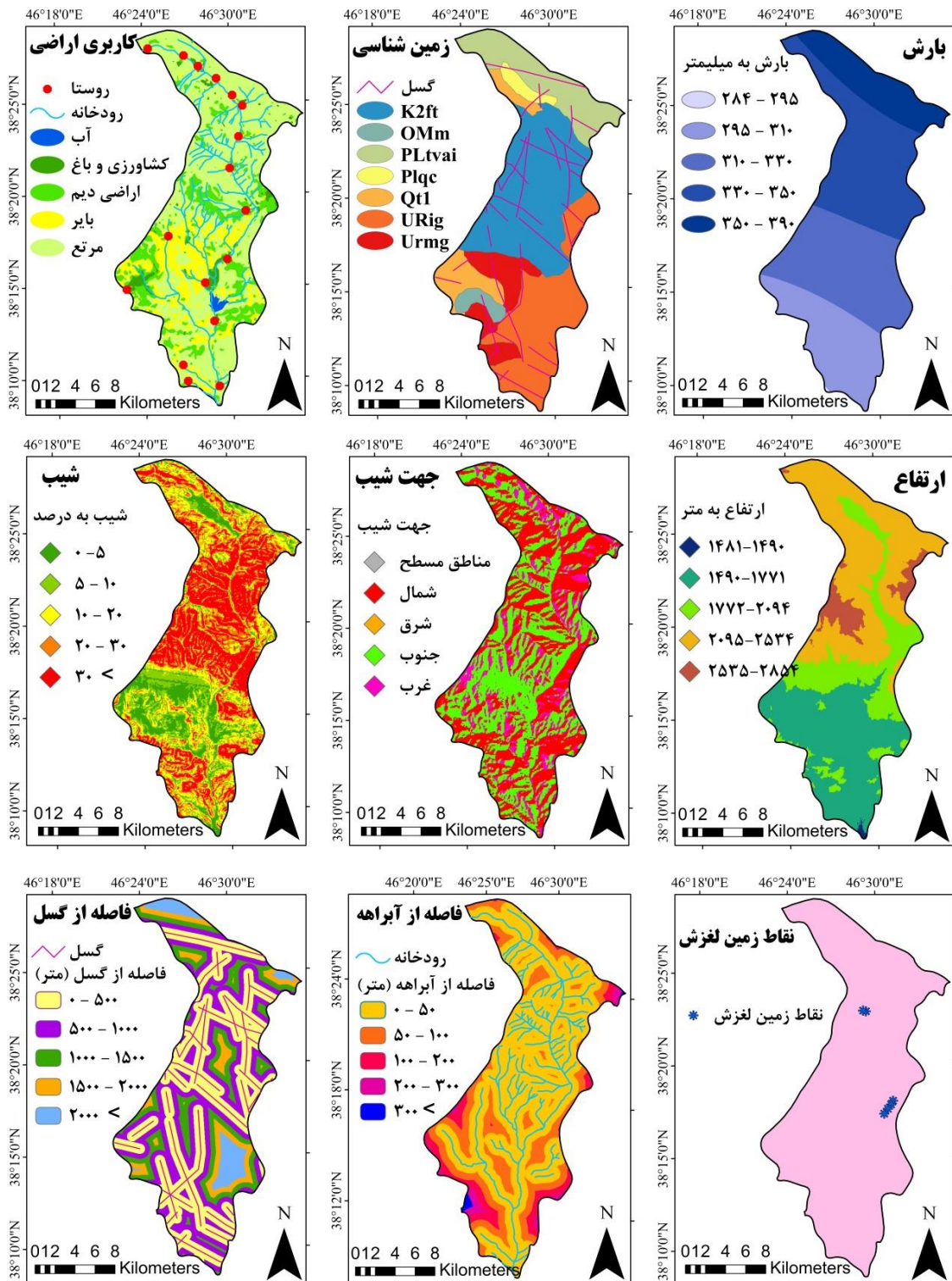
2- Ayalew and Yamagishi

را تحت تاثیر قرار می دهد. مطالعات مربوط به طبقات ارتفاعی نشان می دهد رابطه مستقیم بین ارتفاع و زمین لغزش وجود دارد به طوری که با افزایش ارتفاع تعداد زمین لغزش افزایش می یابد. در این تحقیق جهت تهیه نقشه های شیب، جهت شیب و طبقات ارتفاعی منطقه مورد مطالعه از مدل رقومی ارتفاعی تصاویر استر (ASTGTM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شده است. جهت تهیه نقشه بارش از اطلاعات داده های بارش ایستگاه های سینوپتیک (تبریز، ورزقان و هریس) و کلیماتولوژی موجود در منطقه استفاده شده است. به منظور تعمیم داده های نقطه ای ایستگاه ها به داده های پهنه ای از روش درون یابی^۱ IDW به دلیل دقت بیشتر و خطای کمتر نسبت به دیگر روش های درون یابی استفاده شده و داده های مربوط به بارش درون یابی شده و به نقشه تبدیل شدند. در این تحقیق جهت تهیه نقشه آبراهه های منطقه مورد مطالعه از نقشه های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ استفاده شده است. بدین صورت که پس از تصحیح هندسی نقشه ها (ژئورفرنس)، آبراهه های موجود در سطح منطقه در محیط نرم افزار ArcGIS رقومی شده و مورد استفاده قرار گرفته اند. گسل از دیگر عوامل ناپایداری دامنه است و بیشتر زمین لغزش ها در نزدیکی گسل اتفاق می افتد. مناطق گسلی به وسیله ایجاد شیب های تند، مناطق برشی ضعیف شده و سنگ های دارای شکستگی، پتانسیل وقوع زمین لغزش را افزایش می دهند (رجب زاده، ۱۳۹۲). برای تهیه نقشه گسل های منطقه از نقشه های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ برگرفته از سازمان زمین شناسی کشور استفاده شده است. جهت تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه از باندهای مرئی تصاویر ماهواره ای لندست ۸ سنجنده OLI، مربوط به سال ۱۳۹۵ (تیر ماه) با گذر و ردیف های ۳۳-۱۶۸ و ۳۴-۱۶۸ استفاده شده است. در مرحله ی اول عملیات پیش پردازش شامل تصحیح اتمسفری FLAASH بر روی تصاویر اجرا شد. در مرحله ی بعدی جهت استخراج کاربری ها از روش طبقه بندی نظارت شده ی حداکثر احتمال استفاده شد و هر یک از کاربری های منطقه بر روی نقشه در محیط نرم افزار ENVI مشخص گردید. تاثیر ویژگی های لیتولوژی در وقوع زمین لغزش غیرقابل انکار است و به طور گسترده از طرف محققین به عنوان یکی از عوامل مهم زمین لغزش مورد مطالعه قرار گرفته است. علت اینکه واحدهای لیتولوژی مختلف، درجه استعداد زمین شناسی لغزش متفاوت دارند اغلب به خاطر اختلاف در قدرت نفوذپذیری آن هاست (دای^۲ و همکاران، ۲۰۰۱). جهت تهیه نقشه زمین شناسی نیز از نقشه های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور استفاده شده است. نقشه پراکنش زمین لغزش مجموعه ای از زمین لغزش های رخ داده در یک ناحیه مشخص است و سبب آگاهی در مورد مناطق وقوع زمین لغزش و کسب اطلاعات از نوع و خسارت های آن ها می شود (فون وسترن^۳ و همکاران، ۲۰۰۸). جهت تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش های منطقه مورد مطالعه از داده های اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان آذربایجان شرقی و همچنین نرم افزار گوگل ارث استفاده شده است.

1- Inverse Distance Weighted

2- Dai

3- Van Westen



شکل ۳. لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در تحقیق

وزن دهی معیارها و تهیه نقشه نهایی

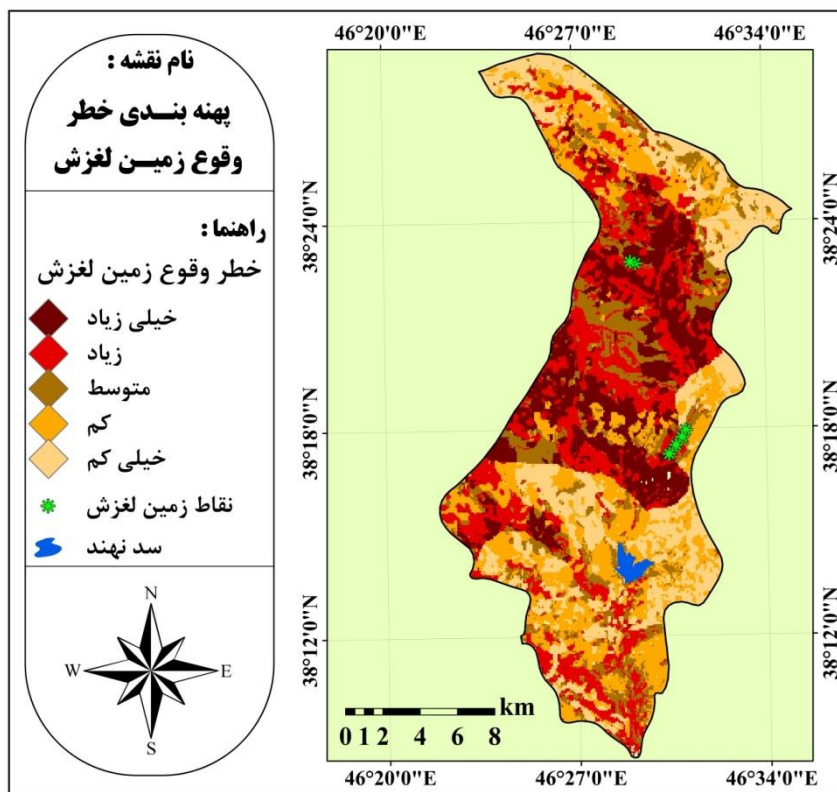
جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی ابتدا لازم است که ضرایب و وزن عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در منطقه محاسبه شود. این کار طی مراحلی که در قسمت روش تحقیق بیان شد در نرم‌افزار Super Decisions انجام و وزن نهایی هر یک از عوامل مشخص شد (جدول ۲). در مدل ANP، لایه‌ای که بیشترین تأثیر را در تعیین هدف دارد بیشترین وزن را به خود می‌گیرد. چون هدف این تحقیق پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز نهندچای است، پارامترهای تأثیرگذار در ناپایداری دامنه‌ها می‌تواند به‌عنوان مهم‌ترین عوامل برای نیل به هدف نهایی در نظر گرفته شود. بنابراین برای لایه‌های زمین‌شناسی، بارش، کاربری اراضی و فاصله از آبراهه با توجه به اهمیت آن‌ها در ناپایداری سازی دامنه‌ها و وقوع زمین‌لغزش، بیشترین وزن در نظر گرفته شد. وزن دهی سایر عوامل نسبت به کاهش تأثیرشان در ناپایداری دامنه‌ها کم‌تر می‌شود. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، نرخ سازگاری برابر با ۰/۰۵ به دست آمده است که صحت وزن دهی معیارها را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ماتریس دوجه دو، وزن نهایی معیارها و نرخ سازگاری

وزن نهایی	جهت شیب	ارتفاع	فاصله از گسل	شیب	فاصله از آبراهه	کاربری اراضی	بارش	زمین‌شناسی	معیارها
۰/۲۹۶	۷	۵	۴	۶	۲	۳	۲	۱	زمین‌شناسی
۰/۱۹۶	۶	۴	۴	۲	۲	۲	۱	۱/۲	بارش
۰/۱۸۰	۴	۴	۵	۵	۲	۱	۱/۲	۱/۳	کاربری اراضی
۰/۱۳۴	۵	۴	۳	۳	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۲	فاصله از آبراهه
۰/۰۶۴	۲	۲	۲	۱	۱/۳	۱/۵	۱/۲	۱/۶	شیب
۰/۰۵۴	۳	۲	۱	۱/۲	۱/۳	۱/۵	۱/۴	۱/۴	فاصله از گسل
۰/۰۴۴	۳	۱	۱/۲	۱/۲	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۵	ارتفاع
۰/۰۲۸	۱	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۱/۵	۱/۴	۱/۶	۱/۷	جهت شیب
نرخ سازگاری: ۰/۰۵									

پس از مشخص شدن وزن نهایی هر یک از معیارها، اقدام به تهیه نقشه پهنه‌بندی وقوع زمین‌لغزش گردید. بدین منظور ابتدا در محیط نرم‌افزار ArcGIS، لایه‌های اطلاعاتی به فرمت رستری تبدیل شده و سپس وزن نهایی هر یک از معیارها به لایه اطلاعاتی‌شان در محیط Raster Calculator اعمال شد (رابطه ۵) و با همپوشانی این لایه‌ها نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش برای حوضه آبریز نهندچای به دست آمد (شکل ۴).

رابطه (۵): $(\text{زمین‌شناسی} \times 0/296) + (\text{بارش} \times 0/196) + (\text{کاربری اراضی} \times 0/180) + (\text{فاصله از رودخانه} \times 0/134) + (\text{شیب} \times 0/064) + (\text{فاصله از گسل} \times 0/054) + (\text{ارتفاع} \times 0/044) + (\text{جهت شیب} \times 0/028) =$ نقشه پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع زمین‌لغزش



شکل ۴. نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز نهندچای

بر اساس عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در قالب لایه‌های اطلاعاتی، حوضه آبریز نهندچای از نظر پتانسیل وقوع زمین‌لغزش به پنج طبقه از خطر خیلی زیاد تا خیلی کم تقسیم شد. مساحت هر یک از طبقات پنج‌گانه و تعداد لغزش‌های رخ داده در هر یک از پهنه‌های خطر در جدول (۳)، ارائه شده است. بیشترین مساحت منطقه مورد مطالعه از نظر خطر وقوع زمین‌لغزش مربوط به طبقه خطر کم با مساحت ۷۵ کیلومتر مربع می‌باشد.

جدول ۳. مساحت و درصد مساحت پهنه‌های لغزشی و ارزیابی لغزش‌های رخ داده در پهنه‌های خطر

پهنه‌های خطر	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت	تعداد لغزش‌ها	درصد تعداد لغزش‌ها
خیلی زیاد	۶۰	۱۸/۳	۲	۳۳/۳
زیاد	۷۳/۵	۲۲/۵	۳	۵۰
متوسط	۵۰	۱۵/۳	۱	۱۶/۶
کم	۷۵	۲۳/۱	-	-
خیلی کم	۶۷	۲۰/۵	-	-

طبق نقشه نهایی، ۱۳۳/۵ کیلومتر مربع از مساحت منطقه دارای پتانسیل زیاد و خیلی زیاد از نظر وقوع زمین‌لغزش، ۱۴۲ کیلومتر مربع پتانسیل کم و خیلی کم و ۵۰ کیلومتر مربع دارای پتانسیل متوسط می‌باشد. مناطق با پتانسیل بالا از نظر وقوع زمین‌لغزش بیشتر منطبق بر کناره‌های آبراهه‌های منطقه به دلیل شستگی پای دامنه‌ها توسط آبراهه‌ها و بالا بردن

حساسیت ناپایداری مواد دامنه‌ها است. در مراتع منطقه نیز خطر وقوع زمین‌لغزش زیاد است. در این مراتع چرای بیش‌ازحد دام باعث از بین رفتن پوشش گیاهی شده و در نتیجه منجر به مستعد شدن منطقه برای ایجاد زمین‌لغزش می‌گردد.

ارزیابی دقت مدل ANP در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه نشان می‌دهد که بیش از ۸۰ درصد زمین‌لغزش‌ها در مناطق با پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد به وقوع پیوسته است. بنابراین می‌توان گفت که مدل ANP از دقت قابل قبولی در تهیه نقشه خطر وقوع زمین‌لغزش حوضه آبریز نهند چای برخوردار می‌باشد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق باهدف تهیه نقشه پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز نهندچای انجام شد. جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش ۸ فاکتور مؤثر در وقوع این پدیده شامل شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل و بارش در منطقه انتخاب شدند. در مرحله بعد جهت تعیین میزان تأثیر هر یک از معیارها در وقوع زمین‌لغزش، از مدل ANP استفاده‌شده و وزن دهی معیارها در نرم‌افزار Super Decisions انجام گرفت. پس از مشخص کردن وزن معیارها، با ضرب وزن‌های نهایی هر یک از معیارها در لایه اطلاعاتی تهیه شده در نرم‌افزار ArcGIS، نقشه پهنه‌بندی تهیه شد. طبق نقشه پهنه‌بندی از کل مساحت منطقه مورد مطالعه ۶۰ کیلومترمربع (۱۸٪/۳) پهنه‌های با خطر خیلی زیاد، حدود ۷۳ کیلومترمربع (۲۲٪/۵) پهنه‌های با خطر زیاد، ۵۰ کیلومترمربع (۱۵٪/۳) پهنه‌های با خطر متوسط، ۷۵ کیلومترمربع (۲۳٪/۱) پهنه‌های با خطر کم و ۶۷ کیلومترمربع (۲۰٪/۵) از منطقه مورد مطالعه با خطرپذیری خیلی کم برای ایجاد زمین‌لغزش را در برمی‌گیرد. از میان ۸ پارامتر مورد بررسی، معیارهای زمین‌شناسی، بارش، کاربری اراضی و فاصله از آبراهه بیشترین تأثیر را داشته‌اند. نقشه نهایی نشان داد که بیش از ۴۰ درصد منطقه از حساسیت زیاد و خیلی زیادی از نظر وقوع زمین‌لغزش برخوردار می‌باشد. این مناطق بیشتر مناطق مرکزی حوضه را شامل می‌شوند. از عوامل مؤثر در بالا بودن میزان پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در این قسمت از منطقه می‌توان به وجود آبراهه‌های زیاد اشاره کرد که با شستشوی مواد کناره‌های خود باعث ناپایداری مواد دامنه‌ها در بالادست شده و وقوع زمین‌لغزش را تسهیل می‌کنند. همچنین این مناطق از نظر کاربری اراضی نیز جزو کاربری‌های مرتع و کشاورزی دیم می‌باشد. مردم محلی با چرای بیش از حد دام‌های خود در این مراتع، باعث نابودی پوشش گیاهی شده و به روند رخداد زمین‌لغزش بعد از وقوع بارش‌های سیل‌آسا سرعت می‌بخشند. در بعضی از دامنه‌ها که اراضی دیم قرار دارند نیز کشاورزان با شخم زدن نامناسب زمین باعث برهم خوردن تعادل و پایداری مواد روی دامنه‌ها شده و منجر به وقوع زمین‌لغزش می‌شوند. در بین سازندهای زمین‌شناسی نیز در مناطقی که مارن وجود داشته، پتانسیل خطر وقوع زمین‌لغزش زیاد بوده است. این به خاطر آن است که رسوبات مارن موجود در حوضه در دامنه‌های شمالی به دلیل اینکه زمان کمتری از نور تابش بهره می‌گیرند، دمای پایین‌تری دارند که این عامل باعث کاهش میزان تبخیر و در نتیجه افزایش رطوبت خاک می‌گردد. لذا آب به تدریج در زمین نفوذ کرده موجب آب‌گیری مارن و رسیدن به حد خمیری و افزایش نیروی ثقل و حرکت روی دامنه می‌شود. بررسی طبقات ارتفاعی نشان داد که ارتفاعات بین ۱۷۰۰ تا ۲۵۰۰ متر بیشترین حساسیت را نسبت به زمین‌لغزش دارند. مقایسه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی و نقاط پراکنش زمین‌لغزش که حاصل مطالعات میدانی و بررسی تصاویر ماهواره‌ای هست گویای این مطلب است که بیش از ۸۰ درصد لغزش‌ها در پهنه‌های خطر خیلی زیاد و زیاد اتفاق افتاده‌اند. بنابراین مدل ANP به دلیل توانایی در تفکیک پهنه‌های خطر، روش مناسبی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز نهندچای می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر با نتایج پژوهشگرانی همچون روستایی و همکاران (۱۳۹۴) در حوضه آبخیز رودخانه میمه واقع در استان ایلام، روستایی و خدائی (۱۳۹۵) در محدوده محور و مخزن سد قلعه چای در استان آذربایجان

شرقی و نیری و همکاران (۱۳۹۶) در شهرستان بیجار مطابقت دارد. پژوهشگران نام برده روش فرآیند تحلیل شبکه را روش مناسبی جهت پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش پیشنهاد کرده بودند که نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نیز بیانگر تأیید نتایج محققین مذکور می‌باشد. بنابراین با توجه به یافته‌های تحقیق که نشان می‌دهد بیش از ۴۰ درصد منطقه از پتانسیل بالایی جهت وقوع مخاطره زمین‌لغزش برخوردار هستند، به نظر می‌رسد که باید در برنامه‌ریزی‌های محیطی، تمهیدات لازم برای مقابله با این پدیده و کاهش خسارت‌های جانی و مالی آن در منطقه دیده شود.

منابع

- امیر احمدی، ابوالقاسم؛ شکاری بادی، علی؛ معتمدی راد، محمد؛ بینقی، مریم، ۱۳۹۴، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل ANP در حوضه پیوه ژن دامنه جنوبی بینالود، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۲، صص ۲۳۰-۲۱۴.
- حسین‌زاده، محمدمهدی، ثروتی، محمدرضا، منصوری، عادل، میرباقری، بابک؛ خضری، سعید، ۱۳۸۸، پهنه‌بندی ریسک وقوع حرکات توده‌ای با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال ۳، شماره ۱۱، صص ۳۷-۲۷.
- رجب‌زاده، حمیدرضا، ۱۳۹۲، ارزیابی و پهنه‌بندی احتمال خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز گذار چای نقده با استفاده از GIS، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، ۱۱۶ صفحه.
- روستایی، شهرام؛ احمدزاده، حسن، ۱۳۹۱، پهنه‌بندی مناطق متأثر از خطر زمین‌لغزش در جاده‌ی تبریز - مرند با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۱، صص ۵۸-۴۷.
- روستایی، شهرام؛ خدائی، لیلیا؛ مختاری، داود؛ رضاطبع، خدیجه؛ خدائی، فاطمه، ۱۳۹۴، کاربرد تحلیل شبکه (ANP) در بررسی وقوع زمین‌لغزش در محدوده محور و مخزن سد قلعه چای، مخاطرات محیط طبیعی، شماره ۵، صص ۷۴-۵۹.
- روستایی، شهرام؛ مختاری، داوود؛ حسینی، زهرا؛ اطمانی حقویران، مهدی، ۱۳۹۴، بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز رودخانه میمه در استان ایلام به روش تحلیل شبکه، مجله هیدروژئومورفولوژی، شماره ۴، صص ۱۲۳-۱۰۱.
- زبردست، اسفندیار، ۱۳۸۹، کاربرد فرآیند تحلیل شبکه در برنامه‌ریزی شهری و منطقه، نشریه هنرهای زیبا، معماری و شهرسازی، شماره ۴۱، صص ۹۰-۷۹.
- سفیدگری، رضا، ۱۳۷۲، مجموعه سخنرانی‌های نخستین گردهمایی کارشناسان معاونت آبخیزداری پیرامون پدیده زمین‌لغزش، معاونت آبخیزداری جهاد سازندگی، دفتر مطالعات و ارزیابی آبخیزها، ۹۲ صفحه.
- شریعت جعفری، محسن، ۱۳۷۵، زمین‌لغزش (مبانی و اصول پایداری شیب‌های طبیعی)، تهران، انتشارات سازه.
- عابدینی، موسی؛ روستایی، شهرام؛ فتحی، محمدحسین، ۱۳۹۵، پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل هیبریدی قضیه بیز - ANP کرانه جنوبی حوضه آبریز اهرچای از روستای نصیرکندی تا سد ستارخان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۱، صص ۱۵۹-۱۴۲.
- کمک‌پناه، علی، ۱۳۸۵، بروشور اطلاعاتی در مورد زمین‌لغزش‌های کشور، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، معاونت آبخیزداری کشور، دفتر مطالعات و ارزیابی آبخیزها، گروه مطالعه امور زمین‌لغزش‌ها.
- مقیمی، ابراهیم؛ محمودی، فرج‌الله، ۱۳۸۳، روش تحقیق در جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، تهران، انتشارات قومس، ۲۹۶ صفحه.

- نظم فر، حسین؛ بهشتی، ابراهیم، ۱۳۹۵، کاربرد مدل ترکیبی فرآیند تحلیل شبکه و منطق فازی در پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش (مطالعه مورد: حوضه آبریز چلی چای)، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۷، شماره ۱، صص ۶۸-۵۳.
- نیری، هادی؛ کرمی، محمدرضا؛ سالاری، ممد، ۱۳۹۶، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش از طریق ارزیابی متغیرهای محیطی با استفاده از مدل تحلیل شبکه در شهرستان بیجار، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۴، صص ۱۳۶-۱۲۱.
- نیک‌اندیش، نسرین، ۱۳۷۶، نگرشی بر اهمیت حرکات توده‌ای زمین در ایران، نشریه جهاد سازندگی، شماره ۱۵۵، سال دوازدهم.
- یمانی، مجتبی؛ خداپور، سیروس؛ مصطفایی، ابوالفضل؛ شادمان رود پستی، مجید، ۱۳۹۱، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز کارون بزرگ با استفاده از مدل AHP در محیط GIS، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۳، شماره ۴، صص ۵۶-۳۹.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65: 15–31
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 1995. GIS technology in mapping Landslide hazard, *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, pp.135–175.
- Chen, W., He, B., Zhang, L., Nover, D., 2016, Developing an integrated 2D and 3D WebGIS based platform for effective landslide hazard management , *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 20, pp. 28-38.
- Dai, F.C., Lee, C.F., XuZ, W., 2001. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong, *Environmental Geology*, Vol 40.Issue 3, 381-391.
- Ermini, L., Catani, F., Casagli, N., 2005. Artificial Neural Networks applied to landslide Susceptibility assessment, *Geomorphology* 66, pp.327–343.
- Garcia, M.M., Javier, F.O., Jeronimo, A.B., Pablo, A.B., Rocio, P.B., 2008. Farmland appraisal based on the Analytic Network Process. *Journal of Global Optimization*. 42, 143-155.
- Gorsevski, P.V., Gessler, P.E., BOLL, J., Elliot, W.J., Flotz, R.B., 2006. Spatially and temporally distributed of landslide susceptibility, *Geomorphology*, 80,178-198.
- Kumar Dahal, R., 2008. Predictive Modeling of Rainfall- induced Landslide Hazard in the Lesser Himalaya of Nepal Based on Weights- of- evidence, *Geomorphology*, Vol.102, 496-510.
- Lami, I.M., Abastante, F., 2014. Decision making for urban solid waste treatment in the context of territorial conflict: Can the Analytic Network Process help?. *Land Use Policy*, 41, 11-20.
- Melchiorre, C., Tryggvason, A., 2015, Application of a fast and efficient algorithm to assess landslide-prone areas in sensitive clays in Sweden, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 15, 12, pp. 2703-2713.
- Panizza, M., 2004. Environmental Geomorphology, *Encyclopedia of Geomorphology*, Vol, 1. 318-320.
- Petschko, H., Brenning, A., Bell, R., Goetz, J., Glade, T., 2014. Assessing the quality of land slide susceptibility maps- case study Liwer Austria. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 14(1), 95-118.
- Piacentini, D., Troiani, F., Soldati, M., Notarnicola, C., Savelli, D., Schneiderbauer, S., Schneiderbauer, C., 2012. Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (south-eastern Alps, Italy), *Geomorphology*, 151–152, pp.196–206.
- Rosenfeld, C.L., 2004. Geomorphological Hazard, *Encyclopedia of Geomorphology*, VOL1, 423-426.
- Saaty, T.L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. New York. McGraw Hill, 287 pp.
- Saaty, T.L., Vargas, L.G., 2006. *Decision Making with the Analytic Network Process*. New York. Springer Science. 363 pp.
- Thomas, O., Patrice F, C., John S, G., Sajinkumar, K.S., 2018. Significance of variable selection and scaling issues for probabilistic modeling of rainfall-induced landslide susceptibility, *Spatial Information Research*, Volume 26, Issue 1, pp. 21-31.

- Tirthankar, B., Swades, P., 2017. Exploring landslide susceptible zones by analytic hierarchy process (AHP) for the Gish River Basin, West Bengal, India, *Spatial Information Research*, 25, pp. 665-675.
- Van Westen, C.J., Castellanos, E., Kuriakose, S.L., 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment an overviwe, *Engineering Geology*, 102, pp. 112-131.
- Wang, L.j., Kazuhide, S., Shuji, M., 2013. Landslide susceptibility analysis with logistic regression model based On FCM sampling strategy, *Computers & Geosciences*, Volume 57, 81-92.
- Wang, Y., Bouten, W., Chen, Q., 2015. using statistical Learning Algorithms in Regional Landslide Susceptibility Zonation with Limited Landslide Field Data, *Journal of Mountain Science*, Vol. 12, Issue. 2, pp. 268-288.
- Wang, Y., LIN, Q., SHI, P., 2018. Spatial pattern and influencing factors of landslide casualty events, *Journal of Geographical Sciences*, 28(3), pp. 259-374.