پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دورهٔ ۴۶، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۳
ص. ۵۰۸-۴۹۵

ارزیابی روش‌های تحلیل شبکه (ANP) و تحلیل چندمعیارهٔ مکانی در بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در محدودهٔ محور و مخزن سدها (مطالعهٔ موردی: سد قلعهٔ چای)

شهرام روستائی ـ استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز
لیلا خدائی قشلاق* ـ کارشناسی‌ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه تبریز
فاطمه خدائی قشلاق ـ دانشجوی کارشناسی‌ارشد هیدروژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۲۸ تأیید نهایی: ۱۳۹۳/۰۷/۰۹

چکیده

ارزیابی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در منطقه‌ای که به دلیل وضعیت جغرافیایی و ساخت‌وسازهای انسانی مستعد لغزش است ضروری است. سد مخزنی قلعهٔ چای‌عجبشیر یکی از این نوع نواحی است. در این مطالعه، به منظور بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش روش‌های تحلیل شبکه (ANP) و چندمعیارهٔ مکانی ارزیابی شد. در این مطالعه از تصویر TM، ۲۰۱۱ ماهوارهٔ لندست استفاده شد. فاکتورهای مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش (شیب، جهت دامنه، لیتولوژی، کاربری زمین، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، طبقات ارتفاعی) در محیط GIS آماده و سپس با لایهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌ها قطع داده شد و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در روش‌های فوق تولید شد. نتایج نشان داد که در بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در منطقهٔ مورد مطالعه، فرایند تحلیل چندمعیارهٔ مکانی نسبت به روش فرایند تحلیل شبکه عملکرد بهتری دارد. همچنین، تفسیر ضرایب نشان داد که کاربری اراضی، طبقات ارتفاعی و جهت دامنه نقش مهمی در وقوع زمین‌لغزش دارد و با استفاده از نقشهٔ پیش‌بینی احتمال وقوع زمین‌لغزش، منطقه به پنج گروه حساسیت بسیار پایین، پایین، متوسط، بالا و بسیار بالا تقسیم شد.

کلیدواژه‌ها: سد قلعه‌چای، تحلیل شبکه (ANP)، تحلیل چند معیارهٔ مکانی، ماهوارهٔ لندست، زمین‌لغزش.

مقدمه

مدیریت بلایای طبیعی نیازمند اطلاعات مکانی، جهت آمادگی در برابر خطرات و کاهش روند آن‌هاست. در این زمینه ارزیابی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در منطقه‌ای که به دلیل وضعیت جغرافیایی و ساخت‌وسازهای انسانی مستعد لغزش است ضروری است. سد قلعه‌چای واقع در حوضهٔ آبریز قلعه‌چای در شهرستان عجبشیر یکی از این نوع نواحی است. اهمیت بررسی ساختگاه سازه‌های مهندسی به‌ویژه محل محور و مخزن سدها از دیدگاه خطر زمین‌لغزش به حدی است که اکنون این مسائل در گروه‌های مهندسان مشاور بزرگ در جهان با دقت در برنامهٔ مطالعات اصلی قرار می‌گیرد. به این ترتیب مشاهده می‌شود که عدم توجه به مسئلهٔ یافتن و وجود زمین‌لغزه‌های قدیمی یا احتمالی آینده و ایجاد سد در

نویسندهٔ مسئول: ۰۹۳۷۹۵۲۸۱۷۶
* E- mail: khodaeiLeila @yahoo.com

محل‌های انتخابی وقوع آن‌ها در آینده موجب خسارت‌های مالی و جانی می‌شود، به نحوی که در صورت وجود برخوردی واقع‌بینانه با این مسئله، پس از اثبات وجود زمین‌لغزه در محل انتخاب‌شده مطالعات باید مجدداً تکرار شود یا اینکه درصورت عدم توجه به‌طور کلی به این موضوع (که غالباً این‌گونه است) سد در محلی خطرناک ایجاد خواهد شد، که علاوه‌بر هزینه‌های سنگین بعدی برای نگهداری سد، در صورت ایجاد حرکت جدید در دامنهٔ لغزنده، خطرهای جانی نیز منطقهٔ پایین دست سد را تهدید خواهد کرد.

در این مطالعه، سد قلعه‌چای، واقع در حوضهٔ آبریز قلعه‌چای به صورت موردی انتخاب شده است. به وجود زمین‌لغزش‌های قدیمی در منطقه، که می‌بایست در مرحلهٔ شناسایی و مطالعهٔ اولیهٔ سد مورد توجه قرارگیرد، اهمیت کافی داده نشده و در اثرآب‌گیری سد، باعث افزایش فشار آب منفذی بر پنجهٔ زمین‌لغزش قدیمی منطقه و کاهش مقاومت برشی مواد انباشته در پنجه شده است که به تبع آن وقوع زمین‌لغزش‌های جدید را روی زمین‌لغزش قدیمی در منطقه سبب شده است. استمرار حرکات تکیه‌گاه راست سد در انتهای مخزن سد باعث انباشته‌شدن سد از نهشته‌ها می‌شود که طول عمر سد را بسیار کاهش خواهد داد. همچنین، ادامهٔ حرکات تکیه‌گاه چپ سد در میانهٔ مخزن سد فاجعه‌بار خواهد بود (سرتیپی و انتظام‌سلطانی، ۱۳۹۱: ۱).

طی سال‌های متمادی، مطالعات زیادی در زمینهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در داخل و خارج از کشور صورت گرفته (سارولی، ۲۰۰۱)، از جمله با استفاده از روش رگرسیون خطی[1] به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در کشور کره پرداخته شده است. نتایج نشان داد که این روش نتایج نسبتاً مناسبی دارد. چاو و همکاران (۲۰۰۳) به تحلیل خطر زمین‌لغزش در شهر هنگ‌کنگ با استفاده از GIS و زمین‌لغزش‌های صورت‌گرفته پرداختند. نتایج نشان داد تلفات و مضرراتی که زمین‌لغزش‌ها سبب شدند، با تجمع بارندگی در هنک‌گنگ افزایش یافت و همبستگی شدیدی بین داده‌های بارندگی و نتایج زمین‌لغزش‌ها نشان داده شد. در نهایت، نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش برای شهر مذکور با استفاده از داده‌های تاریخی تهیه شد.

به‌طور بالقوه، GIS را برای خطر زمین‌لغزش و نقشه‌های خطر جهت انجام محاسبات رستری استفاده می‌کنند. آیالیو و یاماگیشی (۲۰۰۵) از دو روش سلسله‌مراتبی و رگرسیون لجستیک برای تهیهٔ نقشهٔ حساسیت زمین‌لغزش در جزیرهٔ سادو[2] در ژاپن استفاده کردند و با مقایسهٔ این دو روش برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به این نتیجه رسیدند که مدل AHP[3] نسبت به مدل رگرسیون لجستیک از دقت بالاتری برخوردار است. در داخل کشور نیز مطالعات زیادی در این زمینه انجام گرفته است، از جمله فتاحی اردکانی (۲۰۰۲) به ارزیابی کارایی تعدادی از روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوزهٔ آبخیز سد لتیان پرداخت. نتایج نشان داد که روش‌های وزن متغیرها و ارزش اطلاعاتی با دقت‌هایی در حدود ۹۹/۷ و ۹۹/۴ درصد از میان مدل‌های انتخاب شده برای استفاده در مناطق مشابه حوزهٔ آبخیز سد لتیان در البرز مرکزی کاراترین روش است. روستائی (۱۳۸۳) به بررسی دینامیک لغزش‌های زمین و علل وقوع آن‌ها با استفاده از

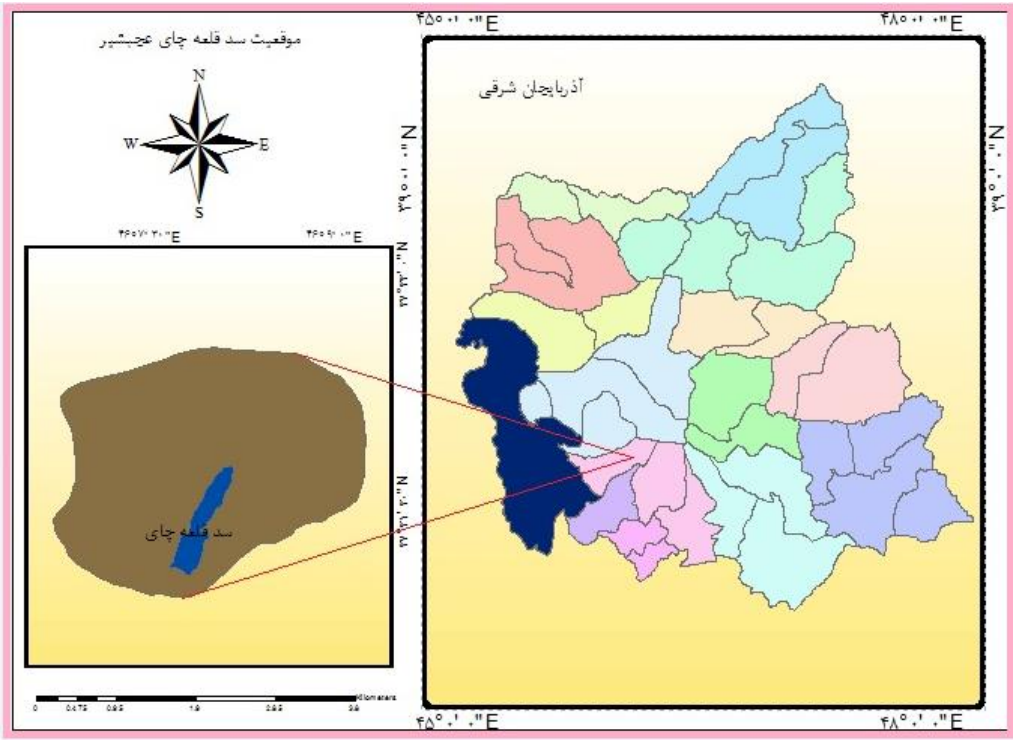
1. Liner Regression Modeling
2.Sado
3.Analytical Hierarchy process

روش‌های مورفومتری در حوضهٔ اهرچای پرداخت. حدود پنجاه مورد لغزش اتفاق افتاده در حوضهٔ اهرچای با استفاده از روش‌های مورفومتری تحلیل مورفولوژیکی شد. در نهایت به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضهٔ مذکور با استفاده از مدل آن‌بالاگان اقدام شد.

سرتیپی و انتظام‌سلطانی (۱۳۹۱) به بررسی زمین‌لغزش‌های ساختگاه سد قلعه‌چای عجبشیر، بر پایهٔ داده‌های زمین‌شناسی پرداختند. بدین منظور شناسایی دقیق سنگ‌ها و رفتار آن‌ها، ناپیوستگی‌ها و ساختارهای خطی منطقه، خواص مصالح سنگی و خاکی منطقه و پدیده‌ها و مخاطرات زمین‌شناسی منطقه را با استفاده از مطالعات ژئورادار بررسی کردند. در این پژوهش دو روش تحلیل چند معیارهٔ مکانی و فرایند تحلیل شبکه بررسی شد. بنابراین، هدفی که از این پژوهش دنبال می‌شود این است که حرکات و ناپایداری‌های دامنه‌ای و عوامل مؤثر در آن در محدودهٔ محور و مخزن سد قلعه‌چای عجبشیر شناخته شود تا بدین وسیله از آثار زیان‌بار آن در عرصه‌های منابع طبیعی و سایر بخش‌های توسعهٔ عمرانی و اقتصادی جلوگیری و نقاط با پتانسیل بالای خطر شناسایی و پهنه‌بندی شود.

معرفی منطقهٔ مورد مطالعه

منطقهٔ مورد مطالعه، محدودهٔ محور و مخزن سد قلعه‌چای، بخشی از حوضهٔ آبخیز قلعه‌چای از شبکه‌های زهکشی شعاعی ارتفاعات آذرین سهند است که پس از زهکشی محیط پیرامون خود، به دریاچهٔ ارومیه می‌ریزد. شاخهٔ اصلی رودخانهٔ قلعه‌چای به‌طول تقریبی ۶۰ کیلومتر از ارتفاعات ۳۴۱۲ متری (کوه میدان داغ) سرچشمه گرفته و به رقوم ۱۲۷۰ متر در دشت عجبشیر ختم می‌شود (احمدزاده، ۱۳۸۴: ۴۳).

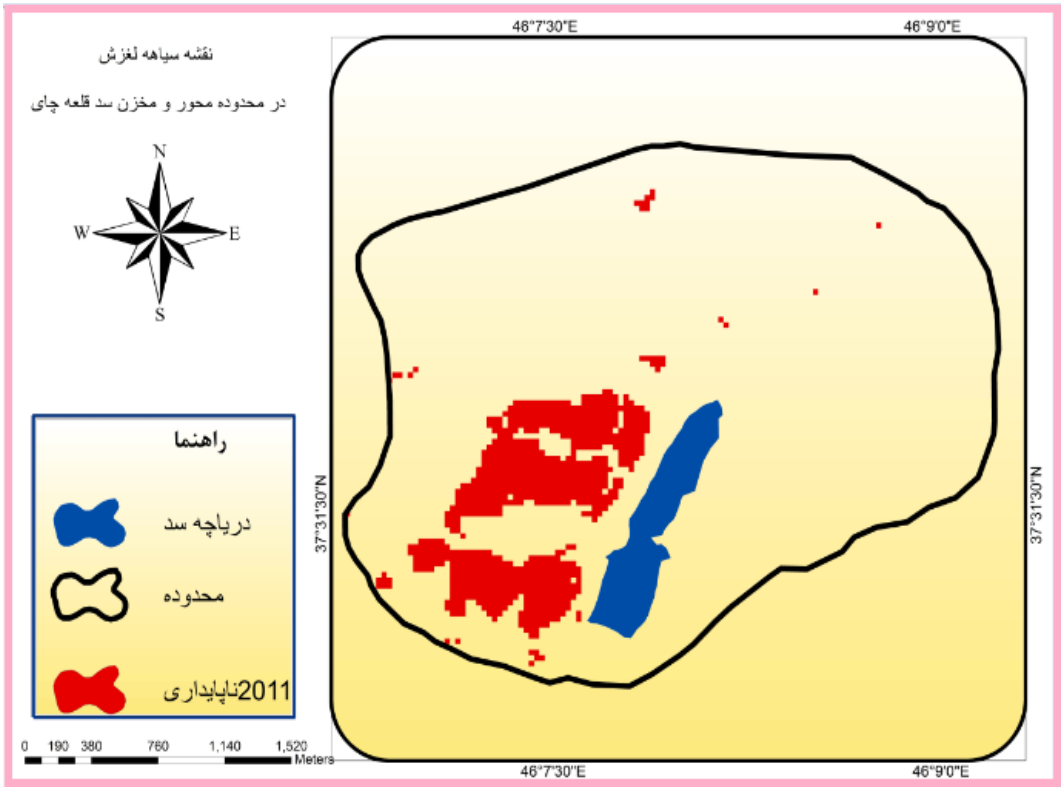


شکل ۱. موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه

سد مخزنی قلعه‌چای روی شاخهٔ اصلی رودخانه منطبق بر مختصات جغرافیایی "۳۷°۳۱'۰۶ عرض شمالی و "۴۶°۰۷'۳۷ طول شرقی در ۳۵ کیلومتری شمال خاوری شهرستان عجبشیر به مساحت ۸/۱۳۴ کیلومترمربع و محیط ۱۱۰۲۴/۴۸ متر قرار گرفته است. این سد خاکی در سال ۱۳۸۰ شروع به اجرا و در سال ۱۳۸۸ آبگیری شد. روستای ینگجه در بالادست سد قرار گرفته است. محل سد در مسیر زهکشی رودخانهٔ به نسبت بزرگی احداث شده که از تلاقی چندین رودخانه و به‌هم پیوستن آن‌ها تشکیل شده است.

پراکنش زمین‌لغزش‌ها

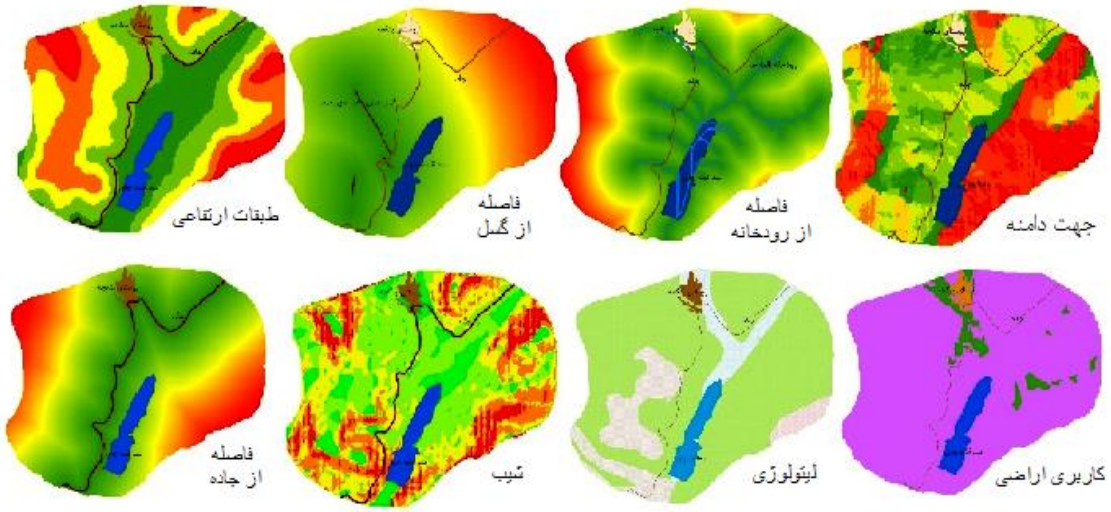
نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش مجموعه‌ای از زمین‌لغزش‌های رخ داده در یک ناحیه مشخص است و سبب نوعی آگاهی و بصیرت در مورد مکان‌های وقوع زمین‌لغزش و کسب اطلاعات از نوع و خسارت‌های آن‌ها می‌شود (فون‌وسترن و همکاران، ۲۰۰۸). معمولاً زمین‌لغزش‌ها به صورت ناحیه‌ای یا اشکال نقطه‌ای ظاهر می‌شود. عکس هوایی و یا تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا نشان می‌دهند که زمین‌لغزش‌ها به صورت مناطق پهنه‌ای شکل می‌گیرند. در ناحیهٔ مورد مطالعه نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌ها به صورت پهنهٔ لغزشی بر اساس تصویر ماهوارهٔ لندست، سنجندهٔ TM سال ۲۰۱۱، به شمارهٔ مسیر و ردیف گذر ۳۴ – ۱۶۸ تهیه شد. مساحت پیکسل‌های لغزشی منطقه حدود ۰/۷۹ کیلومترمربع است که حدود ۹/۷۱ درصد مساحت منطقه را به خود اختصاص می‌دهد. شکل ۲ پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه را نشان می‌دهد.



شکل ۲. پراکنش زمین‌لغزش‌ها

بررسی فاکتورهای مؤثر در زمین‌لغزش

به منظور بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش هشت فاکتور شیب، جهت دامنه، لیتولوژی، کاربری اراضی، طبقات ارتفاعی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه و فاصله از جاده عوامل و فاکتورهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه تشخیص داده شد. لایه‌های مربوط به فاکتورها در محیط ArcGIS تهیه شد. شکل ۳ نقشه‌های عوامل (معیارها) مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نقشه‌های فاکتورهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقهٔ مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

الف) کاربرد تحلیل شبکه (ANP)[1] برای شناسایی مناطق مستعد خطر

طی سال‌های متمادی روش ANP روشی فراگیر و چند منظوره در تصمیم‌گیری است که به صورت گسترده‌ای در حل مسائل تصمیم‌گیری استفاده می‌شود. ANP قالبی کلی ایجاد می‌کند که در آن به وابستگی عناصر بین خود تأکید می‌کند. این مدل برای پرکردن خلأ عدم ایجاد ارتباطات بین عناصر و معیارها در مدل سلسله‌مراتبی به وجود آمد و اساس آن شکل‌دهی شبکه‌ای از ارتباطات و وابستگی‌ها و پیوندها بین عناصر و خوشه‌هاست.

فرایند ANP تنها نظریه‌ای ریاضی است که امکان بررسی انواع مختلف برهم‌کنش‌ها، وابستگی‌ها و بازخوردها را به صورت سیستمی فراهم می‌سازد. دلیل موفقیت این روش در نحوهٔ استخراج قضاوت‌ها و به‌کار بردن عملیات اندازه‌گیری ریاضی برای سنجش مقیاس‌های نسبی است. ارجحیت‌ها (به عنوان مقیاس‌های نسبی) بنیان عددی متقاعدکننده‌اند که عملیات‌های محاسباتی اولیه را به گونه‌ای با معنا هدایت می‌کنند (ساعتی، ۲۰۰۴: ۴). بنابراین، قدرت ANP بر استفاده از مقیاس‌های نسبی برای کنترل همهٔ برهم‌کنش‌ها، برای پیش‌بینی دقیق و اتخاذ تصمیم مناسب استوار است (محمدی لرد، ۱۳۸۸: ۵۷).

1. Analytic Network Process

مراحل کلی فرایند تحلیل شبکه‌ای به شرح زیر است:

- تعیین شاخص‌ها و معیارها و گزینه‌ها
- دسته‌بندی معیارها در خوشه‌ها و عناصر
- تعیین ارتباطات بین خوشه‌ها، عناصر و گزینه‌ها
- مقیاس‌های زوجی بین خوشه‌ها، عناصر و گزینه‌ها
- تشکیل ابرماتریس غیروزنی، وزنی و حدی
- محاسبهٔ وزن نهایی عناصر و گزینه‌ها.

به‌منظور اجرای روش تحلیل شبکه، تهیهٔ لایه‌های مربوط به معیارها در نرم‌افزار ArcGIS انجام شد. سپس در محیط نرم‌افزار سوپر دسیژن[1] مدل اصلی فرایند تحلیل شبکه بر اساس پرسشنامه‌های تکمیل‌شدهٔ کارشناسان متخصص در این زمینه طراحی شد. سپس، ارتباط بین خوشه‌ها، عناصر و گزینه‌ها با استفاده از روش دیماتل[2] انجام گرفت. سپس مقیاس‌های زوجی بین خوشه‌ها، عناصر و گزینه‌ها بر اساس مقیاس اهمیت عوامل ساعتی انجام گرفت. در نهایت، سه ابرماتریس غیروزنی، وزنی و حدی محاسبه و میزان اهمیت کلاس‌های خطر تعیین شد. سپس، اهمیت هر یک از معیارهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه به‌دست آمد. در آخر، با توجه به ضرایب حاصل، نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه و نقشهٔ حاصل در پنج کلاس خطر بسیار بالا تا بسیار پایین طبقه‌بندی شد.

ب) مدل تحلیل چند معیارهٔ مکانی (اکتشافی)

به‌منظور ارزیابی استعداد زمین‌لغزش در مناطق مختلف با استفاده از مدل اکتشافی به طور معمول دو روش وجود دارد: روش مستقیم و روش غیرمستقیم. روش مستقیم به‌منظور تفسیر استعداد زمین‌لغزش در منطقه، با استفاده از نقشه‌های دقیق مبنا استفاده می‌شود (برای مثال، نقشه‌های ژئومورفولوژی). اما در روش غیرمستقیم، از تکنیک‌های یکپارچه‌سازی داده در نرم‌افزارهای خاص استفاده می‌شود. این مطالعه با استفاده از روش غیرمستقیم مدل اکتشافی انجام می‌گیرد (کابرال، ۲۰۱۱). تحلیل چندمعیارهٔ مکانی روشی نیمه‌کیفی است که در کنار خواص دانش پایه از نظرات کارشناسان، نتایج تحقیقات قبلی و... نیز استفاده می‌کند. همچنین، از روش‌های شاخص پایه نظیر روش رتبه‌بندی ساده، رتبه‌ای یا فرایند تحلیل شبکه[3] و یا تحلیل سلسله مراتبی[4] جهت تعیین وزن و ایجاد مدل استفاده می‌کند. بنابراین، امتیازدهی و تعیین وزن برای ایجاد مدل در رویکرد اکتشافی در نقشهٔ تهیه‌شده از مدل اکتشافی بر اساس فرمول ریاضی (کابرئل، ۲۰۱۱: ۵۰) زیر صورت می‌گیرد.

رابطه ۱ $LSI_h = (W_1*X_1) + (W_2*X_2) +\ldots+ (W\ n*X\ n)$

LSI_h = نقشهٔ شاخص استعداد زمین‌لغزش از مدل اکتشافی

1. supper decisions
2. Dimatel
3. analytic network process
4. analytical hierarchy process

$W_1 \ldots W_n$ = وزن فاکتورهای مؤثر

$X_1 \ldots X_n$ = متغیر پیش‌بینی‌کننده و فاکتور مؤثر

به منظور اجرای روش فوق، ابتدا اطلاعات مورد نیاز نظیر نقشه‌های پایه (شیب، جهت دامنه، لیتولوژی، کاربری اراضی، طبقات ارتفاعی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده) گردآوری شد. سپس، این داده‌ها جهت ورود به نرم‌افزار الویس آماده‌سازی شد. آماده‌سازی داده‌ها شامل ایجاد نقشهٔ فاصله برای لایه‌های خطی نظیر رودخانه، جاده و گسل، سپس رستری‌نمودن تمام لایه‌های مورد نیاز بود. در ادامه، در محیط ارزیابی چند معیارهٔ مکانی[1] نرم‌افزار الویس[2]، مدل تحلیل چندمعیارهٔ مکانی به شکل درخت‌واره طراحی شد. همچنین، استانداردسازی عوامل در همان محیط صورت گرفت و عوامل و معیارها وزن‌دهی شد. به‌منظور وزن‌دهی به عوامل از روش تحلیل مقایسهٔ زوجی عناصر استفاده شد. سپس، براساس تلفیق اطلاعات به‌دست آمده نقشهٔ شاخص ترکیبی حاصل شد. در نهایت، در پنج کلاس خطر بسیار بالا تا بسیار پایین پهنه‌بندی شد.

ارزیابی کارایی تحلیل شبکه و اکتشافی با پراکنش زمین‌لغزش‌ها

در این مطالعه به منظور ارزیابی موفقیت مدل‌ها از درجهٔ تناسب استفاده شده است. درجهٔ تناسب عملکرد مدل را به‌وسیلهٔ ارزیابی خطای نسبی و موفقیت نسبی بیان می‌کند. خطای نسبی عبارت است از جمع ارزش کلاس‌های مستعد پایین و خیلی پایین؛ و ارزیابی مقدار نسبی موفقیت عبارت است از جمع ارزش کلاس‌های استعداد بالا و خیلی بالا. کمترین خطای نسبی و بالاترین مقدار موفقیت نسبی، برترین مدل و بهترین نقشه از بین چهار مدل فوق را نشان می‌دهد.

یافته‌های پژوهش

فرایند تحلیل شبکه (ANP)

در این تحقیق مدل شبکه‌ای سه لایه‌ای متشکل از لایهٔ هدف، لایهٔ معیارها و لایهٔ گزینه‌ها با توجه به مسئلهٔ تحقیق طراحی و سازماندهی شد. طراحی شبکه مورد نظر از چندین مرحله تشکیل شد. مرحلهٔ اول، هدف و موضوع مورد مطالعه بود؛ یعنی، باید یک موضوع و هدف تعیین می‌شد تا فرایند ارزشیابی و انتخاب بهترین گزینه برای این هدف صورت گیرد. بررسی پتانسیل زمین‌لغزش به منزلهٔ هدف این مطالعه برای لایهٔ نخست طراحی شد. مرحلهٔ دوم، وجود معیارها و شاخص‌هایی است که برای ارزشیابی موضوع انتخاب می‌شود. معیارهای تحقیق نیز فاکتورهای تأثیرگذار در وقوع لغزش‌های منطقه است که در خوشه‌های جداگانه برای لایهٔ دوم طراحی شد. کلاس‌ها یا گزینه‌های مورد نظر بر اساس طبقات خطر در خوشه‌ای جداگانه در لایهٔ سوم قرارگرفتند. ایجاد ارتباط بین عناصر و خوشه‌ها در تحقیق حاضر بر اساس تکنیک دیماتل[3] از طریق پرسشنامه صورت گرفت.

1. spatial multi criteria evaluation
2. Ilwis
3. decision making trial and evaluation

مقایسهٔ زوجی بین خوشه‌ها و عناصر

در این مرحله معیارهای کنترلی و خوشه‌ها با هم مقایسه شدند. در مقایسهٔ خوشه‌ها، یک خوشه خوشهٔ اصلی انتخاب شد. سپس، ارجحیت سایر خوشه‌های مرتبط با آن نسبت به هم و در مقایسه با خوشهٔ اصلی مقایسه شد (محمدی‌لـرد، ۱۳۸۸: ۵۵). در حدود ۱۴۳ مورد مقایسهٔ زوجی بین خوشه‌ها صورت گرفت. پس از انجام مقایسه، برای مشاهدهٔ نتایج مقایسـه‌هـا میزان نرخ ناسازگاری آن‌ها بررسی شد. نرخ ناسازگاری قضاوت انجام شده برای نمونه برابـر بـا ۰/۰۸۶۷ و کمتـر از ۰/۱ بود. در این روش میزان نرخ ناسازگاری نباید بیشتر از ۰/۱ باشد که این میزان از خطا با توجه به تعـداد زیـاد قضـاوت‌هـا قابل قبول است. همچنین، در داخل هر خوشه مجموعه‌ای از عناصر قرار دارند که با هم مقایسه شدند. مقایسهٔ عناصر هر خوشه شبیه روش AHP و مقایسهٔ دودوئی ساعتی[1] است. در حدود ۹۳ مورد مقایسهٔ عناصر درون خوشه صـورت گرفـت. برای انجام مقایسهٔ بین عناصر درون خوشه‌ها مثل روش مقایسهٔ زوجی بین خوشه، نسبت بـه معیـار کنترلـی، هـر معیـار نسبت به معیار دیگر از نظر اهمیت و ارجحیت مقایسه شد. میزان نرخ ناسازگاری به‌دست آمده برای قضاوت انجـام شـده برابر با ۰/۰۲۳۸ بود و کمتر از ۰/۱ را نشان داد. پس از محاسبات طولانی، ضریب و ارزش نهایی هر عنصر و گزینه تعیین شد. برای محاسبهٔ ضریب نهایی، سه نوع ابرماتریس محاسبه شد:

- ابرماتریس غیروزنی[2]
- ابرماتریس وزنی[3]
- ابرماتریس حدی[4].

Here are the overall synthesized priorities for the alternatives. You synthesized from the network Super Decisions Main Window: mogayese Claster.mod

Name	Graphic	Ideals	Normals	Raw
کلاس 1		1.000000	0.360978	0.026943
کلاس2		0.846583	0.305598	0.022810
کلاس3		0.428270	0.154596	0.011539
کلاس4		0.267185	0.096448	0.007199
کلاس5		0.228211	0.082379	0.006149

شکل ۴. میزان اهمیت کلاس‌ها

این سه نوع ماتریس در ارتباط با یکدیگر محاسبه و تجزیه‌وتحلیل شدند. در نهایت، نتیجهٔ کلی به‌دست آمد. شـکل ۴ نتایج اهمیت کلاس‌ها را براساس اولویت و اهمیت آن‌ها از نظر خطر وقوع زمین‌لغزش نشان می‌دهد. بر اسـاس نتـایج

1. Saaty
2 .unweighted super matrix
3. weighted super matrix
4. limit super matrix

به‌دست آمده کلاس ۱ بیشترین اهمیت را از نظر وقوع خطر زمین‌لغزش با توجه به وزن ایده‌آل[1] داراست. این کلاس در نقشهٔ پهنه‌بندی با عنوان کلاس خطر بسیار بالا معرفی شد. سپس، به ترتیب از میزان اهمیت کلاس‌ها و خطرپذیری آن‌ها کاسته می‌شود به طوری که کلاس ۵ دارای کمترین میزان خطرپذیری و اهمیت است و در نقشه‌پهنه‌بندی عنوان کلاس خطر بسیار پایین را به خود اختصاص داده است.

با توجه به ضرایب به‌دست آمده در جدول ۱ برای هرکدام از فاکتورهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در مدل تحلیل شبکه‌ای، مشخص شد که بر اساس ضرایب محدود، عامل کاربری اراضی، جهت دامنه و طبقات ارتفاعی بیشترین اهمیت و تأثیر را دارند. پس از به‌دست آمدن ضرایب فاکتورهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش منطقه، نقشهٔ پهنه‌بندی زمین‌لغزش بر اساس مدل تحلیل شبکه‌ای در محیط ArcGIS تهیه شد. این نقشه در ۵ کلاس خطر بسیار بالا، بالا، متوسط، پایین و بسیار پایین طبقه‌بندی شد (شکل ۵). مدل پیشنهادی به صورت معادلهٔ ۲ ارائه شده است.

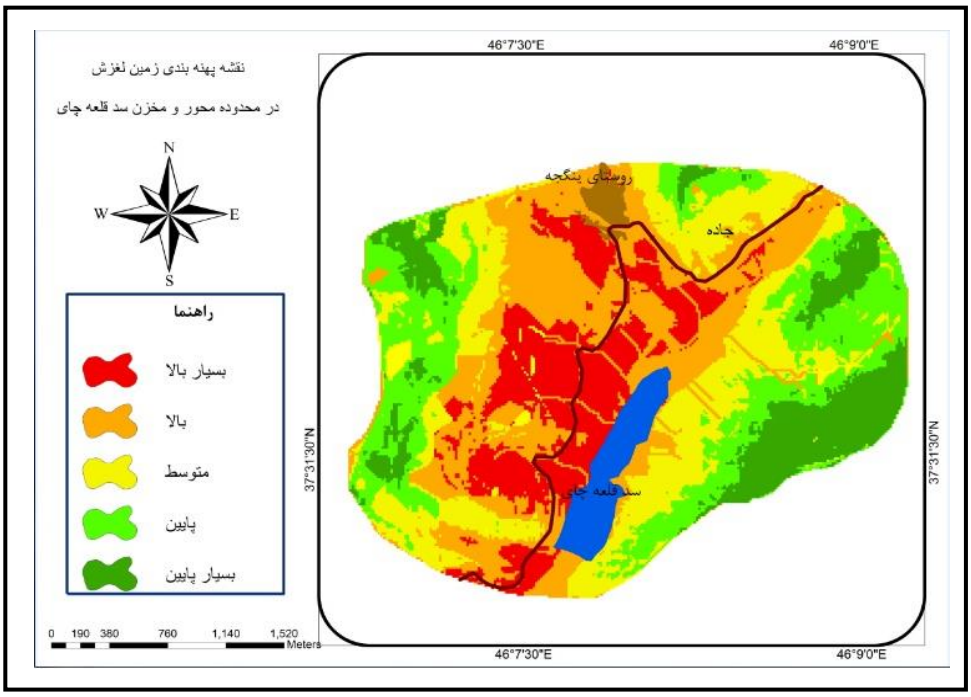
رابطه ۲

ANP=Slope×0.072623+Aspect×0.098560+Dem×0.085213+Landuse×0.136675+Litology ×0.070464+ Distance to river × 0.040709+Distance to Falt×0.062942+Distance to Road×0.063751

جدول ۱. ضرایب حاصل از فرایند تحلیل شبکه‌ای

ضرایب	معیارها	علایم اختصاری برای معیارها
۰/۰۷۲۶۲۳	شیب	X_1
۰/۰۹۸۵۶۰	جهت شیب	X_2
۰/۰۸۵۲۱۳	طبقات ارتفاعی	X_3
۰/۱۳۶۶۷۵	کاربری اراضی	X_4
۰/۰۷۰۴۶۴	لیتولوژی	X_5
۰/۰۴۰۷۰۹	فاصله از رودخانه	X_6
۰/۰۶۲۹۴۲	فاصله از گسل	X_7
۰/۰۶۳۷۵۱	فاصله از جاده	X_8

1. Ideals



شکل ۵. نقشهٔ پهنه‌بندی زمین‌لغزش به روش تحلیل شبکه در محور و مخزن سد قلعه‌چای

پس از انجام پهنه‌بندی زمین‌لغزش، درصد پهنه‌های لغزشی در هر کلاس محاسبه شد. نتیجه نشان داد که در محدودهٔ مورد مطالعه، مناطقی که با خطر بسیار پایین و بسیار بالا پهنه‌بندی شدند کمترین درصد از میزان مساحت منطقه را به خود اختصاص دادند، درحالی که مناطق با خطر بالا بیشترین مساحت از منطقهٔ مورد نظر را به خود اختصاص داد. جدول ۲ درصد پهنه‌های لغزشی در هر کلاس را در منطقه مورد نظر نشان می‌دهد.

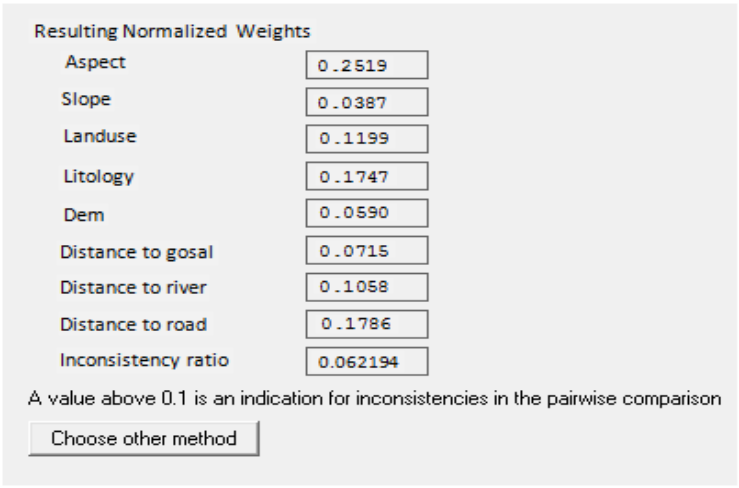
جدول ۲. مساحت پهنه‌های لغزشی به درصد

کلاس	مساحت به درصد
بسیار بالا	۱۶/۲۹
بالا	۳۲/۴۶
متوسط	۲۱/۳۹
پایین	۱۸/۴۰
بسیار پایین	۱۱/۴۴

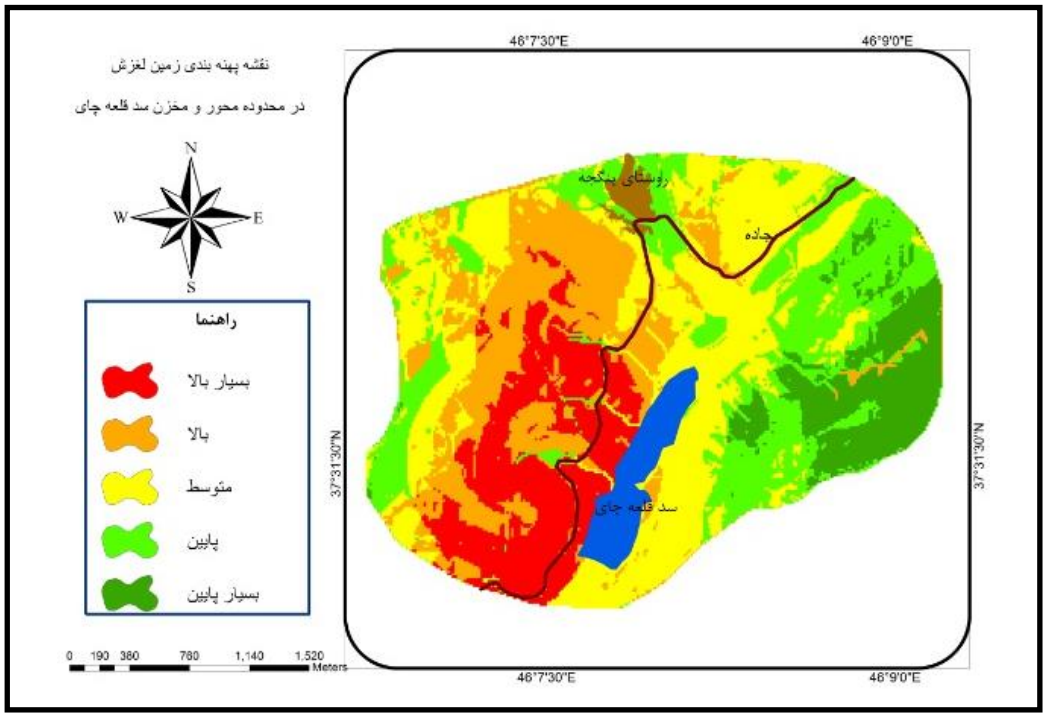
روش اکتشافی

نتایج حاصل از روش اکتشافی نشان داد که با توجه به شکل ۴ میزان نرخ ناسازگاری برای ۲۸ مورد مقایسهٔ زوجی انجام گرفته کمتر از ۰/۱ و برابر با ۰/۰۶۲۱۹۴ است که نشان‌دهندهٔ صحت مقایسه‌های صورت گرفته است. همچنین، تفسیر ضرایب حاصل برای فاکتورها نیز با توجه به شکل مذکور نشان داد که جهت دامنه، فاصله از جاده، و لیتولوژی نسبت به سایر فاکتورهای مورد بررسی به ترتیب دارای بیشترین اهمیت در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه است. همچنین، نقشهٔ پهنه‌بندی شدهٔ خطر زمین‌لغزش در محدودهٔ محور و مخزن سد، در شکل ۵ نشان داده شده است. نقشهٔ فوق در پنج

کلاس خطر بسیار بالا، بالا، متوسط، پایین، و بسیار پایین دسته‌بندی شد که با توجه بـه جـدول ۱ مسـاحت هـر یـک از پهنه‌های لغزشی بر حسب درصد نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهـد کـه کمتـرین مقـدار از مسـاحت منطقـه را کلاس خطر بسیار پایین با ۹/۴۷ درصد به خود اختصاص داده است. این پهنهٔ لغزشی در شمال شرق و شرق دریاچهٔ سـد واقع شده است که نسبت به جاده و گسل‌های کوچک واقع شده در قسمت جنوب غربی سد در مسافت دورتری واقع شده است، در حالی که پهنهٔ لغزشی خطر بسیار بالا در قسمت غرب و جنوب غربی سد بـا مسـاحت ۱۴/۶۳ درصـد از منطقـهٔ مورد مطالعه را پوشش داده است. این منطقه محل عبور جاده و قرارگیری گسل‌های کوچک واقع شده در جنـوب غربـی سد است. به‌طور کلی، از کل مساحت منطقه حدود ۳۴/۶۷ درصد تحت پوشش خطر بسیار بالا و بالا و ۲۷/۳ درصد تحت پوشش خطر پایین و بسیار پایین است.



شکل ۶. نتایج فرایند وزن‌دهی و میزان نرخ ناسازگاری



شکل ۷. نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در محور و مخزن سد قلعه‌چای به روش اکتشافی

جدول ۳. مساحت پهنه‌های لغزشی

کلاس	پهنه‌های لغزشی به درصد
بسیار بالا	۱۴/۶۳
بالا	۲۰/۰۴
متوسط	۳۸
پایین	۱۷/۸۳
بسیار پایین	۹/۴۷

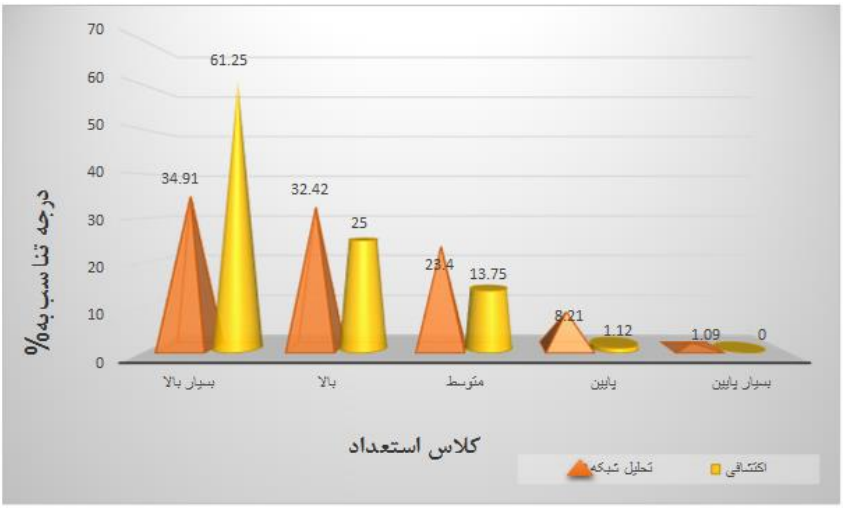
مدل آماری حاصل از اجرای روش اکتشافی برای تحقیق فوق با توجه به ضرایب حاصل و ترتیب فاکتورها از بالا به پایین در شکل ۶ به صورت معادلهٔ ۳ پیشنهاد می‌شود.

رابطه ۳

$$LSI_h = 0.2519 \times Aspect + 0.0387 \times Slope + 0.1199 \times Landuse + 0.1747 \times Litology + 0.0590 \times Dem + 0.0715 \times Dis\ Fault + 0.1058 \times Dis\ river + 0.1786 \times Dis\ road$$

مقایسهٔ روش‌ها

نتایج مدل‌ها از طریق قطع دادن نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌ها با نقشه‌های پهنه‌بندی به صورت درجهٔ تناسب مدل‌ها با پراکنش زمین‌لغزش‌ها ارزیابی شد. با توجه به نتایج شکل ۸ مقدار خطای نسبی برای روش تحلیل شبکه و اکتشافی به ترتیب برابر با ۹/۳ و ۱/۱۲ درصد و میزان موفقیت نسبی برابر با ۶۷/۳۳ و ۸۶/۲۵ درصد است.



شکل ۸. مقایسهٔ درجهٔ تناسب بین نتایج تحلیل شبکه و اکتشافی با نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌ها

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس مدل‌های مورد استفاده نتایج زیر حاصل شد. از میان هشت فاکتور مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه عامل کاربری اراضی جهت دامنه بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش داشته است. بیشترین لغزش‌ها در شیب‌های شرقی و

جنوبی و در ارتفاع ۱۷۴۱ تا ۱۸۸۶ متر به وقوع پیوسته‌اند که تحت تأثیر پوشش سازند میلا و زایگون‌اند و در سال‌های اخیر فعالیت‌های انسانی از جمله جاده‌سازی و سایر ساخت‌وسازهای انسانی و کشت دیم در این منطقه افزایش یافته است. براساس نتایج حاصل از شکل ۸ از نظر درصد درجهٔ تناسب نقشه‌های پهنه‌بندی روش‌های بحث شده، شکل ۵ و ۷ با نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌ها و شکل ۲ مدل تحلیل اکتشافی دارای پایین‌ترین مقدار خطای نسبی در حدود ۱/۱۲٪ و بالاترین مقدار موفقیت نسبی برابر با ۸۶/۲۵٪ است. با توجه به نتایج حاصل از نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در دو روش فرایند تحلیل شبکه و روش اکتشافی مشخص شد که دامنه‌های جنوب غربی سد قلعه‌چای نسبت به بقیهٔ قسمت‌های منطقه از ناپایداری بیشتری برخوردار است. بر روی این دامنه‌ها وجود گسل‌های کوچک، احداث جاده و ساخت‌وسازهای انسانی از جمله احداث سد و عوامل دیگر هر کدام به سهم خویش سبب تشدید این ناپایداری‌ها شده‌اند که در بین آن‌ها سهم عامل، کاربری اراضی و جهت دامنه نسبت به بقیهٔ عوامل بیشتر بوده است. با توجه به اینکه فرایند تحلیل شبکه برای اولین بار در بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در ایران به‌کار گرفته شد، لذا مطالعات موردی در این زمینه به منظور مقایسهٔ نتایج حاصل یافت نشد اما نتایج حاصل از اجرای این روش با روش‌های رگرسیون لجستیک و ارزش اطلاعاتی انجام یافته برای همین منطقه مورد مطالعه را خدائی (۱۳۹۲: ۱۲۵) بررسی کرد و نشان داد که تحلیل شبکه نسبت به دو روش فوق از کارایی بهتر و مناسب‌تری برخوردار است. در مقایسهٔ انجام گرفته بین سه روش ذکر شده روش تحلیل شبکه با ۶۷/۳۳٪، رگرسیون لجستیک با ۶۱/۴۵٪ و روش ارزش اطلاعاتی با ۵۲/۲۱٪ با نقشهٔ پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه تناسب داشت. لذا، می‌توان از این روش برای شناسایی پهنه‌های خطر در مناطق دیگر نیز استفاده کرد.

با توجه به مطالب ذکر شده، نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که روش تحلیل چند معیارهٔ مکانی یا اکتشافی در شناسایی مناطق خطر و پهنه‌بندی آن در منطقهٔ مورد مطالعه نسبت به روش تحلیل شبکه از عملکرد مناسبی برخوردار است. بنابراین، از دو مدل آماری به‌دست آمده از دو روش به‌کار رفته در این تحقیق مدل آماری حاصل از اجرای روش تحلیل چند معیارهٔ مکانی (معادلهٔ ۲) بهترین مدل انتخاب و معرفی شد. همچنین، با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقهٔ مورد مطالعه با استفاده از دو روش ذکر شده ۶۷/۳۳ درصد از کل مساحت منطقه واقع در دامنه‌های جنوب غربی سد قلعه‌چای دارای خطر بسیار بالا از نظر وقوع زمین‌لغزش است.

منابع

احمدزاده، ح. (۱۳۸۴). **مدلسازی فرسایش و رسوب حوضهٔ آبریز قلعه‌چای عجب‌شیر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در محیط GIS .** پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد، استاد راهنما: روستائی، شهرام، رشتهٔ سنجش از دور و GIS، دانشگاه تبریز، دانشکدهٔ علوم انسانی و اجتماعی.

خدائی قشلاق، ل. (۱۳۹۲). **ارزیابی روش‌های رگرسیون لجستیک و تحلیل شبکه در بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در محدودهٔ محور و مخزن سد. مطالعهٔ موردی: سد قلعه‌چای عجبشیر.** پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد، استاد راهنما: روستائی، شهرام، رشتهٔ سنجش از دور و GIS، دانشگاه تبریز، دانشکدهٔ جغرافیا.

روستایی، ش. (۱۳۸۳). **بررسی وقوع زمین‌لغزش در روستای نصیرآباد ورزقان (استان آذربایجان‌شرقی) با استفاده از روش‌های کمّی.** فصلنامهٔ علوم انسانی، دورهٔ ۸، شمارهٔ ۱.

سرتیپی، ع.؛انتظام سلطانی، ا. (۱۳۹۱). **بررسی زمین‌لغزش‌های ساختگاه سد قلعه‌چای عجبشیر.** سی‌امین گردهمایی علوم زمین، بهمـن، ص ۱– ۷.

محمدی‌لرد، ع. (۱۳۸۸). **فرایندهای تحلیل شبکه‌ای در (ANP) و سلسله‌مراتبی**. نشر تهران البرز فردانش، ص ۱–۱۴۴.

Ahmadzadeh H. (2005), **Modeling Erosion and Sediment of Catchment of Ghalea Chai Ajabshir by Using Satellite Data in GIS**, Master's Thesis, Supervisor: Roostaei. Sh., Remote Sensing and GIS, University of Tabriz, pp. 1-140.

Ayalew, L. and Yamagishi, H. (2005), **Theapplication of GIS-based logistic regression forlandslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan**, Geomorphology 65 (1-2), pp. 15-31.

Cabral, P.B.C. (2011), **Landslide Susceptibility Assessment in Karanganyaar Regency– Indonesia**, UniversidadeNova de Lisboa, February.

Chau K.T., Sze, Y.L., M.K., Fung, W.Y., Wong, E.L. and Fong, L.C.P (2003)**, Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS K.T**., Computers & Geosciences 30, pp. 429–443.

Khodaei Geshlagh, L. (2011), **Assessment of Logistic Regression Method and Analytic Network Process in the Investigation of Landslide Potential in the Axis Range and Reservoir Dam (Case Study: Ghalea Chai Dam)**, Master's Thesis, Supervisor: Roostaei. Sh., Remote Sensing and GIS, University of Tabriz, pp. 1- 142.

Mohammadi Lord, A. (2009), **Analytic Network Prosses in the ANP and Analytical Hierarchy**, Tehran Alborz Fardanesh.

Roostaei, Sh. (2004), **Evaluation of Landslide Occurrence in Nasir Abad Village Varzeqan (Province of East Azarbayjan) by Using Quantitative Methods**, Journal of Humanity, Volume 8, Number 1.

Saaty, T.L. (2004). **Mathematical Methods of Operations Research,** New York: McGraw.

Sarolee, K.M. (2001),"**Statistical Analysis of landslide susceptibility at Yonging, Korea**, Environmental Geology, 40, pp. 1095-1113.

Sartipi, A. and Entezam Soltani, E. (2011), **Evaluation of Ghalea Chai Dam Landslides**, The Thirtieth gatherings of Earth Sciences, Winter. pp. 1 – 7

Van Westen, C.J., Castellanos, E and Kuriakose. S.L. (2008), **Spatial data for land slid susceptibility, hazard, and vulnerability assessment an overviwe**. Engineering Geology 102, pp. 112 – 131.