



تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل تلفیقی فازی - فرآیند تحلیل شبکه‌ای

الهه اکبری^{۱*}، علی درویشی بلورانی^۲، نجمه نیسانی سامانی^۳

۱. دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشگاه تهران

۲. مربی گروه ژئومورفولوژی و اقلیم شناسی، دانشگاه حکیم سبزواری

۳. استادیار دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۲۳ اردیبهشت ۱۳۹۵

پذیرش: ۲۸ تیر ۱۳۹۶

دسترسی اینترنتی: ۲۰ آبان ۱۳۹۶

واژه‌های کلیدی:

مدل‌سازی محیطی

زمین لغزش

فازی - فرآیند تحلیل شبکه‌ای

حوزه فاروب رومان - نیشابور

چکیده

در دهه‌های اخیر با گسترش فعالیت‌های بشر در محیط طبیعی، انواع مخاطرات از جمله زمین لغزش، آسیب‌های جدی مالی و جانی به همراه داشته است. در نتیجه بررسی حساسیت وقوع زمین لغزش و تعیین مناطق بحرانی جهت عملیات محافظتی و آبخیزداری ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، حساسیت زمین لغزش با استفاده از تلفیق روش‌های فازی و فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در حوزه فاروب رومان مدل‌سازی گردید. برای انجام تحقیق، چهار خوشه توپوگرافی، عوامل زیستی، هیدرو اقلیم و زمین‌شناسی و معیارهای ارتفاع، شیب، جهت شیب، شکل شیب، فاصله از جاده، کاربری اراضی، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، بارش و شاخص رطوبت خاک، فاصله از گسل و لیتولوژی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج نشان‌دهنده کارایی مدل فازی - فرآیند تحلیل شبکه‌ای در مدل‌سازی حساسیت زمین لغزش است به طوری که در اعتبارسنجی مدل از طریق منحنی مدل منحنی عامل نسبی (ROC)، میزان AUC، ۰/۸۳ با میزان خطای استاندارد ۰/۰۷ و مقدار P-value برابر صفر، به دست آمد. برای بررسی حساسیت زمین لغزش در حوزه فاروب رومان بر اساس نتیجه منحنی ROC، مدل فازی - فرآیند تحلیل شبکه‌ای با دقت خیلی خوب ارزیابی گردید. نتایج همچنین نشان داد که ۶۶٪ از زمین لغزش‌های معلوم در مناطق با حساسیت زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته‌اند. نظر به برآورد حساسیت زیاد و بسیار زیاد زمین لغزش به میزان ۵۱ درصد از سطح کل منطقه، اجرای عملیات محافظتی از حوزه مطالعاتی ضروری به نظر می‌رسد.

مقدمه

بلاایای طبیعی جزئی از مشکلات زیست محیطی هستند که سالانه موجب کشته و مجروح شدن صدها هزار تن و بی خانمان شدن میلیون ها نفر در سراسر جهان می شوند (۲۴ و ۳۰). زمین لغزش خطری در ارتباط با ژئوفیزیک یا آب و هوا است که به عنوان یک جنبش توده ای از مواد سطح زمین، معمولاً شامل جابجایی برشی توده خاک یا سنگ در امتداد یک یا چند سطح لغزنده است (۵۱). زمین لغزش خطر طبیعی مخرب است که زندگی و دارایی بشریت را تهدید می کند (۳، ۱۴، ۳۴ و ۴۹). علاوه بر این، آسیب های جدی به منابع طبیعی وارد می کند (۳۵، ۳۷، ۴۰، ۴۳ و ۴۷). وقوع مخاطرات طبیعی از جمله زمین لغزش ها فشار جدی بر روی توسعه اقتصادی کشورها، به ویژه کشورهای جهان سوم دارد. به طوری که خسارت های مالی ناشی از مخاطرات طبیعی، رشد و شکوفایی اقتصادی را با رکود و کساد مواجه می سازد (۶). ارزیابی ناپایداری دامنه ای مانند بسیاری از موضوعات زمین شناسی محیطی، از پیچیده ترین مسائلی است که به دلیل تنوع عوامل مؤثر در وقوع ناپایداری دامنه هاست (۴). ایران با توجه به شرایط توپوگرافی نسبتاً کوهستانی، فعالیت زمین ساختی و لرزه خیزی زیاد و شرایط متنوع زمین شناسی و اقلیمی، جزو کشورهایی است که وقوع زمین لغزش در مناطق مختلف آن باعث به وجود آمدن خسارات انسانی و مالی زیادی می شود (۸، ۱۵ و ۲۵).

نمی توان از وقوع بلاایای طبیعی همانند سیل، زلزله، زمین لغزش جلوگیری نمود اما با ایجاد زیرساخت های لازم می توان تا حدی میزان صدمات آن به زندگی انسان ها و دارایی آن ها را کاهش داد (۳۹). در مهر و موم های اخیر، ارزیابی زمین لغزش در مقیاس منطقه ای و متوسط، موضوع مورد علاقه محققین مختلف نظیر زمین شناسان، ژئومورفولوژیست ها، برنامه ریزان و تصمیم گیرندگان بوده است (۴۲). تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش، ابزاری مناسب برای درک این خطر طبیعی و پیش بینی پتانسیل مناطق خطرناک است (۴۰). برای تولید این نقشه از معیارهای مختلف مؤثر در زمین لغزش به

منظور تصمیم گیری چند معیاره و برنامه ریزی جهت مدیریت خطر استفاده می شود (۴۱). تحلیل تصمیم گیری چند معیاره بر مبنای سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، یک روش هوشمند برای تبدیل داده های مکانی و غیر مکانی به اطلاعاتی است که به کمک هر دو مورد، بتوان تصمیم گیری بر اساس قضاوت های تصمیم گیرندگان را به انجام رساند (۳۶ و ۵۳).

فتحی و همکاران (۳۸) با در نظر گرفتن ۱۷ پارامتر طبیعی و انسانی با استفاده از روش های فازی، تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و فرآیند تحلیل شبکه ای (ANP) به بررسی حساسیت منطقه سانگورچی نسبت به زمین لغزش پرداخته اند. آن ها به این نتیجه رسیده اند که ۷۶ درصد از منطقه به مناطق با حساسیت زیاد تعلق دارند و روش ANP را روش مناسبی برای تحلیل حساسیت زمین لغزش معرفی نموده اند.

شهابی و همکاران (۵۲) با اعمال سه روش نسبت فراوانی (Frequency Ratio)، رگرسیون لجستیک و منطق فازی در حوزه مرکزی زب در آذربایجان غربی، مناطق با پتانسیل زمین لغزش را بر اساس ۱۰ معیار طبیعی و انسانی تحلیل نموده اند. آن ها به این نتیجه رسیده اند که روش فازی با اختلاف یک درصد در مرتبه دوم از نظر دقت تهیه نقشه حساسیت قرار دارد.

فیضی زاده و همکاران (۴۱) با در نظر گرفتن ۹ معیار و روش فازی AHP به تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش در حوزه رودخانه ایزه پرداخته اند. با توسعه این روش به دقت بیشتری نسبت به روش فازی منفرد یا AHP منفرد دست یافته اند. متولی و همکاران (۲۹) به بررسی و مقایسه دقت ارزیابی حساسیت نسبت به زمین لغزش بر اساس روش های رگرسیون چند متغیره، رگرسیون لجستیک، تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی پرداخته اند و به این نتیجه رسیده اند که روش منطق فازی با اختلاف ۰/۰۱ در مرتبه دوم از نظر مطلوبیت صحت قرار دارد.

فتحی و همکاران (۱۸) با استفاده از دو روش آماری دو متغیره و روش فازی به تحلیل حساسیت زمین لغزش در حوزه آبخیز رودخانه بالخلو پرداخته اند. آن ها بر اساس شاخص

شایانی به برنامه‌ریزان در راستای کاهش خسارات احتمالی ناشی از وقوع این پدیده و یافتن مکان‌های امن‌تر جهت ساخت و توسعه تأسیسات و فعالیت‌های انسانی نماید. هدف از این تحقیق، تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از تلفیق روش‌های فازی و فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در حوزه فاروب رومان است.

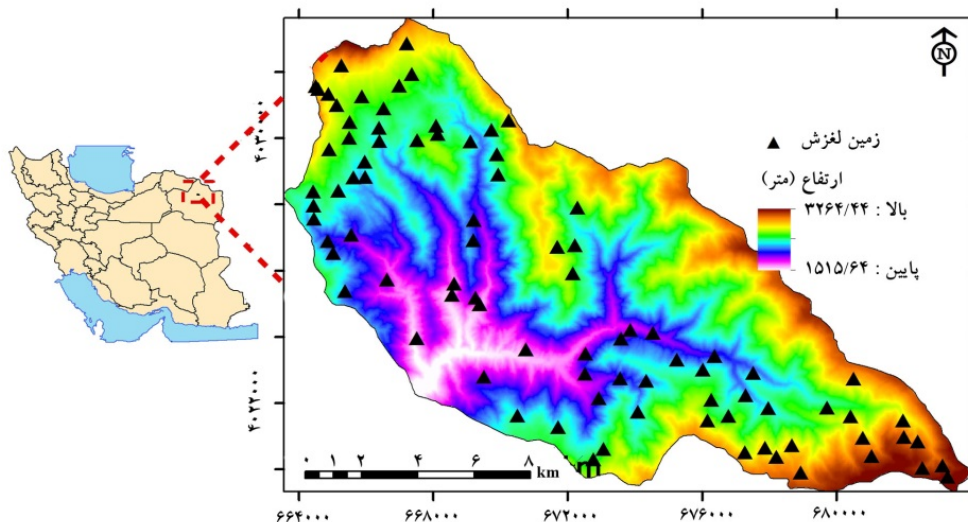
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز فاروب رومان با مساحتی در حدود ۱۴۴/۵۱ کیلومتر مربع در حوزه آبریز کویر مرکزی، شهرستان نیشابور در دامنه جنوبی بینالود در محدوده مطالعاتی بین طول شرقی $36^{\circ}18'14''$ تا $36^{\circ}16'49''$ و عرض‌های $59^{\circ}02'55''$ و $58^{\circ}49'16''$ شمالی قرار گرفته است (شکل ۱).

زمین لغزش، با استفاده از روش فازی، انطباق خوبی با طبقات خطر بالا و بسیار بالا به دست آورده‌اند.

جهت استفاده بهینه از محیط طبیعی و منابع موجود در آن و همچنین برای ایجاد تأسیسات زیربنایی، با شناخت کامل از محیط و درک شرایط طبیعی حاکم بر محیط و با اعمال مدیریت صحیح در استفاده از آن تا حدودی می‌توان از تشدید ناپایداری دامنه‌ها و وقع زمین لغزش ممانعت نمود (۱۶). در این تحقیق، مدل‌سازی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل فازی ANP در حوزه فاروب رومان به انجام رسیده است. این حوزه متشکل از سازندهای آهکی (سازند بهرام) است و فرایندهای جریانی و رودخانه‌ای از مهم‌ترین فرایندهای این منطقه کوهستانی است که این امر خود زمینه وقوع حرکات دامنه‌ای را در این منطقه تسهیل می‌کند. تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش و شناسایی مناطق مورد تهدید آن می‌تواند کمک



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده

این تحقیق به منظور برآورد میانگین بارش در بازه پنج ساله (از سال ۱۳۸۲ الی ۱۳۸۷)، باران‌سنجی بوژان، شاندیز، کانگ، کلیماتولوژی شرکت زراعی دیزباد، زشک و بار نیشابور است.

در این تحقیق از نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰۰، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰، داده هواشناسی و باران‌سنجی ایستگاه‌های منطقه و تصویر ماهواره‌ای لندست ۷ استفاده گردید. ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی مورد استفاده در

روش تحقیق

Wetness Index بر اساس رابطه ۱ به دست آمد.

$$\text{Wetness Index} = \ln(A_s / \tan B) \quad [1]$$

در این رابطه؛ A_s مساحت ویژه حوزه آبخیز و $\tan B$ شیب برحسب درصد است. برای محاسبه مساحت ویژه آبخیز (A_s) از تحلیل‌های مکانی در نرم‌افزار ArcGIS[®] 10.1 و گزینه Fill Hydrology با ورود DEM استفاده گردید. عواملی چون Flow direction، DEM و Flow accumulation نیز تهیه و از رابطه ۲ رستر مساحت ویژه آبخیز تهیه گردید.

[۲]

$$As = (\text{Flowaccumulation} + 1) \cdot (\text{Pixel size}) \cdot (\text{Flow direct}) / 1000$$

پس از تهیه نقشه‌های معیار و گزینه‌ها، به منظور بررسی حساسیت زمین‌لغزش، از روش فازی- فرایند تحلیل شبکه‌ای (FANP) استفاده گردید.

روش فازی

تئوری مجموعه‌های فازی و منطق فازی به عنوان نظریه‌ای ریاضی برای مدل‌سازی ابهام و عدم قطعیت، ابزارهای بسیار کارآمد و مفیدی به شمار می‌روند (۳۳، ۴۴). تئوری مجموعه فازی، روشی است که قضاوت‌های فردی و مبهم در مورد یک پدیده منحصر به فرد را وارد مدل‌های احتمالی یا ریاضی می‌نماید (۱ و ۲۱) و زمینه را برای استنتاج، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم آورد (۲۴). بر خلاف منطق کلاسیک که دارای دو ارزش صفر و یک است، منطق فازی ارزش‌های خود را به صورت درصد عضویت در بازه (۰،۱) نشان می‌دهد (۵۵). اگر Z فضای عوارض باشد، سری فازی A در فضای Z از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد.

$$A\{z, MF(z)\}, z \in Z \quad [3]$$

بطوریکه $MF(z)$ تابع عضویت برای اختصاص درجه عضویت است (۴۲). در فازی‌سازی معیارها، برای ارزش‌گذاری مقادیر معمولاً از توابع عضویت مختلفی چون

معیارهای مورد بررسی در این تحقیق، شامل چهار معیار؛ توپوگرافی، زمین‌شناسی، عوامل زیستی و هیدرو اقلیم است. در معیار توپوگرافی، گزینه‌های ارتفاع، شیب، جهت شیب، شکل شیب (محدب یا مقعر بودن دامنه)، در معیار زمین‌شناسی، گزینه‌های فاصله از گسل و لیتولوژی، در معیار عوامل زیستی، گزینه‌های شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، فاصله از جاده، کاربری اراضی و در معیار هیدرو اقلیم، گزینه‌های بارش، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت خاک و فاصله از رودخانه در نظر گرفته شد. از آنجایی که داده‌های زمین‌لغزش در دسترس در این منطقه متعلق به سال ۱۳۸۷ بوده، لذا برای تولید لایه کاربری اراضی و NDVI، از تصویر ماهواره‌ای لندست ۷ سال ۱۳۸۷ استفاده شده است. از روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال (Maximum Likelihood) با در نظر گرفتن نمونه‌های تعلیمی برداشت شده از Google Earth به همراه تفسیر بصری، به منظور تهیه نقشه کاربری اراضی استفاده گردید. جهت تولید لایه‌های شیب و جهت شیب از داده مدل رقومی ارتفاعی (DEM) تهیه شده از SRTM، ۳۰ متری منطقه مورد مطالعه و تحلیل Spatial analyst، استفاده شد. تابع Euclidean Distance در محیط ArcGIS[®] 10.1 به منظور تولید لایه‌های فاصله از گسل، فاصله از رودخانه و فاصله از جاده نیز مورد استفاده قرار گرفت. با میانگین‌گیری از شاخص NDVI مستخرج از تصویر ماهواره‌ای لندست ۷ سال ۱۳۸۷ ماه‌های فروردین و مهر (تاریخ وقوع زمین‌لغزش در حوزه)، نقشه NDVI تولید گردید. لایه تراکم زهکشی بر اساس مجموع طول آبراهه‌های هر زیرحوزه نسبت به مساحت آن تهیه گردید. به دلیل فاصله زیاد ایستگاه‌های هواشناسی از منطقه، با ایجاد رابطه رگرسیون بین آمار بارش ماهیانه ایستگاه‌های هواشناسی مذکور با ارتفاع ایستگاه‌ها و اعمال این رابطه به لایه DEM، لایه بارش تولید گردید. معیار شکل شیب از نقطه نظر انحنای شیب در جهت شیب از طریق تابع Curvature در محیط ArcGIS[®] 10.1 تولید گردید که در این نقشه، مقادیر منفی، محدب و مقادیر مثبت، مقعر هستند. معیار

و آلترناتیوها محدود است (۴۵).

با توجه به محدودیت‌ها و کمبودهای این روش، روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای (Analytic network process) به منظور اصلاح روش AHP، بوسیله توماس ال ساعتی در سال ۱۹۹۶ ابداع شد (۱۳). فرآیند تحلیل شبکه‌ای با دارا بودن ویژگی‌های مثبت AHP، نظیر سادگی و انعطاف‌پذیری، می‌تواند ارتباطات پیچیده (وابستگی‌های متقابل و بازخورد) بین عناصر تصمیم را با به‌کارگیری ساختار شبکه‌ای به جای ساختار سلسله‌مراتبی در نظر بگیرد (۵ و ۹). مدل تحلیل شبکه (ANP) از سلسله‌مراتب کنترل، خوشه‌ها، عناصر و روابط متقابل بین خوشه‌ها و عناصر تشکیل می‌شود (۲۰). با عنایت به هدف سیستمی (شبکه‌ای) که بررسی می‌شود، معیارها برای مقایسه خوشه‌های سیستم (شبکه) و گزینه‌ها برای مقایسه عناصر به کار می‌روند (۱۰). ارتباطات در یک شبکه بوسیله کمان نشان داده می‌شود. جهت کمان‌ها دلالت بر جهت وابستگی دارد (۱۹). در ساختار سلسله‌مراتبی، ساختاری خطی، از بالا به پایین و بدون بازگشت از سطوح پایین‌تر و یا بالاتر وجود دارد. ولی در حالت شبکه‌ای، یک شبکه و خوشه‌هایش به‌صورت منظم توزیع نمی‌شوند (۷ و ۵۰).

در این روش، مراحل پنج‌گانه زیر برای دستیابی به وزن معیارها عملیاتی می‌شود. مرحله اول تدوین ساختمان مدل و ساختار مسئله، مرحله دوم انجام مقایسه زوجی و برآورد وزن نسبی (۲۰، ۲۳ و ۴۸)، مرحله سوم تشکیل سوپرماتریس اولیه (۱۷ و ۱۹)، مرحله چهارم تشکیل سوپرماتریس وزنی (۷)، مرحله پنجم محاسبه بردار وزنی عمومی (۳۱). با توجه به جدول سوپرماتریس حد، وزن نهایی هر معیار و زیرمعیار (گزینه) محاسبه می‌شود. نرخ سازگاری مکانیسمی است که سازگاری مقایسه‌ها (C.R) را مشخص می‌کند. این مکانیزم نشان می‌دهد که تا چه اندازه می‌توان به اولویت‌های حاصل از اعضاء گروه یا اولویت‌های جداول ترکیب اعتماد کرد (۲). چنانچه نرخ سازگاری کمتر از ۰/۱ باشد، یعنی مقایسات زوجی از سازگاری برخوردار است (۲۲).

توابع Linear, J-shape و Sigmoidal استفاده می‌شود (۲۸). علاوه بر این توابع، کاربر می‌تواند با توجه به نیاز خود، تابع User-defined را تعریف نماید. یکی دیگر از عوامل مؤثر در استانداردسازی نقشه‌های فازی، تعیین حد آستانه است که به آن‌ها نقاط کنترل می‌گویند؛ اما نکته‌ای که بایستی در انتخاب تابع به آن توجه نمود، نوع کاهشی یا افزایشی بودن معیار مورد نظر است. در اینجا منظور از کاهش، حداقل‌شونده یا نزولی بودن تابع است (۱۲). در این تحقیق، با توجه به هیستوگرام استخراجی از معیارها در محدوده پلی‌گون‌های زمین‌لغزش، نوع تابع عضویت، حدود آستانه و افزایش یا کاهشی بودن آن‌ها مشخص گردید. توابع عضویت مورد استفاده برای معیارهای این تحقیق، Triangulate, J-shape, User-defined, Sigmoidal متقارن و نامتقارن و Crisp است. در تابع عضویت فازی Triangulate، پارامترهای m_1 ، m_2 و m_3 به ترتیب کمترین مقدار ممکن، محتمل‌ترین مقدار و مقدار حداکثر ممکن برای یک عارضه فازی را بیان می‌کند (۴۴). تابع عضویت Sigmoidal از رابطه ۴ محاسبه گردید (۲۸).

$$\mu = (x-a) / (b-a) \times p_i / 2, \text{ If } x > b \rightarrow \mu = 1 \quad [4]$$

تابع عضویت Sigmoidal نامتقارن یا بسته از حاصل‌ضرب دو تابع متقارن تشکیل‌دهنده آن و یا قدرمطلق تفاضل آن‌ها به دست می‌آید (۲۶). تابع عضویت J-shape از رابطه ۵ به دست می‌آید (۱۱). تابع عضویت User-defined ترکیبی از توابع عضویت خطی است.

$$\mu = 1 / (1 + ((x-a)/(b-a))^2), \text{ If } x > b \rightarrow \mu = 1 \quad [5]$$

روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP)

روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) یکی از تکنیک‌های معروف تصمیم‌گیری چند معیاره است (۲۷) که بر اساس مقیاس‌های نسبی جهت تجزیه و تحلیل مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده می‌شود (۵۴). این روش به تعاملات نسبتاً ثابت و یک‌سویه با بازخوردهای کمی بین اجزای تصمیم‌گیری

نتایج

تابع فازی، کاهش یا افزایشی بودن و مقادیر درجه عضویت فازی هر معیار، با در نظر گرفتن ۷۰ درصد از پلی‌گون‌های زمین‌لغزش معلوم، از رسترهای اولیه هر یک از معیارها، خروجی تهیه و هیستوگرام این مناطق استخراج شده از معیارها، بررسی شده است. بنابر مکان محور بودن زمین‌لغزش و تغییر رفتار آن در هر منطقه، استخراج نوع توابع فازی و مقادیر حدود آستانه آن‌ها از طریق هیستوگرام معیارها می‌تواند دقت نقشه خطر زمین‌لغزش را افزایش دهد. نوع توابع فازی معیارها و مقادیر درجه عضویت آن‌ها که از بخشی از پلی‌گونهای زمین‌لغزش معلوم بر اساس هیستوگرام آن‌ها استخراج شده، در جدول ۱ ارائه گردیده است.

در این تحقیق، به منظور تحلیل حساسیت زمین‌لغزش از روش فازی ANP استفاده شده است. برای نائل شدن به این هدف، ۴ خوشه توپوگرافی (معیارهای ارتفاع، شیب، جهت شیب و شکل شیب)، زمین‌شناسی (معیارهای فاصله از گسل و لیتولوژی)، هیدرو اقلیم (معیارهای فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، بارش و شاخص رطوبت خاک) و عوامل زیستی (معیارهای فاصله از جاده، کاربری اراضی، NDVI) در نظر گرفته شده‌اند. رسترهای هر یک با توجه به نوع داده موردنظر به روش‌های تحلیل‌های مکانی، آنالیزهای سه‌بعدی و پردازش‌های سنجش از دور تولید گردیده‌اند. برای تعیین نوع

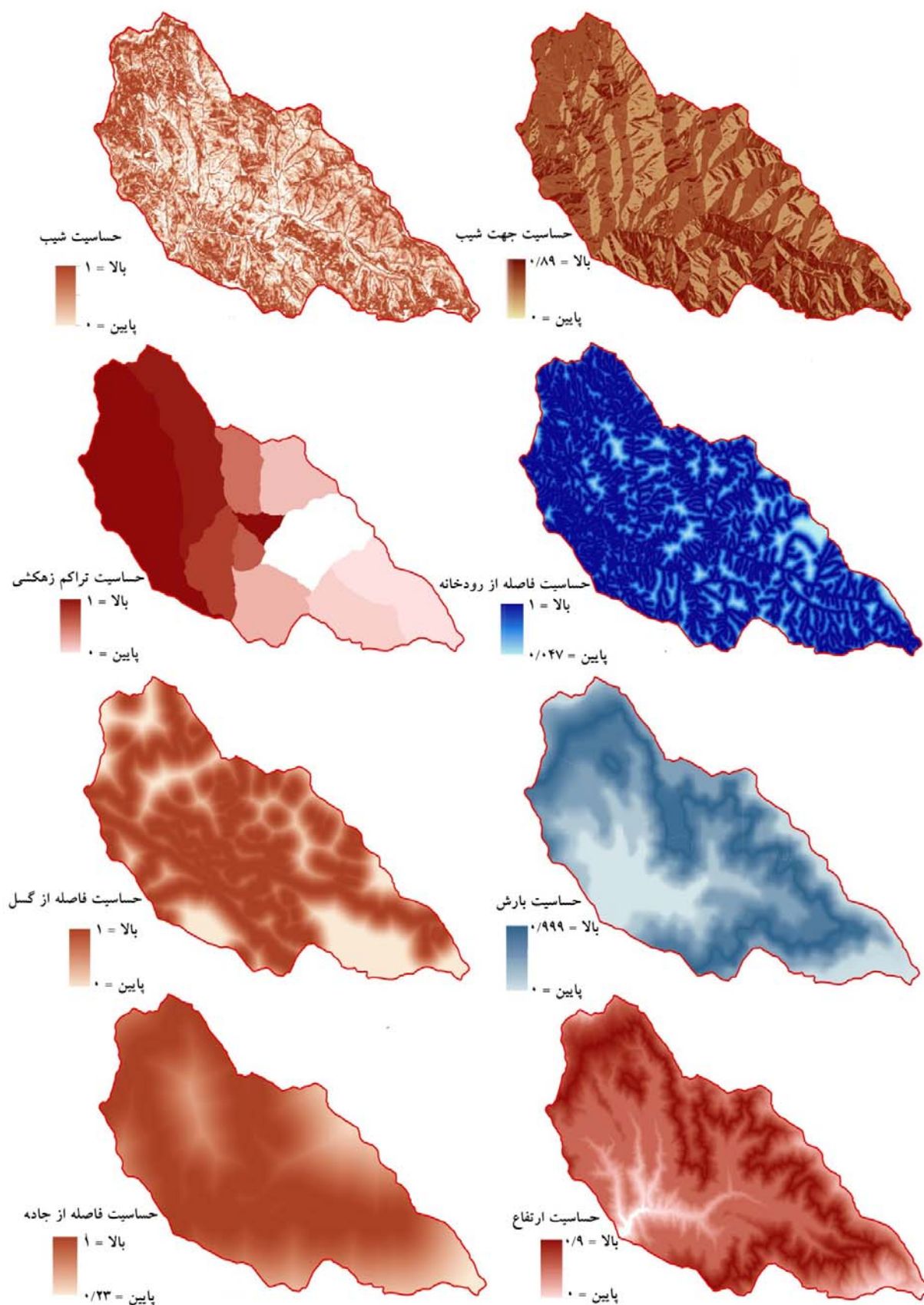
جدول ۱. توابع عضویت فازی و حدود آستانه معیارهای مؤثر بر حساسیت زمین‌لغزش

حدود آستانه				کاهش یا افزایشی بودن	تابع عضویت فازی	معیار
a	b	c	d			
				کاهش و افزایشی	User-defined	جهت شیب ^a
				کاهش و افزایشی	User-defined	ارتفاع (متر) ^b
					مثلی	بارش (میلی‌متر)
				کاهش	J-shape	فاصله از رودخانه (متر)
				کاهش	J-shape	فاصله از جاده (متر)
				افزایشی	Sigmoidal	تراکم زهکشی
				کاهش	Sigmoidal	فاصله از گسل (متر)
				افزایشی - کاهش	Sigmoidal	شیب (درصد)
				افزایشی - کاهش	Sigmoidal	NDVI
				افزایشی - کاهش	Sigmoidal	Wetness Index
					Crisp	زمین‌شناسی ^c
					Crisp	کاربری اراضی ^d
					Crisp	شکل شیب ^e

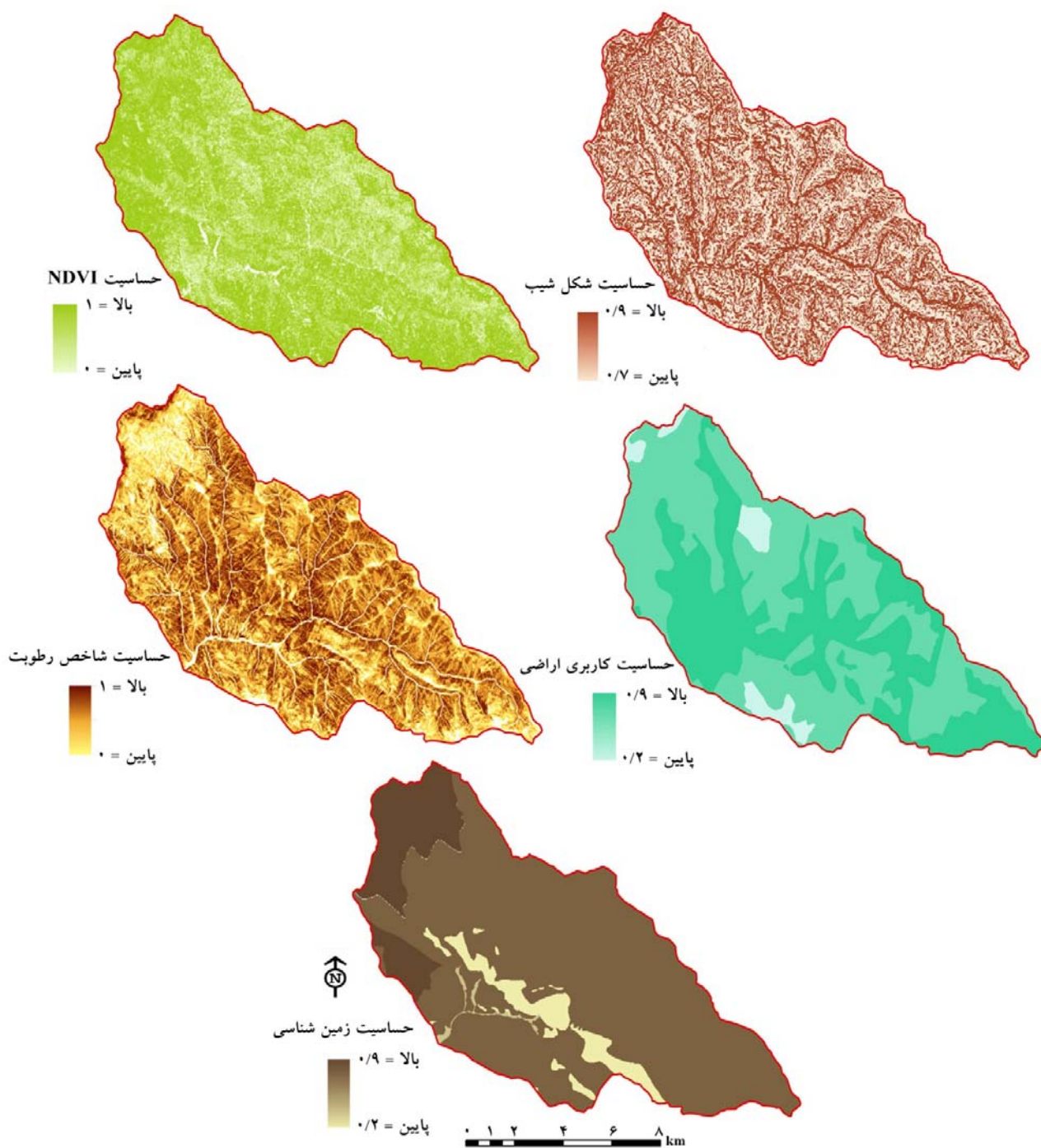
^a ۰ تا ۴۰، ۴۰ تا ۶۵، ۶۵ تا ۱۲۰، ۱۲۰ تا ۲۱۰، ۲۱۰ تا ۳۰۰، ۳۰۰ تا ۳۶۰ درجه افزایشی - ۴۰ تا ۶۵، ۶۵ تا ۲۱۰، ۲۱۰ تا ۲۳۰ درجه کاهش و مابقی ثابت، ^b ۱۵۹۶ تا ۲۰۰۰ و ۲۰۰۰ تا ۲۲۵۰ تا ۲۵۶۰ متر افزایشی، ۲۵۶۰ تا ۳۲۴۰ متر کاهش و مابقی ثابت، ^c سازند بهرام ۰/۲، سازند کواترنر ۰/۵، رسوبات کربونیر ۰/۸ و مارن با میان لایه‌های آهکی (شیل و ماسه سنگ) ۰/۹، ^d اراضی بایر ۰/۲، مرتع درجه یک ۰/۵، مرتع درجه دو ۰/۸ و مرتع درجه سه و اراضی کشاورزی ۰/۹ و ^e محدب ۰/۷ و مقعر ۰/۹.

فازی‌سازی شده است. نقشه‌های فازی سازی شده معیارهای حساسیت زمین‌لغزش در شکل ۲ آورده شده است.

پس از تشخیص نوع تابع عضویت فازی، حدود آستانه و کاهش یا افزایشی بودن توابع عضویت در نرم‌افزار ArcGIS[®] 10.1، هر یک از معیارها در نرم‌افزار Idrisi



شکل ۲. نقشه‌های معیارهای فازی سازی شده مؤثر بر حساسیت زمین لغزش



ادامه شکل ۲. نقشه‌های معیارهای فازی‌سازی شده مؤثر بر حساسیت زمین لغزش

نهایی معیارها و گزینه‌های تأثیرگذار در حساسیت زمین لغزش مورد بررسی در این تحقیق، ارائه شده است.

پس از فازی‌سازی نمودن گزینه‌ها، به منظور تلفیق آن‌ها از روش ANP استفاده و اوزان معیارها و گزینه‌ها برآورد گردید. در جداول ۲ و ۳، بخشی از سوپرماتریس حد و وزن

جدول ۲. بخشی از سوپرماتریس حد

		توپوگرافی		
		ارتفاع	جهت شیب	شیب
توپوگرافی	ارتفاع	۰/۰۷۷۰۴۸	۰/۰۷۷۰۴۸	۰/۰۷۷۰۴۸
	جهت شیب	۰/۰۵۸۴۷۱	۰/۰۵۸۴۷۱	۰/۰۵۸۴۷۱
	شیب	۰/۰۷۷۰۴۸	۰/۰۷۷۰۴۸	۰/۰۷۷۰۴۸
	شکل شیب	۰/۰۶۴۶۱۳	۰/۰۶۴۶۱۳	۰/۰۶۴۶۱۳
زمین‌شناسی	فاصله از گسل	۰/۰۸۰۰۴۴	۰/۰۸۰۰۴۴	۰/۰۸۰۰۴۴
	لیتولوژی	۰/۰۸۰۰۴۴	۰/۰۸۰۰۴۴	۰/۰۸۰۰۴۴
عوامل زیستی	شاخص پوشش گیاهی	۰/۱۱۰۴۹۲	۰/۱۱۰۴۹۲	۰/۱۱۰۴۹۲
	فاصله از جاده	۰/۱۷۳۸۳۰	۰/۱۷۳۸۳۰	۰/۱۷۳۸۳۰
	کاربری اراضی	۰/۱۸۲۹۷۴	۰/۱۸۲۹۷۴	۰/۱۸۲۹۷۴
هیدرو اقلیم	بارش	۰/۰۲۶۵۷۰	۰/۰۲۶۵۷۰	۰/۰۲۶۵۷۰
	تراکم زهکشی	۰/۰۲۲۰۳۷	۰/۰۲۲۰۳۷	۰/۰۲۲۰۳۷
	شاخص رطوبت خاک	۰/۰۲۳۴۷۱	۰/۰۲۳۴۷۱	۰/۰۲۳۴۷۱
	فاصله از رودخانه	۰/۰۲۳۳۵۸	۰/۰۲۳۳۵۸	۰/۰۲۳۳۵۸

بیشتری دارند. از بین معیارهای مورد بررسی در این تحقیق، جهت شیب، شکل شیب، شاخص پوشش گیاهی و تراکم زهکشی با درجه کمتری از اهمیت در وقوع زمین‌لغزش شرکت می‌کنند.

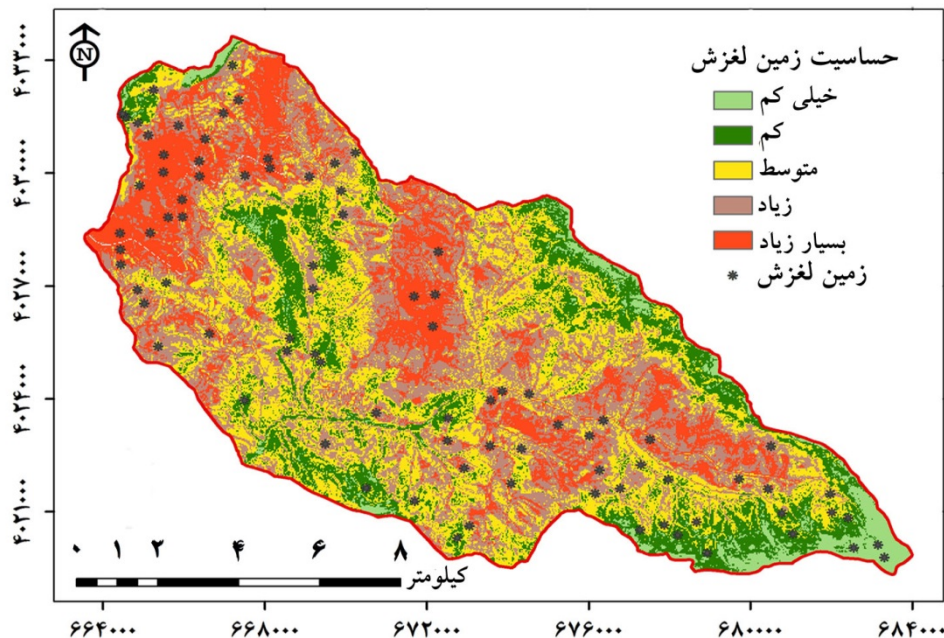
بر اساس نظرات کارشناسان ژئومورفولوژی، به ترتیب خوشه عوامل زیستی و توپوگرافی در وقوع زمین‌لغزش تاثیرگذارترینند. از معیارهای مورد بررسی در این تحقیق نیز شیب، فاصله از گسل و بارش در وقوع این پدیده، اهمیت

جدول ۳. وزن نهایی خوشه‌ها و معیارها

ضریب CR	وزن معیار	معیار	وزن خوشه	خوشه
۰/۰۰۳۸۸	۰/۳۵۰۹	ارتفاع	۰/۲۷۷۱۸	توپوگرافی
	۰/۱۰۹۱۱	جهت شیب		
	۰/۳۵۰۹	شیب		
	۰/۱۸۹۰۶	شکل شیب		
۰/۰۰۵۱	۰/۵۴۶۹۳	فاصله از گسل	۰/۱۶۰۰۸	زمین‌شناسی
	۰/۴۵۳۰۷	لیتولوژی		
۰/۰۰۸۸۵	۰/۱۲۶۰۱	شاخص پوشش گیاهی	۰/۴۶۷۲۹	عوامل زیستی
	۰/۴۱۶۰۶	فاصله از جاده		
	۰/۴۵۷۹۳	کاربری اراضی		
۰/۰۰۹۲۵	۰/۵۴۷۶۹	بارش	۰/۰۹۵۴۳۴	هیدرو اقلیم
	۰/۰۴۹۹۴	تراکم زهکشی		
	۰/۲۰۷۳۸	شاخص رطوبت خاک		
	۰/۱۹۴۹۷	فاصله از رودخانه		

بسیار بالا) بر اساس طبقه‌بندی Natural Break به منظور دستیابی به فواصل طبقات تقسیم شده است.

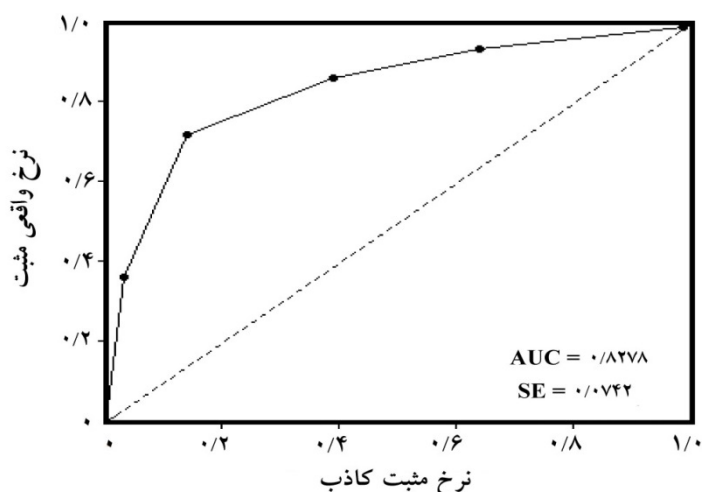
شکل ۳، نقشه تحلیل حساسیت زمین‌لغزش را نشان می‌دهد که به ۵ دسته حساسیت (خیلی کم، کم، متوسط، بالا و



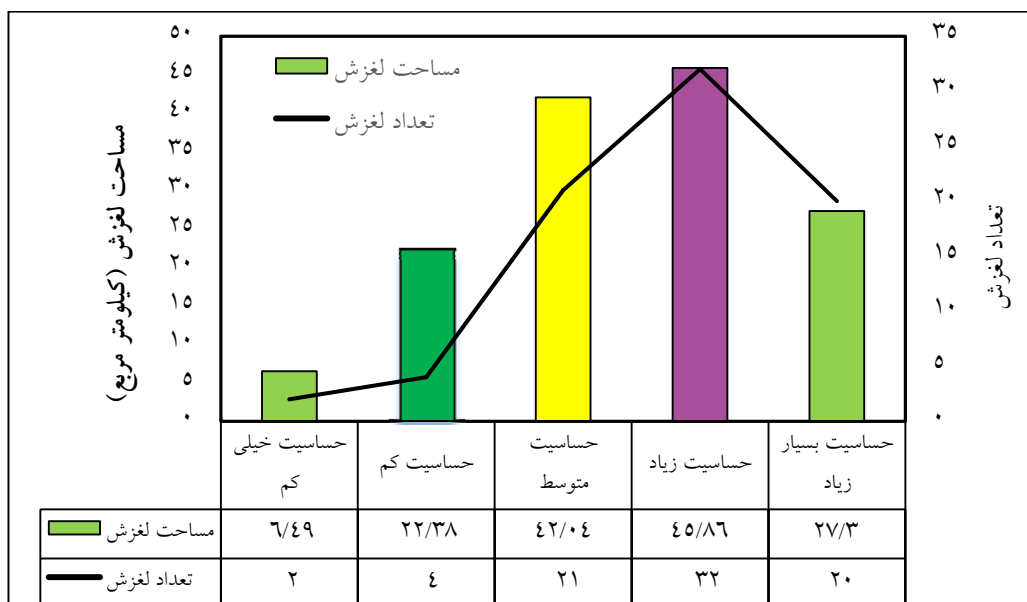
شکل ۳. نقشه تحلیل حساسیت زمین‌لغزش حوزه مورد مطالعه

است (۴۱). به منظور محاسبه مقدار AUC، از سی درصد باقی‌مانده نقاط زمین‌لغزش معلوم به عنوان سری داده اعتبارسنجی استفاده شده است. مقدار AUC از منحنی ROC، برابر 0.83 با میزان خطای استاندارد 0.07 و مقدار P-value برابر صفر (شکل ۴) برآورد شده است. بر اساس نتیجه منحنی ROC، مدل فازی ANP برای بررسی حساسیت زمین‌لغزش در حوزه فاروب رومان با دقت خیلی خوب ارزیابی می‌گردد. علاوه بر این، نقشه حساسیت زمین‌لغزش نیز با انطباق بر نقاط زمین‌لغزش معلوم، اعتبارسنجی گردید (شکل ۵). به طور تقریبی، 66% از زمین‌لغزشهای معلوم در طبقات بسیار زیاد و زیاد حساسیت زمین‌لغزش قرار گرفته‌اند که 51% درصد از سطح کل منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. تقریباً 27% از زمین‌لغزشهای معلوم درون طبقه متوسط حساسیت جای گرفتند. تنها 7% از زمین‌لغزشهای معلوم در منطقه با حساسیت کم و خیلی کم ثبت شده‌اند.

با وجود پذیرفتن این حقیقت که مدل‌سازی ابزاری برای ارزیابی خطرات طبیعی است، اعتبارسنجی گامی اساسی در توسعه نقشه‌های حساسیت است و برای تعیین توانایی پیش‌بینی آن ضروری به نظر می‌رسد (۴۱). در نتیجه، نقشه حساسیت زمین‌لغزش نهایی در مقایسه با محل‌های وقوع زمین‌لغزش معلوم و شناخته شده، اعتبارسنجی می‌شود. در این تحقیق، دقت نقشه حساسیت به دست آمده از طریق منحنی خصوصیت عملیاتی نسبی (ROC) با آنالیز زمین‌لغزشهای معلوم که در هر طبقه نقشه خطر قرار گرفته‌اند، بررسی شده است. در منحنی ROC، مقادیر مساحت زیر منحنی (AUC) (با مقدار بین 0.5 تا 1)، مبنای ارزیابی دقت مدل هستند. مقدار AUC برای تعیین کیفیت مدل احتمالی با تشریح توانایی آن در اعتبارسنجی پیش‌بینی وقوع و یا عدم وقوع پدیده زمین‌لغزش به کار می‌رود. در مدل ایده‌آل، مقدار AUC به یک نزدیک‌تر است در حالیکه مقادیر نزدیک 0.5 دلیل بر عدم دقت مدل



شکل ۴. منحنی راک ROC و سطح زیر منحنی مربوط به دقت نقشه حساسیت پهنه‌بندی زمین لغزش



شکل ۵. مساحت پهنه‌های حساسیت نسبت به وقوع زمین لغزش در مقایسه با تعداد زمین لغزش موجود

مؤثر در وقوع حرکت‌های توده‌ای و تحلیل حساسیت زمین نسبت به آن، می‌توان کمک مؤثری در تدوین برنامه مدیریت خطر و کاهش خسارت‌های ناشی از این پدیده نمود. ANP به عنوان تعمیم پیشرفته از AHP، ارتباط بین معیارهای مختلف سلسله مراتبی و روابط متقابل پیچیده میان سطوح تصمیم‌گیری و ویژگی‌ها را در نظر می‌گیرد. علاوه بر این، به صراحت در روند مقایسه دو به دویی، ناتوانی ANP همانند AHP در مقابله با ذهنیت‌گرایی، با روش فازی ANP

بحث و نتیجه‌گیری

از جمله حساس‌ترین و مهم‌ترین مسائل در پروژه‌های عمرانی، مطالعه پایداری دامنه‌ها است. در واقع زمین لغزش یک پدیده مخرب طبیعی است و باعث به وجود آمدن خسارات جبران‌ناپذیری می‌شود که دفع آن‌ها مستلزم صرف وقت و هزینه‌ی هنگفتی است. شناخت نواحی مستعد وقوع زمین لغزش و حرکات توده‌ای از ضروریات مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی توسعه‌ای و عمرانی است. لذا با شناسایی عوامل

(FANP) با مدل عدم قطعیت در شرایط عدم دقت و ابهام موجود در فرایند قضاوت جایگزین شده است (۴۶).

هدف از تحقیق حاضر، علاوه بر مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش در حوزه آبریز فاروب رومان، بررسی قابلیت مدل فازی ANP برای تحلیل حساسیت این پدیده بوده است. با در نظر گرفتن ۴ خوشه توپوگرافی، عوامل زیستی، هیدرو اقلیم و زمین‌شناسی و معیارهای ارتفاع، شیب، جهت شیب، شکل شیب، فاصله از جاده، کاربری اراضی، NDVI، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، بارش و شاخص رطوبت خاک، فاصله از گسل و لیتولوژی، این امر تحقق یافته است. برای دستیابی به این هدف، پس از استانداردسازی معیارها به روش فازی، وزنه‌های معیارها و خوشه‌ها با توجه به قضاوت‌های کارشناسان به روش ANP، محاسبه شده‌اند. به منظور فازی‌سازی معیارها برخلاف تحقیقات موجود، به رفتار مکانی هر عامل در محدوده پلی‌گونه‌های زمین‌لغزش و بررسی هیستوگرام آن‌ها تأکید شده است. با ارزیابی هر هیستوگرام، نوع تابع فازی، حدود آستانه تأثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش و افزایش یا کاهش بودن تابع عضویت تعیین شده است. در اکثریت تحقیقات پیشین، به طور جداگانه، روش‌های فازی و ANP در بررسی حساسیت زمین‌لغزش به کار گرفته شده‌اند. شایان ذکر است که در تحقیقات اندکی از روش فازی AHP به منظور نائل شدن به این هدف بهره جسته‌اند؛ اما از آنجا که روش ANP، ضعف‌های روش AHP را برطرف نموده، به نظر می‌رسد که روش فازی ANP در تحلیل حساسیت زمین‌لغزش نیز می‌تواند مؤثر واقع شود. نتایج تحقیق حاضر نیز مؤید این مطلب است، به طوری که بررسی میزان اطمینان نقشه حساسیت زمین‌لغزش از طریق منحنی ROC نیز اعتبار مدل را با میزان AUC برابر با ۰/۸۳ با میزان خطای استاندارد ۰/۰۷ و مقدار P-value برابر صفر تأیید می‌کند. این نتیجه بیانگر دقت خیلی خوب روش فازی ANP در بررسی حساسیت زمین‌لغزش حوزه فاروب رومان است. تحقیقات مشابه نظیر احمد (۳۲) در سال ۲۰۱۴ بر AUC به میزان ۰/۸۹ به روش AHP و فیضی‌زاده و همکاران (۳۹) در سال ۲۰۱۴ بر AUC به میزان ۰/۸۱ و

۰/۸۵ به ترتیب در روش‌های AHP و فازی AHP دلالت دارند. مقایسه با نتایج این تحقیقات نیز، کارایی روش فازی ANP را در تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش تأیید می‌کند.

علاوه بر این، انطباق زمین‌لغزش‌های معلوم و نقشه حساسیت زمین‌لغزش، مؤید همپوشانی ۶۶٪ از آن‌ها در طبقات با حساسیت زیاد و بسیار زیاد است. بنابراین بر اساس انعطاف‌پذیری روش‌های فازی و ANP، می‌توان در مسائل تصمیم‌گیری پیچیده همانند زمین‌لغزش، از چهارچوب GIS مبنای Fuzzy-MCDA و تلفیق آن‌ها استفاده نمود. از طرف دیگر، استفاده از متغیرهای زبانی، ارزیابی فرایند را واقع‌بینانه‌تر می‌کند چرا که ارزیابی فرایندها قطعی نیست و در بدنه خود، رفتار فازی را نهفته کرده است. در نتیجه استفاده از وزن‌دهی فازی ANP، بررسی فرایند را واقع‌بینانه‌تر و قابل اطمینان‌تر می‌نماید.

با توجه به کوهستانی بودن حوزه فاروب رومان و برخورداری آن از زمین‌های آهکی، برآورد حساسیت زیاد و بسیار زیاد وقوع زمین‌لغزش به میزان ۵۱ درصد از کل منطقه، نگران‌کننده ارزیابی می‌شود. علاوه بر این، ۲۱ درصد از کل منطقه با حساسیت متوسط نسبت به زمین‌لغزش برآورد شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند به تصمیم‌گیری در زمینه برنامه‌ریزی اضطراری و جابجایی از مناطق با حساسیت بالا به‌علاوه پشتیبانی از استراتژی مدیریت خطر زمین‌لغزش در حوزه فاروب رومان کمک نماید.

منابع مورد استفاده

۱. امینی فسخودی، ع. ۱۳۸۴. کاربرد استنتاج منطقی فازی در مطالعات برنامه‌ریزی و توسعه منطقه‌ای. دانش و توسعه، ۱۷: ۳۹-۶۱.
۲. بزرگمهر، ک.، س. ی. حکیم‌دوست، ع. محمدپورزیدی و ز. صیدی. ۱۳۹۳. مکانیابی بهینه محل دفن مواد زاید جامد شهری با استفاده از مدل (AHP) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: شهرستان تنکابن). فصلنامه اطلاعات جغرافیایی، ۲۳(۹۱): ۸۱-۸۸.
۳. بهاروند، س. و س. سوری. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

- با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوزه سپیددشت، لرستان). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۶(۴): ۳۱-۱۵.
۴. پورهایمی، س.، ا. امیراحمدی و ا. اکبری. ۱۳۹۳. انتخاب مدل مناسب از بین روش‌های آماری دومتغیره جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در محیط GIS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بقیع). مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۴(۱۵): ۷۱-۸۹.
۵. جوادیان کوتنایی، س.، س. ملاماسی، ن. اورک و ج. مرشدی. ۱۳۹۳. تدوین الگوی ارزیابی توان اکولوژیک توسعه شهری با بهره‌گیری از فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) (نمونه موردی: شهرستان ساری). آمایش سرزمین، ۶(۱): ۱۵۳-۱۷۸.
۶. حجازی، س. ا. و م. رنجبریان شادباد. ۱۳۹۳. شناسایی عوامل موثر و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در بخش غربی حوضه آبریز سرندچای. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۳(۳): ۱۱۴-۱۲۹.
۷. داداش‌پور، ه. ح. ر. خدابخش و م. رفیعیان. 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، ۱(۱): ۱۱۱-۱۳۱.
۸. رمضانی گورابی، ب. و ه. ابراهیمی. ۱۳۸۸. شناخت عوامل موثر زمین لغزش در حوضه آبخیز سد برنجستانک قائمشهر. نگرش‌های نو در جغرافیای انسانی، ۱(۴): ۱۲۷-۱۳۶.
۹. زبردست، ا. ۱۳۸۹. کاربرد فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در برنامه‌ریزی شهری و منطقه‌ای. نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی، ۲(۴۱): ۷۹-۹۰.
۱۰. زیاری، ک. م. اکبرپور سراسکانرود، ه. سلامی و ا. عابدینی. ۱۳۸۶. بررسی تطبیقی دلایل عدم تحقق اهداف شهرهای جدید در ایران با بکارگیری روش ANP. جغرافیا، ۵(۱۲-۱۳): ۱۱۷-۱۳۹.
۱۱. ساسان‌پور، ف. و ج. موسی‌وند. ۱۳۸۹. تاثیر عوامل انسان‌ساخت در تشدید پیامدهای مخاطرات طبیعی در محیط‌های کلان شهری با کاربرد منطق فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۳(۱۶): ۲۹-۵۰.
۱۲. سالاری، م. ه. معاضد و ف. رادمش. ۱۳۹۱. مکان‌یابی محل دفن پسماند شهری با استفاده از مدل AHP_FUZZY در محیط GIS (مطالعه موردی: شهر شیراز). طلوع بهداشت، ۱۱(۱): ۹۶-۱۰۹.
۱۳. سلطانی، ع. و ط. طالبی اردکانی. ۱۳۹۲. بررسی نظام توزیع فضایی و تحلیل مکان‌گزینی پایانه‌های حمل و نقل اتوبوسرانی درون شهری شیراز با استفاده از تکنیک فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP). مطالعات و پژوهش‌های شهری و منطقه‌ای، ۵(۱۸): ۱۰۷-۱۲۲.
۱۴. سوری، س.، س. بهاروند و ط. فرهادی نژاد. ۱۳۹۲. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی (مطالعه موردی: حوزه چم سنگر). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۴(۴): ۴۷-۶۰.
۱۵. صدوق وینیی، ح. م. ر. ثروتی، ک. نصرتی، م. اسدی و م. ص. قربانی. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی لغزش زمین در منطقه کاشتر کامیاران برای کاهش مخاطرات. مدیریت مخاطرات محیطی، ۲(۱): ۱۰۵-۱۱۶.
۱۶. عابدینی، م. و ح. ستایشی نسا. ۱۳۹۳. پهنه‌بندی خطر وقوع لغزش با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی (AHP) مطالعه موردی: حوضه آبخیز گلجه. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۱۸(۴۹): ۱۳۹-۱۶۵.
۱۷. عشورنژاد، غ. ح. ع. فرجی سبکبار، س. ک. علوی‌پناه و م. ح. نامی. ۱۳۹۰. مکان‌یابی شعب جدید بانک‌ها و موسسات مالی و اعتباری با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی (Fuzzy ANP). پژوهش و برنامه‌ریزی شهری، ۲(۷): ۱-۲۰.
۱۸. فتحی، م. ح. ا. بهشتی جاوید و م. عابدینی. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین لغزش با مدل‌های آماری دومتغیره و منطق فازی. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۶(۳): ۴۹-۶۰.
۱۹. فرجی سبکبار، ح. ع. ح. نصیری، م. حمزه، س. طالبی و ی. رفیعی. ۱۳۹۰. تعیین عرصه‌های مناسب برای تغذیه مصنوعی بر پایه تلفیق روش‌های ANP و مقایسه زوجی در محیط GIS. مطالعه موردی دشت گربایگان فسا. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۲(۴): ۱۴۳-۱۶۶.
۲۰. فرجی سبکبار، ح. ع. م. سلمانی، ف. فریدونی، ح. کریم‌زاده و ح. رحیمی. ۱۳۸۹. مکان‌یابی محل دفن بهداشتی زباله روستایی با استفاده از مدل فرایند شبکه‌ای تحلیل (ANP): مطالعه موردی نواحی روستایی شهرستان فوچان. برنامه‌ریزی و آمایش فضا، ۱۴(۱): ۱۲۷-۱۴۹.

- دامنه‌ای (حرکات توده‌ای) با تاکید بر روشهای کمی تحلیل وقوع زمین لغزش، تهران: انتشارات سمت. ۲۲۴ صفحه.
۳۱. مکانیکی، ج. و ح. صادقی. ۱۳۹۱. مکان‌یابی مراکز بهداشتی-درمانی (بیمارستان‌ها) شهر بیرجند، از طریق تلفیق فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و مقایسه زوجی در محیط GIS. آمایش محیط، ۱۹(۵): ۱۲۱-۱۴۲.
32. Ahmed B. 2015. Landslide susceptibility mapping using multi-criteria evaluation techniques in Chittagong Metropolitan Area, Bangladesh. *Landslides*, 12(6): 1077-1095.
33. Balezentiene L, Streimikiene D, Balezentis T. 2013. Fuzzy decision support methodology for sustainable energy crop selection. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17: 83-93.
34. Bibi T, Gul Y, Rahman AA, Riaz M. 2016. Landslide susceptibility assessment through fuzzy logic inference system (flis). *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42: 355-360.
35. Chen C-Y, Huang W-L. 2013. Land use change and landslide characteristics analysis for community-based disaster mitigation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(5): 4125-4139.
36. Chen Y, Yu J, Khan S. 2010. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling & Software*, 25(12): 1582-1591.
37. Das I, Sahoo S, van Westen C, Stein A, Hack R. 2010. Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). *Geomorphology*, 114(4): 627-637.
38. Fathi MH, Khohdel K, Kandi AS, Ashrafi F, Z, Khaliji MA. The combination of spectral and spatial data in zoning of landslide susceptibility (Case study: Sangorchay reservoir). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES)*, 6(2): 515-527.
39. Feizizadeh B, Blaschke T, Nazmfar H, Rezaei Moghaddam M. 2013. Landslide susceptibility mapping for the Urmia Lake basin, Iran: a multi-criteria evaluation approach using GIS. *International Journal of Environmental Research*, 7(2): 319-336.
40. Feizizadeh B, Blaschke T. 2013. GIS-۲۱. قائدرحمتی، ص.، ا. باستانی فر و ل. سلطانی. ۱۳۹۰. بررسی تاثیرات تراکم بر آسیب‌پذیری ناشی از زلزله در شهر اصفهان (با رویکرد فازی). *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۲(۱): ۱۰۷-۱۲۲.
۲۲. قراگوزلو، ع. و م. علیزاده. ۱۳۹۳. رزیابی تناسب اراضی برای استقرار صنایع به روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی- منطق فازی Fuzzy-AHP (مطالعه موردی: شهرستان ملارد). *سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۵(۴): ۷۹-۹۴.
۲۳. قنبری، ح. و ش. روستایی. ۱۳۹۲. بررسی اولویت‌های برنامه‌ریزی و آمایش مناطق مرزی در استان آذربایجان شرقی با به کارگیری مدل تحلیل شبکه (ANP). *آمایش سرزمین*، ۵(۲): ۳۳۵-۳۶۰.
۲۴. کرمی، آ. و ع. عبدشاهی. ۱۳۹۰. رتبه‌بندی توسعه یافتگی مناطق روستایی استان کهگیلویه و بویراحمد به روش فازی. *تحقیقات اقتصاد کشاورزی*، ۳(۱۱): ۱۱۷-۱۳۶.
۲۵. کریمی، ح.، ف. نادری، ب. ناصری و ع. سلاجقه. ۱۳۹۳. مقایسه مدل‌های مختلف برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوزه آبخیز زنگوان ایلام. *مرتع و آبخیزداری*، ۶۷(۳): ۴۵۹-۴۸۵.
۲۶. کیا، س. م. ۱۳۹۰. منطق فازی در MATLAB. انتشارات کیان رایانه سبز، چاپ دوم. ۳۰۴ صفحه.
۲۷. کیانی، ا.، خ. یزی و ف. سالاری سردری. ۱۳۹۲. اولویت‌سنجی تعیین راهبردهای توسعه فضاهای عمومی شهر عسلویه با استفاده از مدل فرآیند تحلیل شبکه (ANP). *تحقیقات جغرافیایی*، ۲۸(۴): ۱۹۵-۲۱۰.
۲۸. متکان، ع.، ا. ع. شکیبیا، س. ح. پورعلی و ح. نظم‌فر. ۱۳۸۷. مکانیابی مناطق مناسب جهت دفن پسماند با استفاده از GIS (ناحیه مورد مطالعه: شهر تبریز). *علوم محیطی*، ۶(۲): ۱۲۱-۱۳۱.
۲۹. متولی، ص.، م. م. حسین زاده، ر. اسماعیلی و خ. درفش. ۱۳۹۴. ارزیابی دقت روش‌های رگرسیون چند متغیره (MR)، رگرسیون لجستیک (LR)، تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و منطق فازی (FL) در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حوزه آبخیز طالقان. *پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی*، ۴(۱): ۱-۲۰.
۳۰. مرادی، ح.، ر. م. محمدی و ح. ر. پورقاسمی. ۱۳۹۱. حرکات

- multicriteria decision analysis for landslide susceptibility mapping: comparing three methods for the Urmia lake basin, Iran. *Natural Hazards*, 65(3): 2105-2128.
41. Feizizadeh B, Roodposhti MS, Jankowski P, Blaschke T. 2014. A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. *Computers & Geosciences*, 73: 208-221.
 42. Ilanloo M. 2011. A comparative study of fuzzy logic approach for landslide susceptibility mapping using GIS: An experience of Karaj dam basin in Iran. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 19: 668-676.
 43. Intarawichian N, Dasananda S. 2010. Analytical Hierarchy Process for landslide susceptibility mapping in lower Mae Chem watershed, Northern Thailand. *Suranaree Journal of Science & Technology*, 17(3): 277-292.
 44. Kahraman C, Kaya İ. 2010. Investment analyses using fuzzy probability concept. *Technological and Economic Development of Economy*, 16(1): 43-57.
 45. Khan S, Faisal MN. 2008. An analytic network process model for municipal solid waste disposal options. *Waste Management*, 28(9): 1500-1508.
 46. Kumar FP, Claudio D. 2016. Implications of estimating confidence intervals on group fuzzy decision making scores. *Expert Systems with Applications*, 65: 152-163.
 47. Marrapu BM, Jakka RS. 2014. Landslide Hazard Zonation methods: A critical review. *International Journal of Civil Engineering and Research*, 5(3): 215-220.
 48. Neaupane KM, Piantanakulchai M. 2006. Analytic network process model for landslide hazard zonation. *Engineering Geology*, 85(3): 281-294.
 49. Nefeslioglu HA, Sezer EA, Gokceoglu C, Ayas Z. 2013. A modified analytical hierarchy process (M-AHP) approach for decision support systems in natural hazard assessments. *Computers & Geosciences*, 59: 1-8.
 50. Saaty TL. 2004. Fundamentals of the analytic network process-Dependence and feedback in decision-making with a single network. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(2): 129-157.
 51. Shadman Roodposhti M, Aryal J, Shahabi H, Safarrad T. 2016. Fuzzy Shannon Entropy: A Hybrid GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping Method. *Entropy*, 18(10): 1-20.
 52. Shahabi H, Hashim M, Ahmad BB. 2015. Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, and fuzzy logic methods at the central Zab basin, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 73(12): 8647-8668.
 53. Sumathi V, Natesan U, Sarkar C. 2008. GIS-based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill. *Waste Management*, 28(11): 2146-2160.
 54. Wolfslehner B, Vacik H, Lexer MJ. 2005. Application of the analytic network process in multi-criteria analysis of sustainable forest management. *Forest Ecology and Management*, 207(1): 157-170.
 55. Zadeh LA. 1975. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information Sciences*, 8(3): 199-249.



Landslide susceptibility mapping using fuzzy-analytic network process

E. Akbari ^{1,2*}, A. Darvishi Boloorani ³, N. Neysani Samani ³

1. PhD. Student of Remote Sensing, University of Tehran

2. Lecturer, Department of Geomorphology and Climatology, Hakim Sabzevari University

3. Assis. Prof. College of Geography, University of Tehran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 May 2017

Accepted 19 July 2017

Available online 11 November 2017

Keywords:

Environmental modeling

Landslides

Fuzzy-analytic network process

Farub Roman basin -Neishabour

ABSTRACT

In recent decades, with the expansion of human activities on the natural environment, a variety of hazards, including landslides, have had serious human and financial damage. As a result, landslide susceptibility assessment and identifying the critical areas for watershed protection seems to be necessary. In this study, landslide susceptibility using combined fuzzy and Analytic Network Process (FANP) methods has been modelled on the Farub Roman basin. To achieve this goal, four clusters; topography, biological, hydro-climate and geological and criteria such as elevation, slope, aspect, curvature, distance from roads, land use, normalized difference vegetation index (NDVI), distance from rivers, drainage density, rainfall, soil moisture index, distance from faults and lithology have been considered. The results showed that the Fuzzy-analytic network process model is appropriate for landslide susceptibility modelling for as much as in model validation through the Relative Operating Characteristic (ROC) curves, the AUC, 0.83 has achieved with the standard error; 0.07, of the P-value equal to zero. For assessing the landslide susceptibility in the Farub Roman basin based on the results of the ROC curve, fuzzy ANP model evaluated very well. In addition, the results showed that, 66% of the known landslides have been found in areas with high and very high sensitivity. Due to the estimation of the high and very high sensitivity of landslides; 51% of the total area, the implementation of studying watershed protection seems to be necessary.

* Corresponding author e-mail address: akbari.elahe@ut.ac.ir