

ارزیابی روش‌های تحلیل شبکه (ANP) و تحلیل چندمعیاره مکانی در بررسی پتانسیل وقوع زمین لغزش در محدوده محور و مخزن سدها (مطالعه موردی: سد قلعه چای)

شهرام روستائی - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز

لیلا خدائی قشلاق* - کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه تبریز

فاطمه خدائی قشلاق - دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز

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

چکیده

ارزیابی پتانسیل وقوع زمین لغزش در منطقه‌ای که به دلیل وضعیت جغرافیایی و ساخت‌وسازهای انسانی مستعد لغزش است ضروری است. سد مخزنی قلعه چای عجیشیر یکی از این نوع نواحی است. در این مطالعه، به منظور بررسی پتانسیل وقوع زمین لغزش روش‌های تحلیل شبکه (ANP) و چندمعیاره مکانی ارزیابی شد. در این مطالعه از تصویر TM، ۲۰۱۱ ماهواره لندست استفاده شد. فاکتورهای مؤثر بر وقوع زمین لغزش (شیب، جهت دامنه، لیتولوژی، کاربری زمین، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، طبقات ارتفاعی) در محیط GIS آماده و سپس با لایه پراکنش زمین لغزشها قطع داده شد و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در روش‌های فوق تولید شد. نتایج نشان داد که در بررسی پتانسیل وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه، فرایند تحلیل چندمعیاره 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 زمین لغزش دارد و با استفاده از نقشه پیش‌بینی احتمال وقوع زمین لغزش، منطقه به پنج گروه حساسیت بسیار پایین، پایین، متوسط، بالا و بسیار بالا تقسیم شد.

کلیدواژه‌ها: سد قلعه‌چای، تحلیل شبکه (ANP)، تحلیل چند معیاره مکانی، ماهواره لندست، زمین لغزش.

مقدمه

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

* 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 در صورت عدم توجه به‌طور کلی به این موضوع (که غالباً این‌گونه است) سد در محلی خطرناک ایجاد خواهد شد، که علاوه بر هزینه‌های سنگین بعدی برای نگهداری سد، در صورت ایجاد حرکت جدید در دامنه لغزنده، خطرهای جانی نیز منطقه پایین دست سد را تهدید خواهد کرد.

در این مطالعه، سد قلعه‌چای، واقع در حوضه آبریز قلعه‌چای به صورت موردی انتخاب شده است. به وجود زمین‌لغزش‌های قدیمی در منطقه، که می‌بایست در مرحله شناسایی و مطالعه اولیه سد مورد توجه قرار گیرد، اهمیت کافی داده نشده و در اثر آب‌گیری سد، باعث افزایش فشار آب منفذی بر پنجه 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، ادامه حرکات تکیه‌گاه چپ سد در میانه مخزن سد فاجعه‌بار خواهد بود (سرتیپی و انتظام‌سلطانی، ۱۳۹۱: ۱).

طی سال‌های متمادی، مطالعات زیادی در زمینه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در داخل و خارج از کشور صورت گرفته (سارولی^۱ ۲۰۰۱)، از جمله با استفاده از روش رگرسیون خطی^۱ 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 هنگ‌کنگ افزایش یافت و همبستگی شدیدی بین داده‌های بارندگی و نتایج زمین‌لغزش‌ها نشان داده شد. در نهایت، نقشه 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 تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش در جزیره سادو^۲ در ژاپن استفاده کردند و با مقایسه این دو روش برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به این نتیجه رسیدند که مدل AHP^۳ 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 حوزه 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 حوزه 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

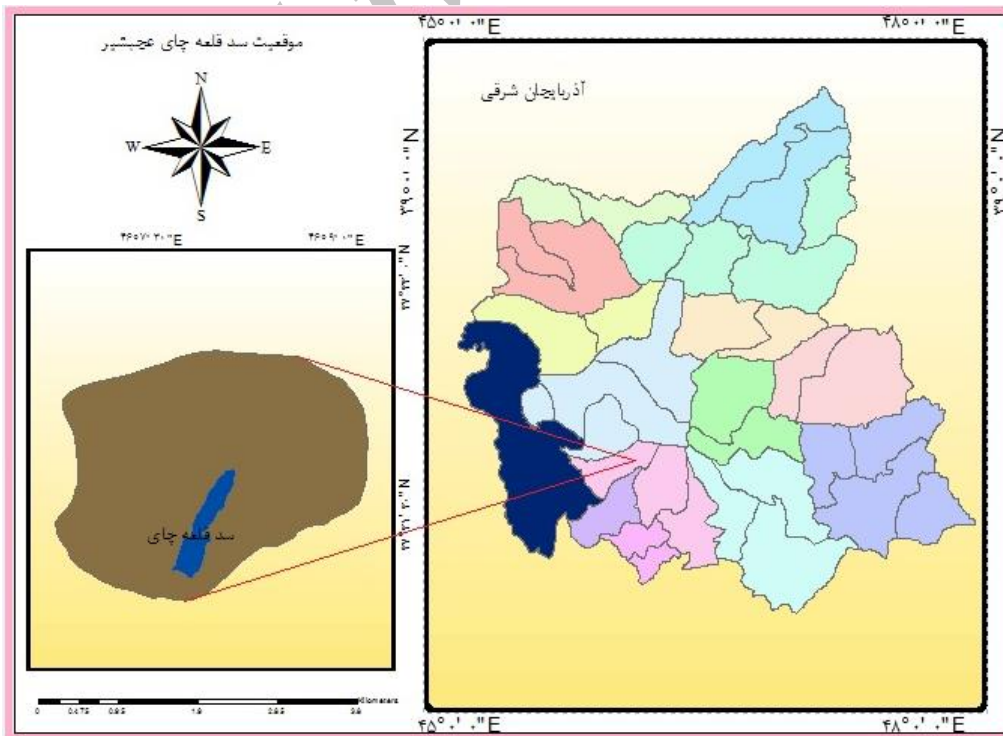
3. Analytical Hierarchy process

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

سرتیپی و انتظام‌سلطانی (۱۳۹۱) به بررسی زمین لغزش‌های ساختگاه سد قلعه‌چای عجبشیر، بر پایه 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 معیاره 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 محدوده محور و مخزن سد قلعه‌چای عجبشیر شناخته شود تا بدین وسیله از آثار زیان‌بار آن در عرصه‌های منابع طبیعی و سایر بخش‌های توسعه عمرانی و اقتصادی جلوگیری و نقاط با پتانسیل بالای خطر شناسایی و پهنه‌بندی شود.

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، محدوده محور و مخزن سد قلعه‌چای، بخشی از حوضه آبخیز قلعه‌چای از شبکه‌های زهکشی شعاعی ارتفاعات آذرین سه‌پند است که پس از زهکشی محیط پیرامون خود، به دریاچه ارومیه می‌ریزد. شاخه اصلی رودخانه قلعه‌چای به طول 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).

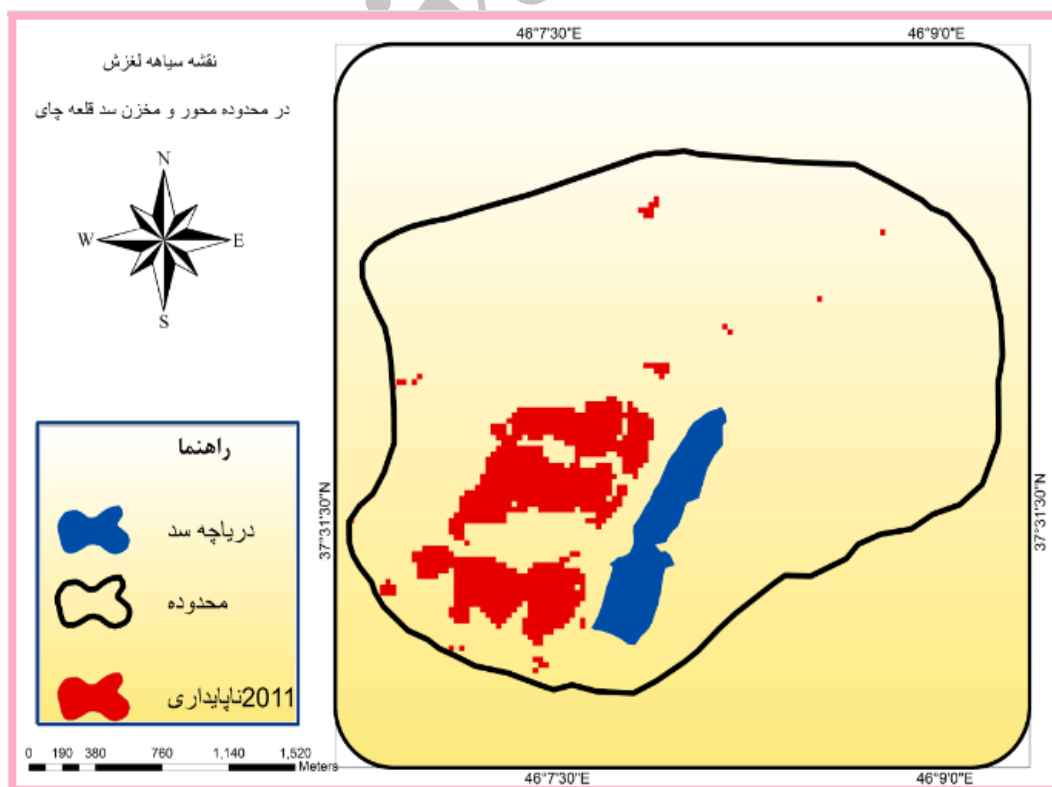


شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی قلعه‌چای روی شاخه اصلی رودخانه منطبق بر مختصات جغرافیایی $37^{\circ}31'06''$ عرض شمالی و $46^{\circ}07'37''$ طول شرقی در ۳۵ کیلومتری شمال خاوری شهرستان عجبشیر به مساحت $8/134$ کیلومترمربع و محیط $11024/48$ متر قرار گرفته است. این سد خاکی در سال ۱۳۸۰ شروع به اجرا و در سال ۱۳۸۸ آبگیری شد. روستای ینگچه در بالادست سد قرار گرفته است. محل سد در مسیر زهکشی رودخانه به نسبت بزرگی احداث شده که از تلاقی چندین رودخانه و به هم پیوستن آن‌ها تشکیل شده است.

پراکنش زمین لغزش‌ها

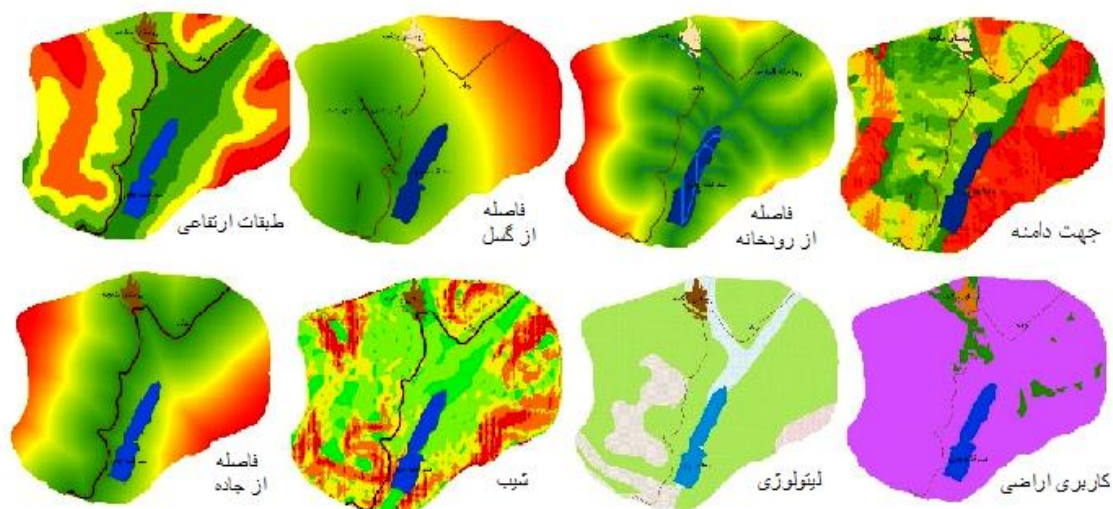
نقشه پراکنش زمین لغزش مجموعه‌ای از زمین لغزش‌های رخ داده در یک ناحیه مشخص است و سبب نوعی آگاهی و بصیرت در مورد مکان‌های وقوع زمین لغزش و کسب اطلاعات از نوع و خسارت‌های آن‌ها می‌شود (فون‌وسترن و همکاران، ۲۰۰۸). معمولاً زمین لغزش‌ها به صورت ناحیه‌ای یا اشکال نقطه‌ای ظاهر می‌شود. عکس هوایی و یا تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا نشان می‌دهند که زمین لغزش‌ها به صورت مناطق پهنه‌ای شکل می‌گیرند. در ناحیه مورد مطالعه نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها به صورت پهنه لغزشی بر اساس تصویر ماهواره لندست، سنجنده TM سال ۲۰۱۱، به شماره مسیر و ردیف گذر ۳۴ - ۱۶۸ تهیه شد. مساحت پیکسل‌های لغزشی منطقه حدود $0/79$ کیلومترمربع است که حدود $9/71$ درصد مساحت منطقه را به خود اختصاص می‌دهد. شکل ۲ پراکنش زمین لغزش‌های منطقه را نشان می‌دهد.



شکل ۲. پراکنش زمین لغزش‌ها

بررسی فاکتورهای مؤثر در زمین لغزش

به منظور بررسی پتانسیل وقوع زمین لغزش 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 زمین لغزش‌های منطقه تشخیص داده شد. لایه‌های مربوط به فاکتورها در محیط ArcGIS تهیه شد. شکل ۳ نقشه‌های عوامل (معیارها) مؤثر در وقوع زمین لغزش‌های منطقه را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نقشه‌های فاکتورهای مؤثر در وقوع زمین لغزش‌های منطقه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

الف) کاربرد تحلیل شبکه^۱ (ANP) 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 نحوه استخراج قضاوت‌ها و به کار 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 همه برهم‌کنش‌ها، برای پیش‌بینی دقیق و اتخاذ تصمیم مناسب استوار است (محمدی لرد، ۱۳۸۸: ۵۷).

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
- محاسبه وزن نهایی عناصر و گزینه‌ها.

به منظور اجرای روش تحلیل شبکه، تهیه لایه‌های مربوط به معیارها در نرم‌افزار ArcGIS انجام شد. سپس در محیط نرم‌افزار سوپر دسیژن^۱ مدل اصلی فرایند تحلیل شبکه بر اساس پرسشنامه‌های تکمیل‌شده کارشناسان متخصص در این زمینه طراحی شد. سپس، ارتباط بین خوشه‌ها، عناصر و گزینه‌ها با استفاده از روش دیماتل^۲ 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 به دست آمد. در آخر، با توجه به ضرایب حاصل، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه و نقشه حاصل در پنج کلاس خطر بسیار بالا تا بسیار پایین طبقه‌بندی شد.

ب) مدل تحلیل چند معیاره مکانی (اکتشافی)

به منظور 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 به منظور 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 چندمعیاره مکانی روشی نیمه کیفی 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^۳ و یا تحلیل سلسله مراتبی^۴ جهت تعیین وزن و ایجاد مدل استفاده می‌کند. بنابراین، امتیازدهی و تعیین وزن برای ایجاد مدل در رویکرد اکتشافی در نقشه تهیه‌شده از مدل اکتشافی بر اساس فرمول ریاضی (کابرال، ۲۰۱۱: ۵۰) زیر صورت می‌گیرد.

$$LSI_h = (W_1 * X_1) + (W_2 * X_2) + \dots + (W_n * X_n) \quad \text{رابطه ۱}$$

نقشه شاخص استعداد زمین‌لغزش از مدل اکتشافی LSI_h

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

وزن فاکتورهای مؤثر = $W_1 \dots W_n$

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

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 نقشه فاصله برای لایه‌های خطی نظیر رودخانه، جاده و گسل، سپس رستری نمودن تمام لایه‌های مورد نیاز بود. در ادامه، در محیط ارزیابی چند معیاره مکانی^۱ نرم‌افزار الویس^۲، مدل تحلیل چندمعیاره 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 مقایسه زوجی عناصر استفاده شد. سپس، براساس تلفیق اطلاعات به‌دست آمده نقشه 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 زمین لغزش‌ها

در این مطالعه به منظور ارزیابی موفقیت مدل‌ها از درجه تناسب استفاده شده است. درجه تناسب عملکرد مدل را به‌وسیله 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 لایه هدف، لایه معیارها و لایه گزینه‌ها با توجه به مسئله تحقیق طراحی و سازماندهی شد. طراحی شبکه مورد نظر از چندین مرحله تشکیل شد. مرحله 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 زمین لغزش به منزله هدف این مطالعه برای لایه نخست طراحی شد. مرحله 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 لایه دوم طراحی شد. کلاس‌ها یا گزینه‌های مورد نظر بر اساس طبقات خطر در خوشه‌ای جداگانه در لایه سوم قرار گرفتند. ایجاد ارتباط بین عناصر و خوشه‌ها در تحقیق حاضر بر اساس تکنیک دیماتل^۳ از طریق پرسشنامه صورت گرفت.

1. spatial multi criteria evaluation

2. Ilwis

3. decision making trial and evaluation

مقایسه زوجی بین خوشه‌ها و عناصر

در این مرحله معیارهای کنترلی و خوشه‌ها با هم مقایسه شدند. در مقایسه خوشه‌ها، یک خوشه خوشه اصلی انتخاب شد. سپس، ارجحیت سایر خوشه‌های مرتبط با آن نسبت به هم و در مقایسه با خوشه اصلی مقایسه شد (محمدی‌لرد، ۱۳۸۸: ۵۵). در حدود ۱۴۳ مورد مقایسه زوجی بین خوشه‌ها صورت گرفت. پس از انجام مقایسه، برای مشاهده نتایج مقایسه‌ها میزان نرخ ناسازگاری آن‌ها بررسی شد. نرخ ناسازگاری قضاوت انجام شده برای نمونه برابر با ۰/۰۸۶۷ و کمتر از ۰/۱ بود. در این روش میزان نرخ ناسازگاری نباید بیشتر از ۰/۱ باشد که این میزان از خطا با توجه به تعداد زیاد قضاوت‌ها قابل قبول است. همچنین، در داخل هر خوشه مجموعه‌ای از عناصر قرار دارند که با هم مقایسه شدند. مقایسه عناصر هر خوشه شبیه روش AHP و مقایسه دودویی ساعتی^۱ است. در حدود ۹۳ مورد مقایسه عناصر درون خوشه صورت گرفت. برای انجام مقایسه بین عناصر درون خوشه‌ها مثل روش مقایسه زوجی بین خوشه، نسبت به معیار کنترلی، هر معیار نسبت به معیار دیگر از نظر اهمیت و ارجحیت مقایسه شد. میزان نرخ ناسازگاری به دست آمده برای قضاوت انجام شده 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 محاسبه ضریب نهایی، سه نوع ابرماتریس محاسبه شد:

- ابرماتریس غیروزنی^۲
- ابرماتریس وزنی^۳
- ابرماتریس حدی^۴

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

Name	Graphic	Ideals	Normals	Raw
1 کلاس		1.000000	0.360978	0.026943
2 کلاس		0.846583	0.305598	0.022810
3 کلاس		0.428270	0.154596	0.011539
4 کلاس		0.267185	0.096448	0.007199
5 کلاس		0.228211	0.082379	0.006149

شکل ۴. میزان اهمیت کلاس‌ها

این سه نوع ماتریس در ارتباط با یکدیگر محاسبه و تجزیه و تحلیل شدند. در نهایت، نتیجه کلی به دست آمد. شکل ۴ نتایج اهمیت کلاس‌ها را بر اساس اولویت و اهمیت آن‌ها از نظر خطر وقوع زمین لغزش نشان می‌دهد. بر اساس نتایج

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 زمین لغزش با توجه به وزن ایده‌آل^۱ داراست. این کلاس در نقشه 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 نقشه پهنه‌بندی عنوان کلاس خطر بسیار پایین را به خود اختصاص داده است.

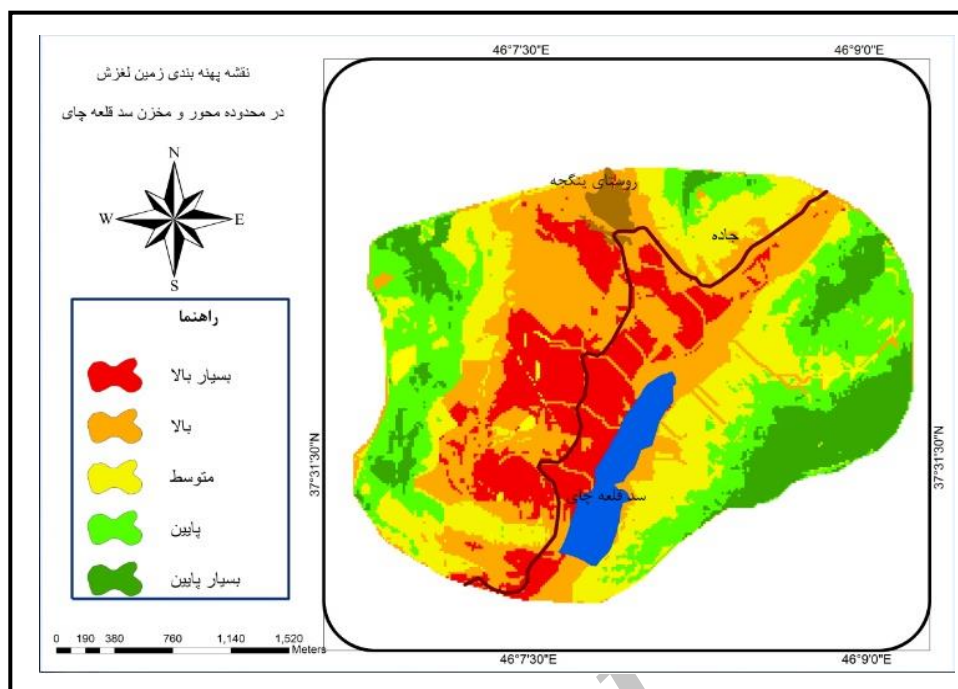
با توجه به ضرایب به‌دست آمده در جدول ۱ برای هر کدام از فاکتورهای مؤثر در وقوع زمین لغزش در مدل تحلیل شبکه‌ای، مشخص شد که بر اساس ضرایب محدود، عامل کاربری اراضی، جهت دامنه و طبقات ارتفاعی بیشترین اهمیت و تأثیر را دارند. پس از به‌دست آمدن ضرایب فاکتورهای مؤثر در وقوع زمین لغزش منطقه، نقشه پهنه‌بندی زمین لغزش 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 معادله ۲ ارائه شده است.

رابطه ۲

$$\text{ANP} = \text{Slope} \times 0.072623 + \text{Aspect} \times 0.098560 + \text{Dem} \times 0.085213 + \text{Landuse} \times 0.136675 + \text{Litology} \times 0.070464 + \text{Distance to river} \times 0.040709 + \text{Distance to Fault} \times 0.062942 + \text{Distance to Road} \times 0.063751$$

جدول ۱. ضرایب حاصل از فرایند تحلیل شبکه‌ای

علایم اختصاری برای معیارها	معیارها	ضرایب
X ₁	شیب	۰/۰۷۲۶۲۳
X ₂	جهت شیب	۰/۰۹۸۵۶۰
X ₃	طبقات ارتفاعی	۰/۰۸۵۲۱۳
X ₄	کاربری اراضی	۰/۱۳۶۶۷۵
X ₅	لیتولوژی	۰/۰۷۰۴۶۴
X ₆	فاصله از رودخانه	۰/۰۴۰۷۰۹
X ₇	فاصله از گسل	۰/۰۶۲۹۴۲
X ₈	فاصله از جاده	۰/۰۶۳۷۵۱



شکل ۵. نقشه پهنه بندی زمین لغزش به روش تحلیل شبکه در محور و مخزن سد قلعه چای

پس از انجام پهنه بندی زمین لغزش، درصد پهنه های لغزشی در هر کلاس محاسبه شد. نتیجه نشان داد که در محدوده مورد مطالعه، مناطقی که با خطر بسیار پایین و بسیار بالا پهنه بندی شدند کمترین درصد از میزان مساحت منطقه را به خود اختصاص دادند، در حالی که مناطق با خطر بالا بیشترین مساحت از منطقه مورد نظر را به خود اختصاص داد. جدول ۲ درصد پهنه های لغزشی در هر کلاس را در منطقه مورد نظر نشان می دهد.

جدول ۲. مساحت پهنه های 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

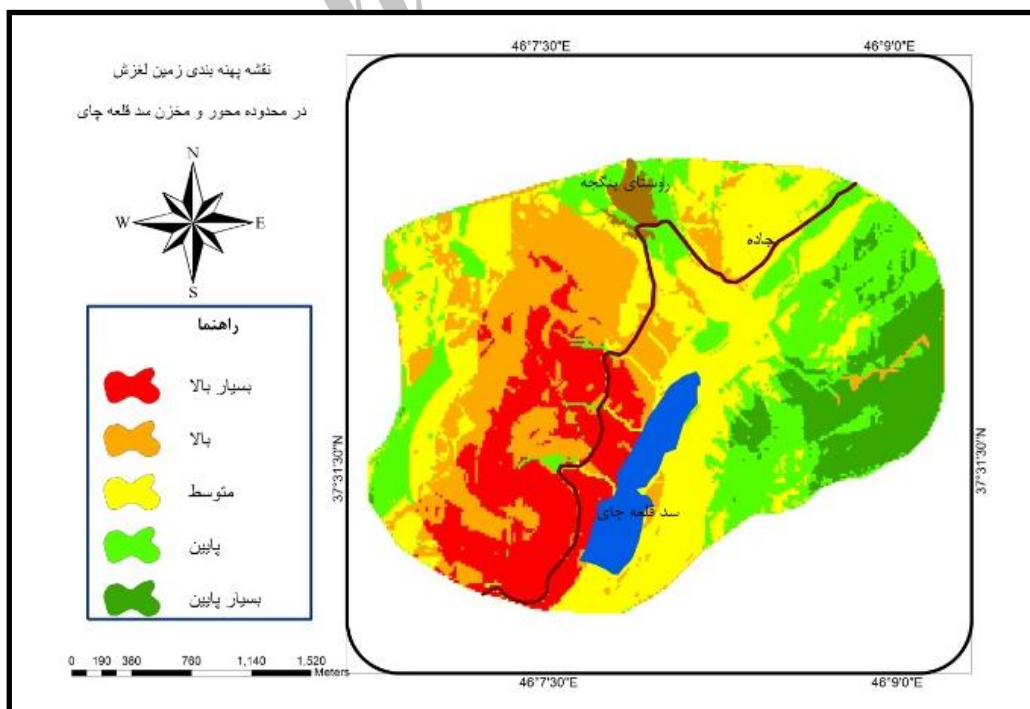
نتایج حاصل از روش اکتشافی نشان داد که با توجه به شکل ۴ میزان نرخ ناسازگاری برای ۲۸ مورد مقایسه زوجی انجام گرفته کمتر از ۰/۱ و برابر با ۰/۰۶۲۱۹۴ است که نشان دهنده صحت مقایسه های صورت گرفته است. همچنین، تفسیر ضرایب حاصل برای فاکتورها نیز با توجه به شکل مذکور نشان داد که جهت دامنه، فاصله از جاده، و لیتولوژی نسبت به سایر فاکتورهای مورد بررسی به ترتیب دارای بیشترین اهمیت در وقوع زمین لغزش های منطقه است. همچنین، نقشه پهنه بندی شده خطر زمین لغزش در محدوده محور و مخزن سد، در شکل ۵ نشان داده شده است. نقشه فوق در پنج

کلاس خطر بسیار بالا، بالا، متوسط، پایین، و بسیار پایین دسته‌بندی شد که با توجه به جدول ۱ مساحت هر یک از پهنه‌های لغزشی بر حسب درصد نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کمترین مقدار از مساحت منطقه را کلاس خطر بسیار پایین با ۹/۴۷ درصد به خود اختصاص داده است. این پهنه لغزشی در شمال شرق و شرق دریاچه سد 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 پهنه لغزشی خطر بسیار بالا در قسمت غرب و جنوب غربی سد با مساحت ۱۴/۶۳ درصد از منطقه مورد مطالعه را پوشش داده است. این منطقه محل عبور جاده و قرارگیری گسل‌های کوچک واقع شده در جنوب غربی سد است. به طور 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.

Resulting Normalized Weights	
Aspect	0.2519
Slope	0.0387
Landuse	0.1199
Litology	0.1747
Dem	0.0590
Distance to gosal	0.0715
Distance to river	0.1058
Distance to road	0.1786
Inconsistency ratio	0.062194

A value above 0.1 is an indication for inconsistencies in the pairwise comparison

شکل ۶. نتایج فرایند وزن‌دهی و میزان نرخ ناسازگاری



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در محور و مخزن سد قلعه‌چای به روش اکتشافی

جدول ۳. مساحت پهنه‌های لغزشی

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

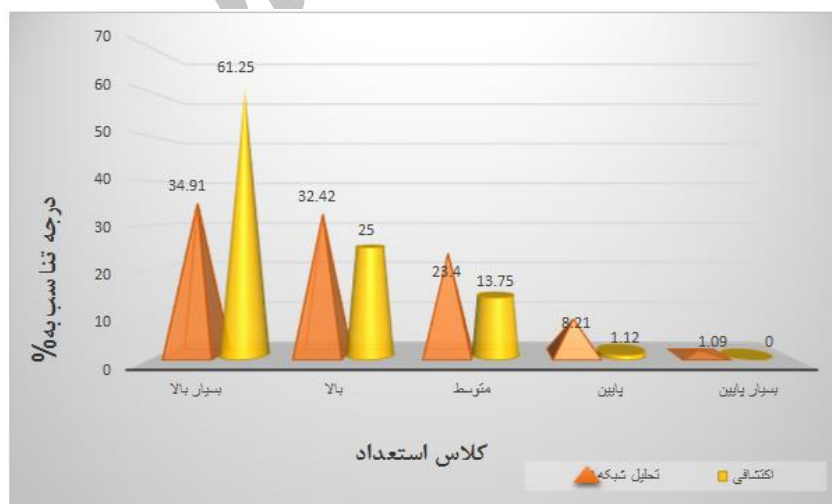
مدل آماری حاصل از اجرای روش اکتشافی برای تحقیق فوق با توجه به ضرایب حاصل و ترتیب فاکتورها از بالا به پایین در شکل ۶ به صورت معادله ۳ پیشنهاد می‌شود.

رابطه ۳

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

مقایسه روش‌ها

نتایج مدل‌ها از طریق قطع دادن نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها با نقشه‌های پهنه‌بندی به صورت درجه تناسب مدل‌ها با پراکنش زمین لغزش‌ها 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. مقایسه درجه تناسب بین نتایج تحلیل شبکه و اکتشافی با نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس مدل‌های مورد استفاده نتایج زیر حاصل شد. از میان هشت فاکتور مؤثر در وقوع زمین لغزش‌های منطقه عامل کاربری اراضی جهت دامنه بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش 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 درجه تناسب نقشه‌های پهنه‌بندی روش‌های بحث شده، شکل ۵ و ۷ با نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها 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 زمین لغزش در دو روش فرایند تحلیل شبکه و روش اکتشافی مشخص شد که دامنه‌های جنوب غربی سد قلعه‌چای نسبت به بقیه 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 بقیه عوامل بیشتر بوده است. با توجه به اینکه فرایند تحلیل شبکه برای اولین بار در بررسی پتانسیل وقوع زمین لغزش در ایران به کار گرفته شد، لذا مطالعات موردی در این زمینه به منظور مقایسه 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 مقایسه 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 نقشه پراکنش زمین لغزش‌های 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 معیاره مکانی یا اکتشافی در شناسایی مناطق خطر و پهنه‌بندی آن در منطقه مورد مطالعه نسبت به روش تحلیل شبکه از عملکرد مناسبی برخوردار است. بنابراین، از دو مدل آماری به دست آمده از دو روش به کار رفته در این تحقیق مدل آماری حاصل از اجرای روش تحلیل چند معیاره مکانی (معادله ۲) بهترین مدل انتخاب و معرفی شد. همچنین، با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه 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 زمین لغزش است.

منابع

- احمدزاده، ح. (۱۳۸۴). مدل‌سازی فرسایش و رسوب حوضه آبریز قلعه‌چای عجب‌شیر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در محیط GIS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: روستائی، شهرام، رشته سنجش از دور و GIS، دانشگاه تبریز، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی.
- خدائی قشلاق، ل. (۱۳۹۲). ارزیابی روش‌های رگرسیون لجستیک و تحلیل شبکه در بررسی پتانسیل وقوع زمین لغزش در محدوده محور و مخزن سد. مطالعه موردی: سد قلعه‌چای عجب‌شیر. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: روستائی، شهرام، رشته سنجش از دور و GIS، دانشگاه تبریز، دانشکده جغرافیا.
- روستائی، ش. (۱۳۸۳). بررسی وقوع زمین لغزش در روستای نصیرآباد ورزقان (استان آذربایجان شرقی) با استفاده از روش‌های کمی. فصلنامه علوم انسانی، دوره ۸، شماره ۱.

سرتیپی، ع.؛ انتظام سلطانی، ا. (۱۳۹۱). بررسی زمین‌لغزش‌های ساختگاه سد قلعه‌چای عجیشیر. سی‌امین گردهمایی علوم زمین، بهمن، 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), **The application of GIS-based logistic regression for landslide 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**, Universidade Nova 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.