

کاربرد منطق فازی در پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز نازلوچای

شهرام روستائی - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز.
اسداله حجازی - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز.
معصومه رجبی - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز.
نادر جلالی - استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور
احمد نجفی ایگدیر* - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۱۴ تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۰۳/۰۱

چکیده

زمین لغزش فرایندی است دامنه‌ای که تأثیر مخربی بر محیط زیست و زندگی انسانی داشته و نیازمند بررسی و اقدامات پیشگیرانه می‌باشد. شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش و پهنه بندی خطر آن جهت انجام اقدامات کنترلی از اهداف تحقیق حاضر می‌باشد. بنابراین برای مدیریت خطر در حوضه نازلوچای در شمالغرب ایران، کارایی روش منطق فازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. لذا از طریق بازدیدهای میدانی و استفاده از اطلاعات محلی و همچنین اداره آبخیزداری، عکسهای هوایی، تصاویر ماهواره ای Google Earth، نقشه پراکنش زمین لغزشها تهیه گردید. در ادامه عوامل مؤثر در زمین لغزش شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، بارش، پوشش گیاهی، زمین شناسی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه و فاصله از جاده با استفاده از نقشه توپوگرافی، عکس هوایی و تصاویر ماهواره ای تهیه و وارد مدل گردیدند. بعد از مرحله فازی سازی، نقشه‌های پهنه‌بندی زمین لغزش با استفاده از عملگرهای جمع، ضرب و گامای فازی با مقادیر ۰,۷، ۰,۸، ۰,۹ و ۱، تهیه شد. نتایج حاصل از معادله Qs (شاخص جمع کیفیت برای مقایسه کارایی مدلها) نشان می‌دهد که عملگر گامای ۰,۷ در مقایسه با دیگر عملگرهای فازی مناسبتر است ولی با توجه به انطباق توده‌های لغزشی با نقشه‌های گامای ۰,۸ و ۰,۹ می‌توان از نتایج آنها برای برنامه‌ریزیهای توسعه‌ای استفاده کرد. بیشتر عوامل نقش مهمی در ایجاد حساسیت به لغزش داشته و نقشه‌های خروجی با ۵ کلاس (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد)، ۵,۴ درصد حوضه را (با گامای ۰,۷) در کلاس با حساسیت بالا و خیلی بالا و ۶۲,۵ درصد آن را در کلاس با حساسیت خیلی کم قرار داد. رطوبت زیاد دامنه‌های غربی، حساسیت بالای سازندهای زمین شناسی و تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی از عوامل مهم ایجاد زمین لغزش در این قسمت از حوضه می‌باشند.

واژگان کلیدی: سامانه اطلاعات جغرافیایی، منطق فازی، پهنه‌بندی زمین لغزش، نازلوچای.

مقدمه

زمین لغزشها از مهمترین تهدیدهای طبیعی در مناطق کوهستانی و شیبدار میباشند که تحت تاثیر عوامل مختلف طبیعی و انسانی بوقوع میپیوندند. عوامل محرک ناپایداری، خاک و سنگ را با کمک نیروی ثقل به پایین هدایت کرده، زمین لغزشها را موجب میشوند. بنابراین شناخت مهمترین عوامل تاثیرگذار در ناپایداری دامنه و وقوع لغزش با استفاده از روشهای مناسب ما را در انجام برنامه‌های عمرانی و توسعه‌ای یاری خواهد کرد. لذا با بکارگیری مدل فازی ضمن ارزیابی و اعتبارسنجی آن، مناطق حساس به لغزش حوضه شناسایی و پهنه‌بندی صورت گیرد. زمین‌لغزش‌ها با تهدید زیربناهای یک منطقه از قبیل پلها، جاده‌ها و راههای ارتباطی در تکامل ژئومورفیکی محیط طبیعی نقش قابل‌توجهی داشته و موجب خسارتهای جانی و مالی فراوانی می‌گردند. میزان و کیفیت داده‌های موجود، مقیاس کار و انتخاب روش مناسب تجزیه و تحلیل و مدلسازی، اعتبار نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش را تضمین میکند. فرآیندی که منجر به تهیه چنین نقشه‌هایی میشود شامل چندین رویکرد کیفی و کمی است (آیالو و یاماگیشی^۱، ۲۰۰۵). قضاوت اشخاص (کارشناس) معیار رویکردهای کیفی است که ارزیابی خطر یا حساسیت را انجام میدهند (آلتوتی و چادوری^۲، ۱۹۹۹). روشهای کیفی را می‌توان به دو نوع تقسیم نمود: تحلیل پراکندگی یا سیاهه لغزش^۳ و اکتشافی^۴. درست‌ترین روش تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش تهیه سیاهه لغزش میباشد که بر پایه تفسیر عکس هوایی، بررسیهای میدانی و یا براساس داده‌های تاریخی لغزشهای وقوع یافته در منطقه میباشد. نتیجه نهایی، توزیع مکانی حرکات توده‌ای را بصورت نقطه‌ای و یا پلیگونی ارائه می‌دهد (ویک زورک^۵، ۱۹۸۴). نقشه‌های سیاهه حرکات توده‌ای، پایه بیشتر روش‌ها برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش می‌باشند (ون وستن و سوترز^۶، ۱۹۹۸). نظر کارشناس ژئومورفولوژی برای طبقه‌بندی خطر در روش اکتشافی مورد استفاده قرار میگیرد (آلتوتی و چادوری^۷، ۱۹۹۹). روشهای کمی (به نقل از روستایی و همکاران)، مبتنی بر بیان عددی رابطه بین عوامل کنترل‌کننده و زمین‌لغزش‌ها هستند (آیالو و یاماگیشی^۱، ۲۰۰۵) و به دو رویکرد قابل تقسیم می‌باشند: تحلیل‌های آماری و جبری. در تجزیه و تحلیل آماری خطر زمین‌لغزش، ترکیبات عواملی که در گذشته منجر به زمین‌لغزش شده‌اند، از نظر آماری تعیین می‌شوند و پیش‌بینی‌های کمی برای نواحی بدون زمین‌لغزش با شرایط مشابه صورت می‌گیرد، که ممکن است به صورت دومتغیره یا چندمتغیره باشند (گوپتا و جوشی، ۱۹۹۰، و آدهیکاری، ۲۰۱۱). برای فائق آمدن بر محدودیت‌هایی (تعداد، کیفیت و اعتبار داده‌ها) که این رویکردها دارند از روشهای جدیدی مثل منطق فازی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و غیره جهت تهیه حساسیت زمین‌لغزش در مقیاس منطقه‌ای ممکن است استفاده گردد (کانونگو و همکاران^۸، ۲۰۰۹). تحقیقات متعددی از کاربرد مدل‌های منطق فازی در ارتباط با پدیده زمین‌لغزش در کشور و جهان انجام شده است. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، سطح زمین را به نواحی ویژه و مجزایی از درجات بالفعل و یا بالقوه خطر از هیچ تا بسیار زیاد تقسیم می‌کند. این فرآیند که بر مبنای شناخت ویژگیهای طبیعی و مدلسازی کمی بر پایه داده‌های ناحیه مورد مطالعه صورت می‌گیرد، می‌تواند مبنایی برای اقدامات بعدی و برنامه‌ریزیهای آتی توسعه و عمران در مقیاس منطقه‌ای، ناحیه‌ای، و محلی محسوب گردد (رامشت،

^۱- Ayalew & Yamagishi, 2005

^۲- Aleotti & Chowdhury, 1999

^۳- landslide inventory

^۴- heuristic approach

^۵- Wieczorek, 1984

^۶- Van Westen & Soeters, 1998

^۷- Aleotti & Chowdhury, 1999

^۸- Ayalew & Yamagishi, 2005

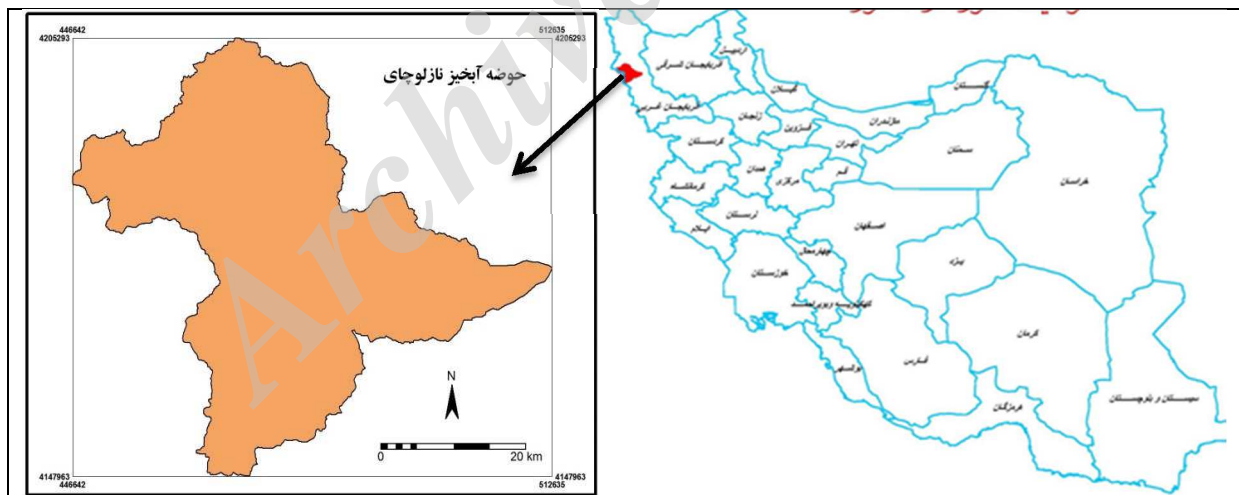
^۹- Gupta & Joshi, 2005, Adhikari, 2011

^{۱۰}- Kanungo et al., 2009

۱۳۷۵، ۴۵) که اهداف تحقیق حاضر را میسر می‌سازد. عبادی نژاد، سید علی و همکاران، (۱۳۸۶) در حوضه آبخیز شیروود با استفاده از عملگرهای فازی با تلفیق نقشه های مختلف وزنی در قالب عملگرهای فازی توان منطقه را مورد ارزیابی قرار دادند که در نهایت عملگر گامای ۰,۸ بعنوان مناسبترین شناخته شد. فاطمی عقدا و همکاران (۱۳۸۴) در منطقه رودبار با استفاده از منطق فازی نقشه‌های مختلف لغزشی را استخراج کردند که نتایج حاصله بیانگر وقوع $۶۸/۳۰$ درصد از زمین لغزشها در سطحی برابر با $۴۴/۷۹$ درصد در منطقه هستند. در منطق فازی، درست و غلط بودن موضوع با درجات مختلف مطرح (توابع عضویت) است (طاهری، ۱۳۷۵). توابع عضویت منطق فازی دارای دامنه ای بین ۰ تا ۱ می‌باشد که صفر عدم عضویت کامل و ۱ عضویت کامل است (جووانگ و همکاران، ۱۹۹۲). بدین جهت در این تحقیق سعی شده است بر اساس عوامل مؤثر در ایجاد زمین لغزش، حوضه مورد مطالعه با استفاده از منطق فازی از نظر استعداد رخداد زمین لغزش ناحیه بندی شود.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بین $۲۴^{\circ} ۲۴'$ تا $۴۵^{\circ} ۵۳''$ طول شرقی و $۳۰^{\circ} ۳۰'$ تا $۳۷^{\circ} ۵۸'$ عرض شمالی در شمال غرب کشور و محدوده سیاسی استان آذربایجان غربی واقع شده است. وسعت حوضه آبریز $۱۵۱۸/۸$ کیلومتر مربع می باشد. محیط حوضه نازلو چای ۲۶۰.۶۵ کیلومتر، حداقل ارتفاع حوضه ۱۲۹۱ متر و حداکثر ارتفاع آن ۳۶۰۰ متر می باشد. درجه حرارت متوسط سالیانه حوضه نازلوچای از $۱/۹-$ درجه سانتیگراد در ارتفاع ۲۷۷۰ متر تا $۱۱/۹$ در ارتفاع ۱۲۰۷ متر متغیر است. نوع اقلیم حوضه بر اساس روش دومارتن از نیمه مرطوب تا مرطوب و در روش کوپن از استپی تا مرطوب و در روش آمبرژه از نیمه خشک سرد تا نیمه مرطوب سرد می باشد (مهندسین مشاور امداد آب چهار محال، ۱۳۸۵).



شکل ۱: موقعیت حوضه آبخیز نازلوچای در استان آذربایجان غربی

مواد و روش‌ها:

مواد تحقیق

برای انجام تحقیق و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، تهیه نقشه پراکندگی زمین‌لغزش یا سیاهه لغزش مهمترین بخش کار بوده که انجام آن با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی با دقت بالایی میسر می‌باشد. دقت و صحت پهنه‌بندی زمین‌لغزش تا حدود زیادی وابسته به این مرحله است. بنابراین، در ابتدا با استفاده از ابزارهای مختلف شامل عکس‌های هوایی مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ (از وضوح و کیفیت بالایی نسبت به عکس‌های هوایی مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ برخوردار هستند)، تصاویر ماهواره ای (Google Earth) سال ۲۰۱۳، اطلاعات موجود، GPS و بویژه بررسی‌های میدانی، زمین‌لغزش‌های موجود شناسایی و مشخص شدند (شکل ۲). در تحقیق حاضر، ده عامل موثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه، مورد بررسی قرار گرفتند که عبارتند از: ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، بارش و پوشش گیاهی. در راستای هدف تحقیق، داده‌های مورد نیاز از روی نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای ETM+ و Google Earth (GeoEye) با قدرت تفکیک تقریباً کمتر از ۱ متر، مطالعات میدانی و نیز منابع کتابخانه‌ای حاصل شد. جهت رقومی سازی و تهیه لایه‌های اطلاعاتی بمنظور انجام پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش از نرم‌افزارهای Arc GIS، ENVI، استفاده گردید. جهت شناسایی مناطق حساس به لغزش، پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش منطق فازی صورت گرفت.

روش تحقیق

در تحقیق حاضر، برای بررسی و پهنه‌بندی زمین‌لغزش از تئوری فازی که بوسیله زاده [لطفعلی عسکرزاده] (۱۹۶۵) معرفی شده استفاده شده است. در تئوری مجموعه فازی مقادیر عضویت عوامل مختلف در دامنه بین ۰ تا ۱ تغییر می‌کند، در صورتی که تا قبل از آن عضویت مجموعه بصورت بود (۱) یا نبود (۰) بوده است. به نقل از روستایی، شهرام و همکاران (۲۰۱۵)، در کانون تئوری مجموعه فازی، مفهوم عضویت فازی قرار دارد (اوپنشاو و آبراهارت^۱، ۲۰۰۰) که میزان عضویت را در رابطه با برخی از صفات خاص بیان می‌کند (رگمی و همکاران^۲، ۲۰۱۰). در تئوری مجموعه‌های فازی عضویت بصورت درجه‌بندی شده بوده، بدینصورت که یک عنصر نه کاملاً بلکه تا درجاتی می‌تواند عضو یک مجموعه باشد (کوسکو^۳، ۱۹۹۲). از عملگرهای مختلفی میتوان در ترکیب مقادیر عضویت استفاده کرد. بونهام^۴ - کارتر^۴ (۱۹۹۴) پنج عملگر مختلف شامل «یا» فازی، «و» فازی، ضرب جبری فازی، جمع جبری فازی و گامای فازی را مورد بحث قرار داده است. رگمی و همکاران (۲۰۱۰)، مقادیر عضویت برای یک عامل اثرگذار زمین لغزش را براساس روش داده رهنمون^۵ (رابطه زمین لغزش های گذشته با عوامل تاثیرگذار زمین لغزش ها) یا براساس قضاوت کارشناسی (استفاده از قوانین اگر - آنگاه) تعیین کردند. روش های مختلفی (روشهای داده رهنمون) برای تعیین مقادیر عضویت فازی ارائه شده‌اند (روش های نسبت فراوانی و دامنه کسینوسی^۶)، که در تحقیق حاضر از روش نسبت فراوانی برای تعیین مقادیر عضویت فازی استفاده شده است. مدل نسبت فراوانی بدلیل فازی سازی مناسب هر معیار برای پهنه‌بندی مناسب می‌باشد (صفاری، ۱۳۹۲). روش نسبت فراوانی، از نسبت درصد زمین لغزش ها در هر طبقه به درصد هر طبقه در منطقه حاصل می‌شود (رگمی و همکاران، ۲۰۱۰ و چوی و همکاران^۷، ۲۰۱۰). برای تعیین مقادیر عضویت فازی از فرایند نرمالیزه کردن استفاده می‌شود. چون مقادیر عضویت فازی

^۱- Openshaw & Abrahart, 2000

^۲- Regmi et al., 2010

^۳- Kosko, 1992

^۴- Bonham-Carter

^۵- data-driven

^۶- cosine amplitude

^۷- Choi et al., 2010

در دامنه بین ۰ تا ۱ می‌باشند از طریق نرمالیزه کردن ماکزیمم-مینیمم طبق رابطه زیر نسبت فراوانی به مقادیر عضویت فازی تبدیل می‌شود (بوی و همکاران^۱، ۲۰۱۲):

$$\mu(C_{ij}) = \frac{FR_{ij} - \text{Min}(FR_{ij})}{\text{Max}(FR_{ij}) - \text{Min}(FR_{ij})} [\text{Max}(\mu(C_{ij})) - \text{Min}(\mu(C_{ij}))] + \text{Min}(\mu(C_{ij})) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن: $\mu(C_{ij})$ مقدار عضویت فازی؛ FR_{ij} نسبت فراوانی؛ $\text{Max}(\mu(C_{ij}))$ و $\text{Min}(\mu(C_{ij}))$ حدود بالایی و پایینی نرمالسازی میباشند.

پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش پس از تعیین مقادیر عضویت فازی برای هر یک از کلاس‌های لایه‌های موضوعی با استفاده از عملگرهای مختلف فازی (عملگر «یا» فازی، «و» فازی، ضرب جبری فازی، جمع جبری فازی و فازی گاما) انجام گردید.

- در عملگر ضرب جبری فازی، تابع عضویت فازی به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

رابطه (۲)

$$\mu_{\text{combination}} = \prod_{i=1}^n \mu_i$$

در رابطه بالا μ_i تابع عضویت فازی برای نقشه i ام، و $i=1, 2, \dots, n$ برای نقشه‌هایی هستند که باید ترکیب شوند در این عملگر امتیاز نهایی ($\mu_{\text{combination}}$) (به علت ضرب مقادیر کوچکتر از ۱) تمایل به سمت مقادیر بسیار کوچک دارد. بنابراین خروجی همیشه کوچکتر یا مساوی کوچکترین مقدار عضویت مشترک بوده، در نتیجه ماهیت مدل کاهش‌ی است. جمع جبری فازی، متمم ضرب جبری فازی بوده که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

رابطه (۳)

$$\mu_{\text{combination}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$$

در این عملگر نتیجه همیشه بزرگتر یا مساوی بزرگترین مقدار عضویت فازی خواهد بود، بنابراین اثر افزایشی خواهد داشت. انجام پهنه‌بندی با عملگرهای جمع جبری و «یا» فازی، تقریباً بیشتر حوضه حساسیت بسیار بالایی نسبت به وقوع زمین لغزش نشان داد که این مسئله می‌تواند ناشی از حساسیت بالای این عملگرها باشد.

- در عملگرهای گاما ترکیب داده‌ها به صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود که در آن γ پارامتر انتخابی در محدوده (۰ و ۱) است (زیمرمان و زیسنو ۱۹۸۰). به نقل از (بونهام - کارتر^۲، ۱۹۹۴) ساختار مدلها یا عملگرهای منطقی گاما، بر اساس

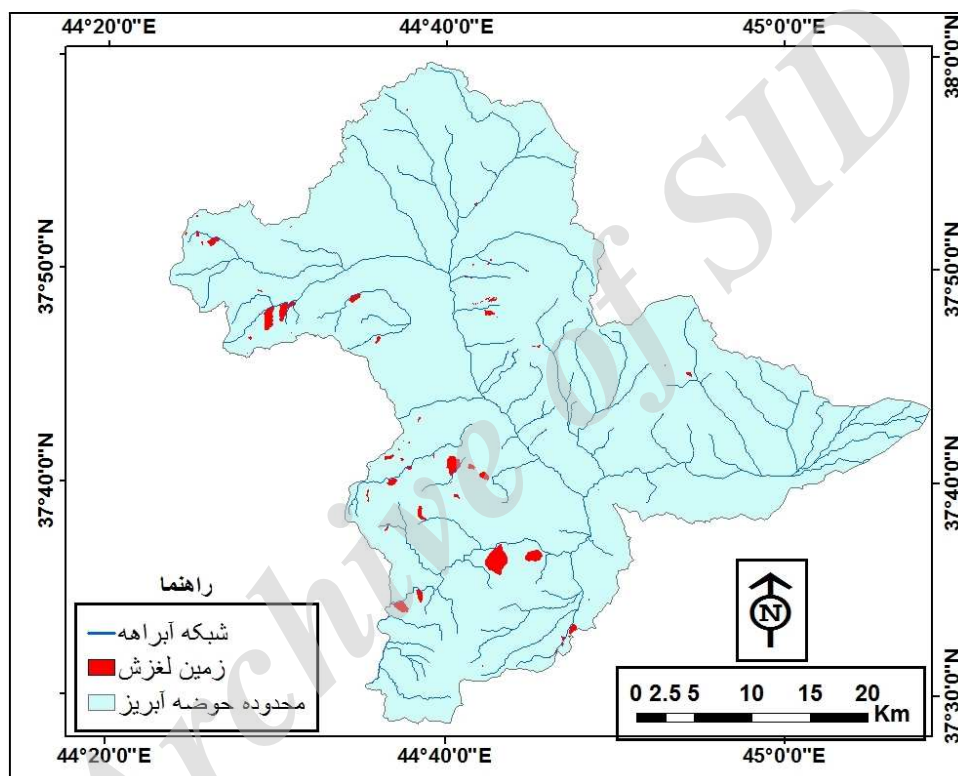
^۱- Bui et al., 2012

^۲- G. F. Bonham-carter, 1994

ساختار عملگرهای حاصل ضرب و حاصل جمع جبری فازی است (آن و همکاران^۱، ۱۹۹۱). در این عملگر وقتی γ برابر ۱ باشد ترکیب همان جمع جبری فازی و اگر $\gamma = 0$ باشد ترکیب برابر با ضرب جبری فازی می‌باشد (لی^۲، ۲۰۰۷).
رابطه (۴)

$$\mu_{\text{combination}} = (\text{Fuzzy algebraic sum})^{\lambda} * (\text{Fuzzy algebraic product})^{1-\lambda}$$

بنابراین پهنه‌بندی با عملگرهای جمع جبری، ضرب جبری فازی، «یا» و «و» فازی و گاما با مقادیر $0/7$ ، $0/8$ ، $0/9$ صورت گرفت.



شکل ۲- نقشه پراکندگی زمین لغزش‌های حوضه نازلوچای

یافته‌های تحقیق:

عوامل موثر بر وقوع زمین لغزش

برای پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل منطق فازی، عوامل مختلف به شرح ذیل مورد بررسی قرار گرفت:

- تصویر مدل ارتفاع رقومی (DEM) منطقه با قدرت تفکیک ۱۰ متر از روی نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ با فواصل منحنی‌های میزان ۱۰ متر تهیه گردید. حداقل ارتفاع منطقه ۱۲۹۰/۸۶ متر، حداکثر ارتفاع آن ۳۶۰۴/۶۱ متر و

^۱- An et al, 1991

^۲- Lee, 2007

متوسط ارتفاع آن ۱۹۸۶ متر از سطح دریا می باشد. منطقه از نظر ارتفاعی، به ۱۰ طبقه با فاصله طبقات ۲۵۰ متر تقسیم شد (شکل ۳). تقریباً ۷۶ درصد توده های لغزشی در محدوده ارتفاعی ۱۷۵۰ تا ۲۵۰۰ متری و ۴۰ درصد لغزشها فقط در محدوده ارتفاعی ۱۷۵۰ تا ۲۰۰۰ متری رخ داده اند.

- شیب: لایه شیب منطقه از روی تصویر مدل ارتفاع رقومی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۰ متر تهیه گردید و به ۷ طبقه با فاصله طبقات مختلف بر اساس وضعیت شیب منطقه تقسیم شد (شکل ۴). متوسط شیب منطقه ۲۶/۷۵ درصد می باشد. بیش از ۲۷ درصد توده های لغزشی حوضه در کلاس شیب ۴۵-۳۰ درصد و نزدیک به ۵۱ درصد رخداد لغزش در کلاس ۴۵-۲۰ درصد واقع شده اند. با اندکی اغماض می توان گفت که دو کلاس شیب به نوعی با طبقات ارتفاعی ۱۷۵۰ تا ۲۵۰۰ متری که بیشترین مقدار توده های لغزشی را به خود اختصاص داده اند انطباق دارند.

- جهت شیب: لایه جهت شیب منطقه از روی تصویر مدل ارتفاع رقومی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۰ متر تهیه گردید و به ۹ طبقه شامل جهت های اصلی، فرعی و بدون جهت تقسیم گردید (شکل ۵). بررسی لغزشهای صورت گرفته در منطقه نشان میدهد که نزدیک به ۷۷٪ اتفاقات در دامنه های متمایل به شمال رخ داده است که نشان از تأثیر رطوبت فراوان می باشد. وجود رطوبت نیز تابعی است از ماندگاری بلند مدت برف در دامنه های شمالی که همین امر موجب گسیختگی ذرات خاک و وقوع لغزش میشود. از طریق نفوذ، آب داخل خاک تأمین شده و با کاهش چسبندگی، مقاومت رسوب کاهش می یابد (کچ، ۱۹۹۵). بنابر این حضور آب و بدنبال آن نفوذپذیری به عنوان عاملی در وقوع زمین لغزش در شیبهای شمالی میتواند مورد توجه قرار گیرد.

- در تهیه نقشه کاربری اراضی از تصویر ماهواره لندست و روش طبقه بندی نظارت شده استفاده شد. برای اطمینان از دقت نقشه تهیه شده، از نقشه هایی که توسط اداره منابع طبیعی تهیه شده بود استفاده گردید و جهت افزایش دقت با کنترلهای زمینی و همچنین تصویر ماهواره ای Google Earth که از قدرت تفکیک بالایی برخوردار است اصلاح شد و لایه نهایی تهیه گردید. کاربریهای عمده حوضه، بیشتر مرتع و اراضی کشاورزی دیم می باشند که مجموعاً حدود ۶۸/۸ درصد از مساحت حوضه را شامل میشود که اکثر لغزشها بر روی این واحدها رخ داده اند (شکل ۶). استفاده بی رویه از مراتع و تبدیل آن به اراضی دیم شرایط طبیعی خاک سطحی را از بین برده و مقدمات تخریب آن را به اشکال مختلف مهیا کرده است.

- گسلهای حوضه مورد مطالعه از روی نقشه های زمین شناسی استخراج شد. سپس حوضه بر حسب فاصله از گسلها به شش طبقه تقسیم گردید (شکل ۷). برخی از زمین لغزشها در مجاورت گسلها بوده که نزدیک به ۳۰ درصد آنها در فاصله صفر تا ۴۰۰ متری از گسلها واقع شده که با بیشتر شدن فاصله از گسل، از مقدار لغزشها کاسته می شود.

اما گسلها تا چه حدی در وقوع زمین لغزشها موثر هستند نمیتوان نظری داد. مناطق با فعالیتهای گسلی امکان شکست و تخریب سنگها را نیز افزایش داده که عاملی است برای نفوذ بیشتر آب که با اشباع آب ذرات و دانه های خاک از هم جدا شده و گسستگی رخ می دهد. در نهایت سطوح توده های لغزشی نسبت به فاصله از گسلها محاسبه شده و در پهنه بندی منظور گردیدند.

- آبراهه های حوضه با استفاده از تصویر مدل ارتفاع رقومی (DEM) تهیه گردید. برخی از زمین لغزشها در مجاورت آبراهه ها و در نتیجه پدیده زیرشویی توسط جریانات موجود رخ داده اند. برای دخالت دادن تأثیر فاصله از آبراهه در وقوع زمین لغزش، حریمهایی به فواصل ۱۰۰ متر نسبت به آبراهه ها ترسیم گردید (شکل ۸). در حدود ۵۰ درصد توده های لغزشی در فاصله صفر تا ۵۰۰ متری آبراهه ها واقع شده اند و با بیشتر شدن فاصله از آبراهه، از مقدار لغزشها کاسته می شود.

فاصله از جاده: احداث جاده تاثیر مخربی بر سطوح حوضه داشته و در صورت عدم رعایت موارد احتیاطی شرایط را برای وقوع ناپایداری دامنه‌ای مخصوصا زمین لغزش مهیا خواهد کرد (شکل ۹). در حوضه مورد مطالعه حدود ۳۶ درصد لغزشها در محدوده ۰ تا ۵۰۰ متری و بیش از ۶۳ درصد در محدوده ۰ تا ۱۰۰۰ متری از خطوط جاده‌ای رخ داده‌اند که در این بین با نزدیک شدن به جاده بر مقدار لغزشها افزوده و بر عکس با بیشتر شدن فاصله از مقدار لغزشها کاسته می‌شود.

بارش: نقشه بارش حوضه نازلوچای با استفاده از مطالعات حصارى و همکاران، ۱۳۸۴ و بر اساس بارش ۳۰ ساله تهیه گردیده است. در مطالعه فوق دلیل عدم تطابق داده های بارش و رواناب، مقدار بارش مناطق مرتفع حوضه از مقدار رواناب حوضه تخمین و با استفاده از بیلان آب سطحی و بصورت سلولی تهیه گردیده است. در نقشه اصلاحی بارش، بیشترین مقدار بارش حدود ۸۸۰ میلیمتر در محدوده مرزی (مرز کشور ترکیه) و کمترین مقدار حدود ۲۶۰ میلیمتر در قسمت‌های کم ارتفاع در پایین دست حوضه بدست آمد (شکل ۱۰). حدود ۵۸ درصد لغزشهای حوضه در کلاس ۳۰۰ تا ۴۰۰ میلیمتری و ۸۱ درصد در کلاس ۳۰۰-۶۰۰ میلیمتری بارش بوقوع پیوسته‌اند. از کلاس ۶۰۰ میلیمتری به بالا از مقدار لغزشها کاسته شده است.

شاخص پوشش گیاهی: نقشه پوشش گیاهی برای تکمیل کاربری اراضی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر، از شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده^۱ (NDVI)، برای تهیه نقشه پوشش گیاهی استفاده گردید. بدین منظور از تصاویر ETM+ ماهواره لندست (مربوط به سال ۲۰۱۵) استفاده شد (شکل ۱۱). مقدار این شاخص بین -۱ تا +۱ می‌باشد. هرچه مقدار آن به +۱ نزدیکتر باشد نشان‌دهنده سرسبزی منطقه و بالا بودن پوشش گیاهی است (روستایی و همکاران، ۱۳۹۳). نسبت Band 4/ Band 3 برای شناخت وضعیت و تراکم تاج پوشش گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد (سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۸۵: ۲۶). به نقل از روستایی و همکاران، شاخص NDVI از رابطه زیر بدست می‌آید (علوی‌پناه، ۱۳۸۹: ۱۷۳):

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

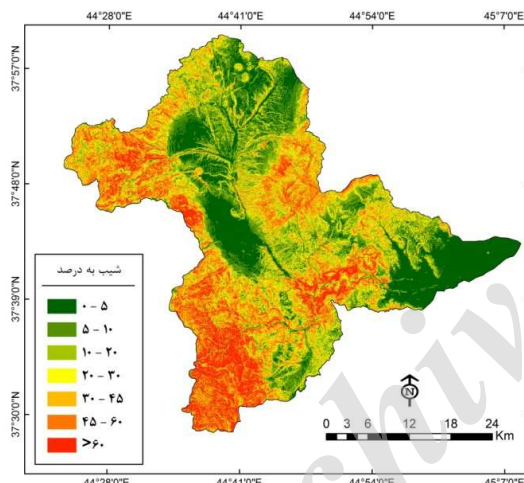
که در آن NIR باند مادون قرمز نزدیک (باند ۴ سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷) و Red باند قرمز (باند ۳ سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷) می‌باشد.

بر اساس شاخص NDVI حوضه مورد مطالعه به شش طبقه تقسیم گردیده است که درصد خیلی ناچیزی از منطقه دارای مقدار شاخص منفی می‌باشد که اغلب شامل بستر شنی رودخانه اصلی است. برای تقریباً تمام قسمت‌های حوضه، مقدار این شاخص مقادیری مثبت را نشان می‌دهد که بیانگر وجود پوشش گیاهی است و از شرق به غرب حوضه بر مقدار آن افزوده می‌شود. افزایش پوشش گیاهی در مناطق و دامنه‌های غربی نشان از رطوبت زیاد بوده و این خود دلیل تراکم لغزشها در این قسمت از حوضه می‌باشد.

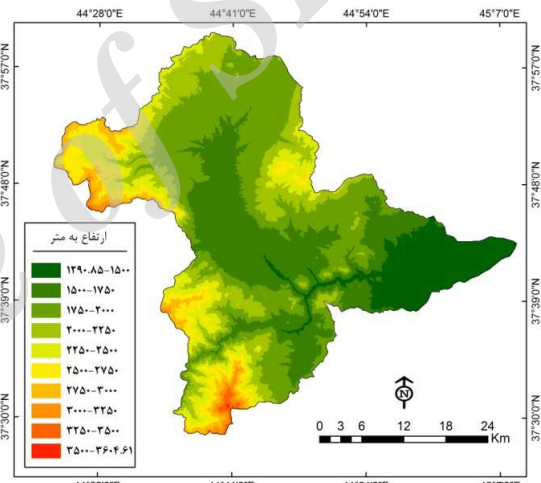
- جنس سازندها و گسل‌های موجود در حوضه از روی نقشه‌های زمین‌شناسی به مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰ ورقه ارومیه، ۱/۱۰۰۰۰۰ ورقه سرو و ۱/۲۵۰۰۰۰ ورقه سرو استخراج گردید (شکل ۱۲). تقریباً ۳۰ درصد توده‌های لغزشی بر روی سازندهای آهکی، دولومیتی و نزدیک به ۲۲ درصد بر روی ماسه‌سنگ و مارن و کنگلومرا بوقوع پیوسته‌اند. همچنین حدود

^۱ -Normalized Difference Vegetation Index

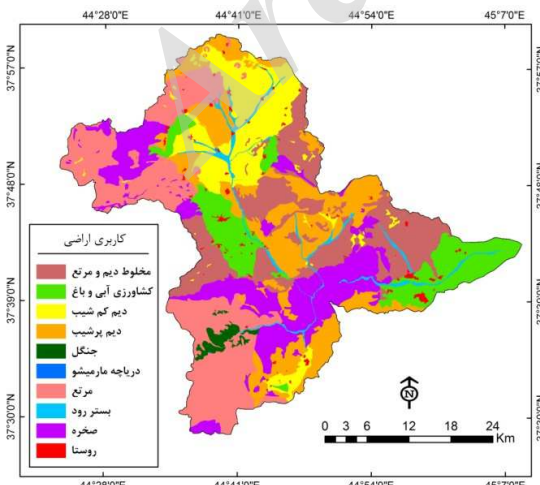
۳۰ درصد لغزشها بر روی کالردملاژ، اسلیت و فیلیت رخ داده‌اند که دارای میان‌لایه‌هایی از سنگ آهک بوده و منطقه تراکم گسل می‌باشد. بزرگترین لغزش‌های حوضه نیز بر روی این واحدها رخ داده‌اند. با توجه به مطالعات میدانی بنظر می‌رسد که وجود رطوبت زیاد در اثر پوشش مناسب و طولانی برف مهمترین دلیل وقوع زمین لغزش بر روی این سازندها در حوضه مورد مطالعه باشد. از نظر ژئومورفولوژی واحد کوهستان تپه در منطقه دارای گسترش وسیعی بوده و بیش از ۸۰ درصد مساحت حوضه مورد مطالعه را به خود اختصاص می‌دهد. شیب عمومی دامنه‌ها در این واحد عموماً بیش از ۱۲٪ بوده و گسترش واحدهای با برونزد سنگی از ویژگی‌های این واحد است. در این واحد ژئومورفولوژیکی از نظر لیتولوژی و مورفولوژی مناطق توده‌سنگی، دامنه‌ها و ستیخ‌ها را در بر می‌گیرد. عمده این مناطق بر ارتفاعات سازندهای کربناته بویژه قله‌ها و ستیخ‌های ارتفاعات سازند روته و قم منطبقند. همچنین مناطق برونزد سنگی (Rock Outcrops) دامنه‌ها و پهنه‌هایی را در برمیگیرد که ۲۵ تا ۷۵ درصد سطح رخنمونشان سنگی است. این مناطق اکثراً در سازندهای کربناته یا کنگلومرایی با سیمان کربناته واقع گردیده‌اند. این دو منطقه (مناطق توده‌سنگی و مناطق برونزدسنگی) محل و جایگاه اکثر لغزشهای رخ داده در حوضه میباشد (مهندسين مشاور امداد آب چهار محال، ۱۳۸۵).



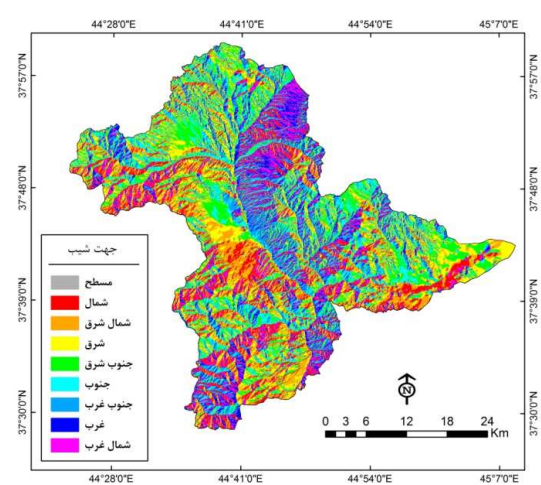
شکل ۴- نقشه کلاسه‌های شیب حوضه نازلوچای



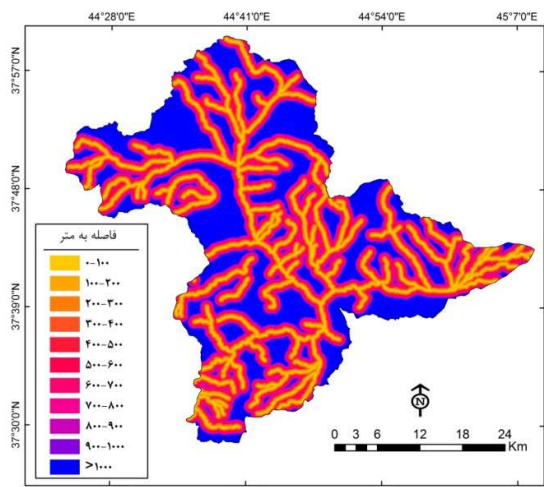
شکل ۳- نقشه کلاسه‌های ارتفاعی حوضه نازلوچای



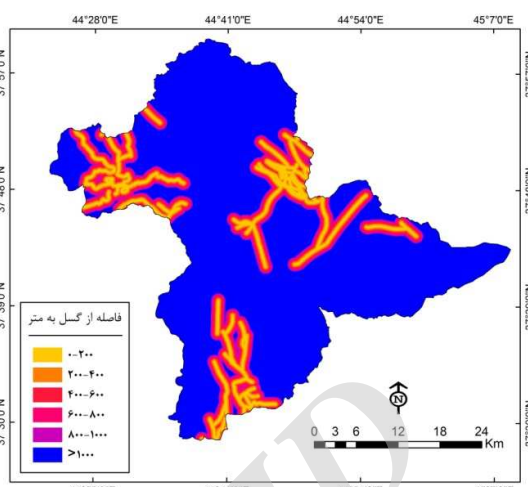
شکل ۶- نقشه کاربری اراضی حوضه نازلوچای



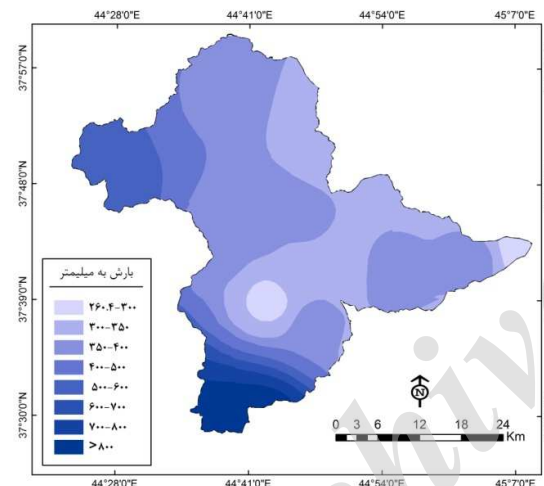
شکل ۵- نقشه کلاسه‌های جهت شیب حوضه نازلوچای



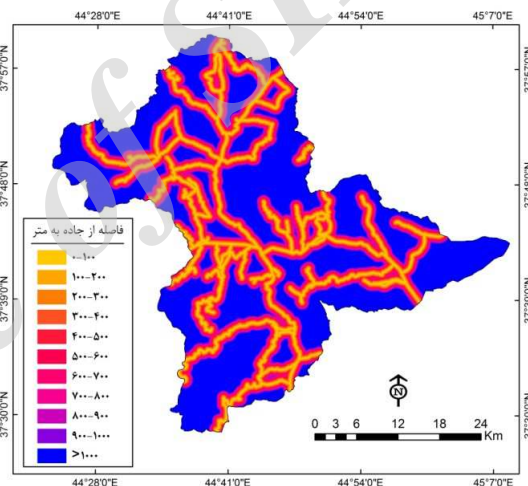
شکل ۸- نقشه فاصله از آبراهه حوضه نازلوچای



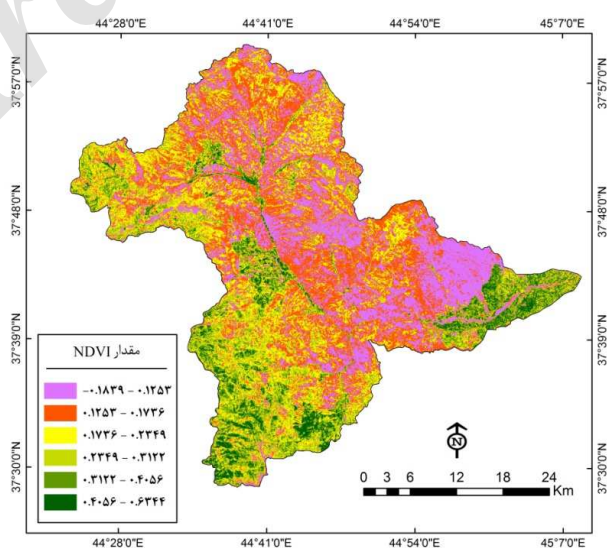
شکل ۷- نقشه فاصله از گسل حوضه نازلوچای



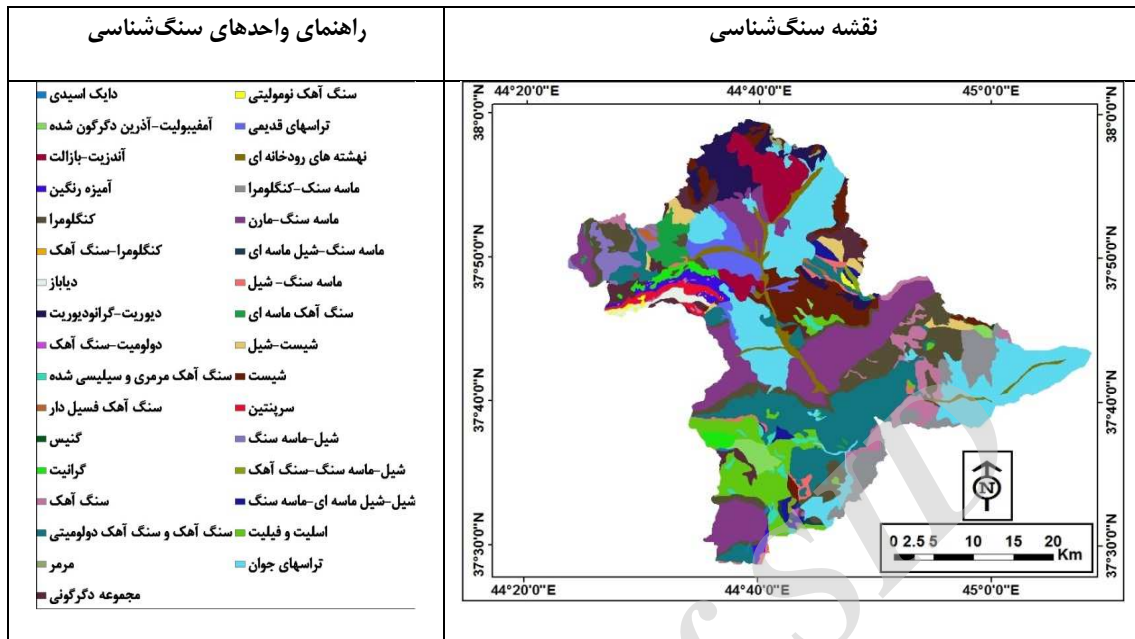
شکل ۱۰- نقشه بارش حوضه نازلوچای



شکل ۹- نقشه فاصله از جاده حوضه نازلوچای



شکل ۱۱- نقشه شاخص پوشش گیاهی (NDVI) حوضه نازلوچای



شکل ۱۲- نقشه سنگ‌شناسی حوضه نازلوجای

جدول ۱: نسبت فراوانی و مقادیر عضویت فازی برای کلاس‌های عامل ارتفاع و شیب حوضه

عضویت فازی	نسبت فراوانی	درصد پیکسل‌های لغزشی در هر کلاس	درصد پیکسل‌های هر کلاس	طبقات لایه عاملی
طبقات ارتفاعی به متر				
۰	۰	۰	۱۰/۵۵۵	۱۲۹۰ - ۱۵۰۰
۰/۳۹۰۸	۰/۶۷۴۱	۱۶/۰۱۹	۲۳/۷۶۳	۱۵۰۰ - ۱۷۵۰
۰/۷۶۵۵	۱/۳۲۰۳	۳۹/۸۶۱	۳۰/۱۹۱	۱۷۵۰ - ۲۰۰۰
۰/۷۸۶۲	۱/۳۵۶۰	۲۰/۲۹۲	۱۴/۹۶۴	۲۰۰۰ - ۲۲۵۰
۱	۱/۷۲۴۸	۱۶/۰۳۰	۹/۲۹۴	۲۲۵۰ - ۲۵۰۰
۰/۶۰۵۰	۱/۰۴۳۵	۶/۵۵۸	۶/۲۸۴	۲۵۰۰ - ۲۷۵۰
۰/۲۰۴۰	۰/۳۵۱۹	۱/۲۱۷	۳/۴۵۷	۲۷۵۰ - ۳۰۰۰
۰/۰۱۲۹	۰/۰۲۲۲	۰/۰۲۴	۱/۰۶۷	۳۰۰۰ - ۳۲۵۰
۰	۰	۰	۰/۴۰۶	۳۲۵۰ - ۳۵۰۰
۰	۰	۰	۰/۰۱۸	۳۵۰۰ - ۳۶۰۵
شیب به درصد				
۰/۰۲۴	۰/۰۴۴	۰/۸۴۱	۱۸/۹۳۱	۰ - ۵
۰/۱۸۰	۰/۳۳۲	۴/۰۵۹	۱۲/۲۳۸	۵ - ۱۰
۰/۶۳۴	۱/۱۷۰	۱۸/۷۱۱	۱۵/۹۸۷	۱۰ - ۲۰
۱	۱/۸۴۵	۲۳/۴۷۴	۱۲/۷۲۶	۲۰ - ۳۰
۰/۸۶۳	۱/۵۹۲	۲۷/۲۵۵	۱۷/۱۲۳	۳۰ - ۴۵
۰/۶۳۷	۱/۱۷۵	۱۵/۰۶۶	۱۲/۸۲۷	۴۵ - ۶۰
۰/۵۶۵	۱/۰۴۲	۱۰/۵۹۵	۱۰/۱۶۸	>۶۰

برای ارزیابی دقت عملگرها از شاخص نسبت تراکم و شاخص جمع مطلوبیت استفاده شد. از شاخص نسبت تراکم^۲ بمنظور ارزیابی توانایی‌های مدل در جداسازی کلاس‌های خطر استفاده شد. هرچه تفکیک بین کلاس‌های خطر بیشتر باشد مدل از توانایی بیشتری برخوردار بوده و از شاخص جمع کیفیت^۳ برای مقایسه کارایی مدل‌های مختلف استفاده می‌شود. هر قدر Q_s حاصله بیشتر باشد مدل برای منطقه مورد مطالعه مناسب‌تر خواهد بود (کریمی سنگ‌چینی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۸۳-۱۹۶).

$$Q_s = \sum_{i=1}^n [(D_r - 1)^i \times S] \quad \text{و} \quad D_r = \frac{S_i / A_i}{\sum^n S_i / \sum^n A_i} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن: D_r : تراکم لغزش را در هر کلاس خطر نشان داده و S : نسبت مساحت هر کلاس خطر به مساحت کل حوضه می‌باشد. در این رابطه n : تعداد کلاس‌های خطر می‌باشد. در نهایت با توجه به مقادیر حاصله، پهنه‌بندی با عملگر گامای ۰/۷ فازی برای حوضه مورد مطالعه مطلوب تشخیص داده شد.

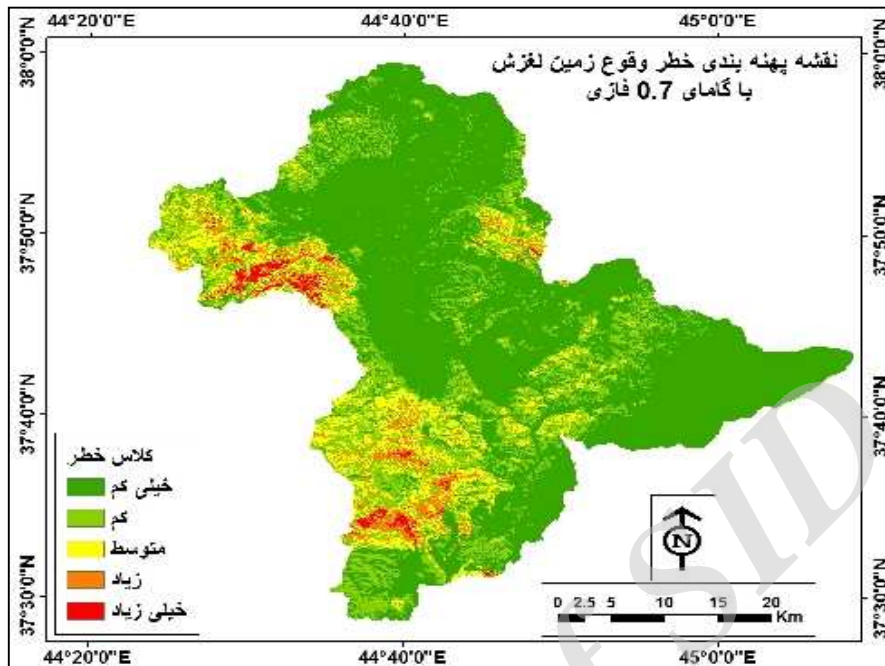
نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش منطق فازی صورت گرفت. پهنه‌بندی با استفاده از عملگرهای و فازی، یا فازی، جمع جبری فازی و ضرب جبری فازی نتایج قابل قبولی را نشان دادند. در حالیکه نتایج حاصل از عملگر ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ فازی با واقعیت‌های موجود منطقه مطابقت بیشتری را نشان دادند. برای انتخاب مدل‌های مناسب از شاخص نسبت تراکم، شاخص جمع مطلوبیت و مشاهدات میدانی بهره گرفته شد که در نهایت روش گامای ۰/۷ فازی برای حوضه مطلوب تشخیص داده شد و از دقت و مطلوبیت بیشتری در مقایسه با عملگرهای دیگر جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش برخوردار می‌باشد.

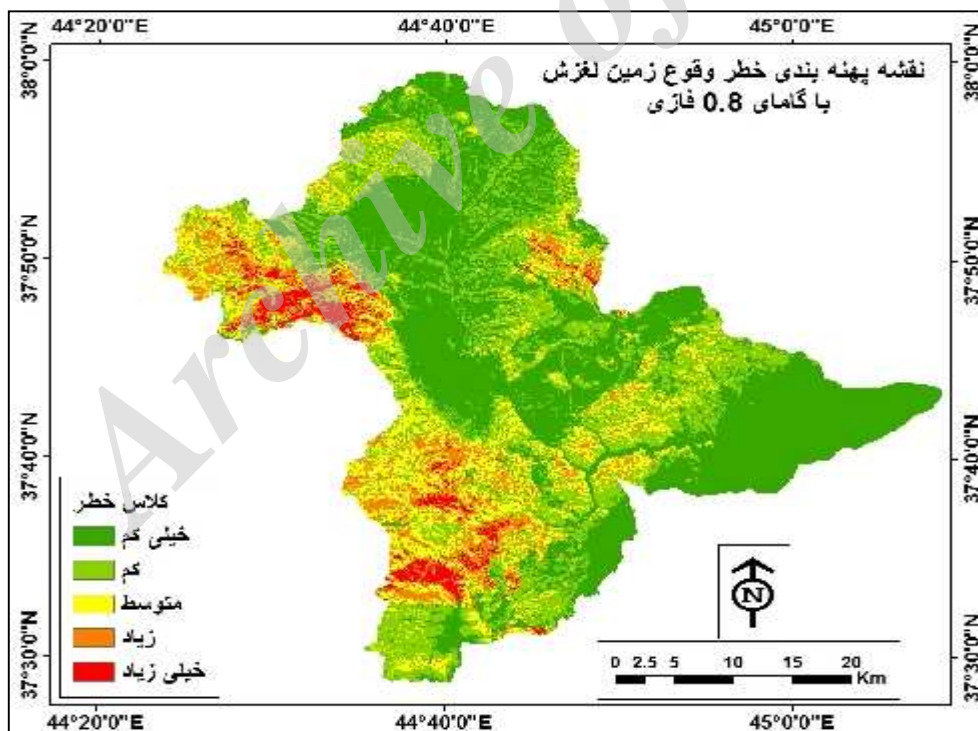
نتایج حاصل از پهنه‌بندی با استفاده از روش گامای ۰/۷ فازی تا گامای ۰/۹ فازی نشان می‌دهند که نقشه‌های حاصله انطباق بیشتری با پراکنش زمین‌لغزشها دارند (اشکال ۱۳ تا ۱۵).

^۲- density ratio

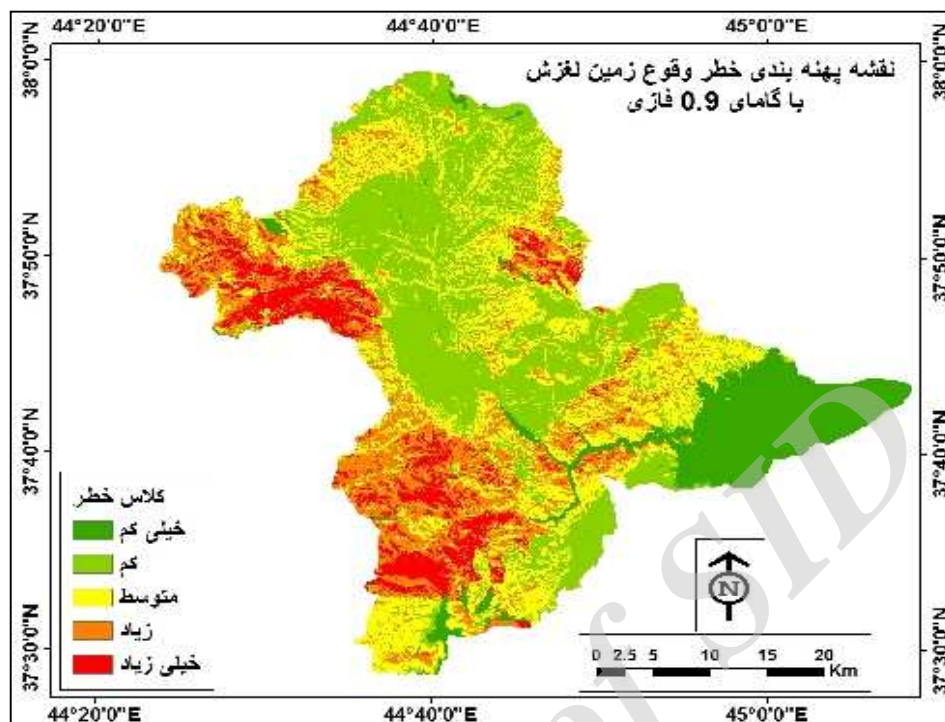
^۳- quality sum



شکل ۱۳: نقشه پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش با روش گامای ۰,۷ فازی

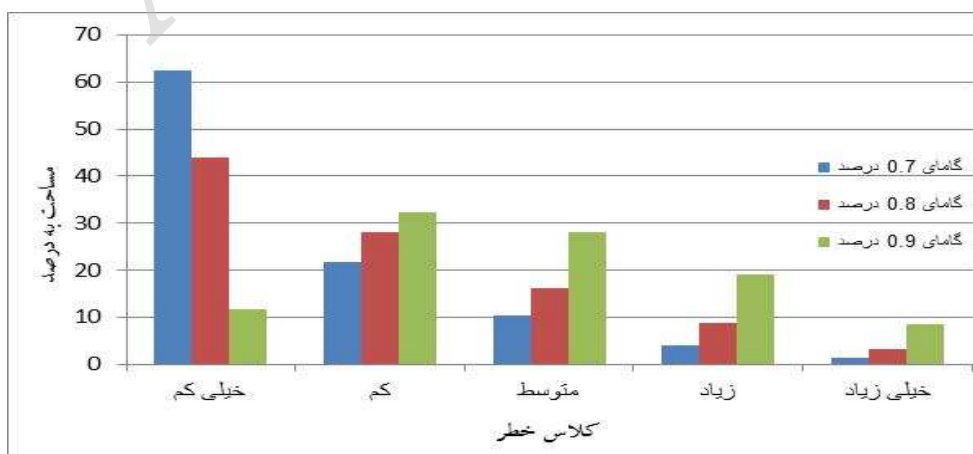


شکل ۱۴: نقشه پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش با روش گامای ۰,۸ فازی



شکل ۱۵: نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با روش گامای ۰٫۹ فازی

با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی (با استفاده از روشهای گامای فازی)، می‌توان گفت که عوامل، زمین‌شناسی، جهت شیب و فاصله از آبراهه به ترتیب مهمترین عوامل کنترل کننده وقوع زمین‌لغزش در حوضه مورد مطالعه می‌باشند. مخصوصاً عامل زمین‌شناسی از اهمیت بالایی برخوردار می باشد. اکثر زمین‌لغزش‌های حوضه مورد مطالعه بر روی سنگ آهک و کنگلومرا رخ داده‌اند که با نتایج تحقیق آقای تنگستانی در جنوبغرب ایران و آقای امیراحمدی که برای ایران کار کرده‌اند سنخیت دارد و این در حالی است که این سازندها از مساحت زیادی در حوضه برخوردار نیستند. سنگ آهک و مقدار کمی سنگ آهک دولومیتی با سطح اشغال ۱۵٫۵ درصد حوضه بیش از ۳۰ درصد لغزشها را به خود اختصاص داده‌اند. مهمتر اینکه سنگ آهک با جهت‌های متمایل به شمال منطبق بوده که نقش جهت شیب را نیز در وقوع زمین‌لغزش تأیید می‌نماید.



شکل ۱۶: نمودار درصد مساحت کلاسهای خطر حوضه با استفاده از روشهای گامای ۰٫۷، ۰٫۸ و ۰٫۹ فازی

علیرغم اینکه بعضی از محققین (اگمیتزی^۴، ۲۰۱۱)، نقش جهت شیب را نادیده می‌گیرند ولی تعداد دیگری از محققین (کاررارا و همکاران^۵، ۱۹۹۱) و (گوکچه اوغلو و آکسوی^۶، ۱۹۹۶) آن را در تحقیقاتشان به حساب آورده‌اند. در حوضه مورد مطالعه نقش جهت شیب در ماندگاری رطوبت قابل اغماض نیست و سازند کنگلومرایی در حضور رطوبت در صورتی که شرایط مساعد (به خصوص حضور آب و شیب مناسب) فراهم باشد، از پتانسیل بالایی برای لغزش برخوردار می‌باشد. با بررسی‌های میدانی به نظر می‌رسد که ماندگاری طولانی مدت برف و رطوبت، مهمترین دلیل وقوع زمین لغزش بر روی این سازندها می‌باشد، که با مقایسه نقشه‌های پراکندگی زمین لغزش‌ها، زمین شناسی و جهت شیب می‌توان به آن دست یافت. از نظر ایجاد شرایط لغزشی واحد اسلیت و فیلیت در درجه سوم اهمیت قرار دارد که با وجود مساحت کم (۵٫۲ درصد)، نزدیک به ۱۹ درصد لغزشها بر روی آن بوقوع پیوسته‌اند. دلیل این امر را می‌توان در انطباق این سازند با گسلهای متراکم این منطقه توجیه کرد که بدلیل فعالیتهای تکتونیکی و تخریب سنگها، آب در داخل شیارها نفوذ کرده که در ابتدا موجب تخریب فیزیکی و شیمیایی شده و شرایط را برای لغزش فراهم کرده است. همچنین لغزشهای ضعیف و خفیفی که در منطقه وجود دارد از عوامل محرک برای وقوع لغزش در این محدوده بشمار می‌آیند. همچنین نقش فرسایش عمقی در دره مارمیشو، لغزش سازندهای شیلی اسلیتی کهر را (بدلیل اینکه در شرایط شیب بحرانی قرار گرفته و بدلیل کاهش ضریب اصطکاک داخلی ذرات خاک در اثر جذب آب) در پی داشته که نتیجه آن جمع شدن آب در پشت خاکریز لغزشی و تشکیل دریاچه مارومیشو می‌باشد.

تاثیر عامل انسانی بطور عمده مربوط به تغییر شرایط محیطی از جمله، احداث راه، شخم نامناسب، چرای بی‌رویه و انحراف آب برای مصارف کشاورزی می‌باشد بطوریکه در برخی موارد، آب جهت انتقال به مزارع مسافت زیادی را در روی دامنه طی کرده که این امر باعث افزایش میزان نفوذ آب بر روی دامنه شده و به همان اندازه نیز خطر وقوع زمین لغزش افزایش می‌یابد.

بنابراین با بررسی تحقیقات صورت گرفته در ایران و نقاط مختلف جهان، عوامل لغزشی در حوضه‌ها و مناطق مختلف یکسان عمل نکرده و در واقع شرایط لغزشی متفاوتی دارند.

منابع

- پورقاسمی، حمیدرضا و همکاران، ۱۳۹۰، ارزیابی عوامل ژئومورفولوژیکی و زمین شناسی در تهیه نقشه خطر زمین لغزش با استفاده از منطق فازی و روش تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه موردی: بخشی از حوضه آبخیز هراز)، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد هجدهم، شماره چهارم، صص ۱-۲۰
- روستایی، شهرام، ۱۳۷۹، پژوهشی در دینامیک لغزش‌های زمین و علل وقوع آنها با استفاده از روش‌های مورفومتری در حوضه اهرچای، پایاننامه دکتری به راهنمایی مقصود خیام، دانشگاه تبریز.
- روستایی، شهرام، ۱۳۸۰، درآمدی بر تحلیل کمی تاثیر پراکنش ارتفاعی در ویژگی‌های مورفولوژیکی زمین لغزش‌ها، مجله فضای جغرافیایی، شماره ۳، صص ۷۵-۵۵
- روستایی، شهرام، ۱۳۸۳، بررسی علل وقوع زمین لغزش در روستای نصیرآباد ورزقان (استان آذربایجان شرقی) با استفاده از روش‌های کمی، فصلنامه مدرّس علوم انسانی، دوره ۸، شماره ۱، صص ۴۳-۲۳

^۴-A. Gemtzi, 2011

^۵- Carrara et al., 1991

^۶-Gokceoglu and Aksoy, 1996

- سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۶۷ و ۱۳۸۵، نقشه‌های زمین‌شناسی ارومیه و سرو با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ به همراه گزارشات.
- شادفر، صمد، ۱۳۸۴، ارزیابی تحلیلی مدل‌های کمی زمین‌لغزش به منظور دستیابی به مدلی مناسب برای حوزه آبخیز چالکرد، پایان‌نامه دکتری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ۲۲۵
- صفاری، امیر و همکاران، ۱۳۸۴، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل نسبت فراوانی و منطق فازی (مطالعه موردی: بخش مرکزی شهرستان جم)، فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال هشتم، شماره ۳۰، صص ۳۰-۱۵
- عبادی‌نژاد، سیدعلی و همکاران، ۲۰۰۷، ارزیابی کارایی عملگرهای منطق فازی در تعیین توانمندی زمین‌لغزش، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال اول، شماره ۲، صص ۳۹-۴۴
- غیومیان، و همکاران، ۱۳۸۴، پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند مشخصه فازی، مجله پژوهش و سازندگی، شماره ۵۶، صص ۶۷-۸۰
- قنوتی، عزت‌الله و همکاران، ۱۳۹۳، کاربرد منطق فازی در شناسایی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، مطالعه موردی: حوضه آبخیز طالقان، مجله علوم زمین، شماره ۹۳، صص ۹-۱۶
- کریمی سنگ‌چین، ابراهیم و همکاران، ۱۳۹۱، مقایسه کارایی ۴ مدل کمی و نیمه کمی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز چهل چای، استان گلستان. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد نوزدهم، شماره اول، صص ۱۸۳-۱۹۶
- متولی، صدرالدین و همکاران، ۱۳۸۸، تعیین حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از رگرسیون لجستیک در حوضه آبریز واز (استان مازندران)، فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال دوم، شماره ۵، صص ۸۳-۷۳
- نادری، فتح‌الله، ۱۳۹۱، کاربرد منطق فازی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوزه آبخیز چرداول ایلام، مجله پژوهش و سازندگی، شماره ۹۴
- Adhikari, M. 2011. *Bivariate statistical analysis of landslide susceptibility in western Nepal. Master thesis in geosciences. University of Oslo. pp: 1-88.*
- Akgün, A & Bulut, F. 2007. *GIS-based landslide susceptibility for Arsin-Yomra (Trabzon, North Turkey) region. Environ Geol 51:1377-1387.*
- Akinci, H. et al. 2011. *Production of landslide susceptibility map of Samsun (Turkey) city center by using frequency ratio method. International journal of the physical science Vol. 6(5), pp: 1015-1025.*
- Aleotti, P & Chowdhury, R. 1999. *Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bull Eng Geol Env 58: 21-44.*
- 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(1/2):15-31.*
- Binaghi, E et al. 1998. *Slope instability zonation: a comparison between certainty factor and fuzzy Dempster- Shafer approaches. Natural hazards 17: 77-97.*
- Biswajeet Pradhan, 2010. *Application of an advanced fuzzy logic model for landslide susceptibility analysis. International Journal of Computational Intelligence Systems, Vol.3, No. 3 (September, 2010), 370-381.*
- Bui, D. T et al. 2012. *Spatial prediction of landslide hazards in Hoa Binh province (Vietnam): A comparative assessment of the efficacy of evidential belief functions and fuzzy logic models. Catena 96, pp: 28-40.*
- Carrara A, Cardinali M, Detti R, Guzzetti F, Pasqui V, Reichenbach P (1991) *GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. Earth Surf Proc Land 16:427-445.*

- Ercanoglu, M & Temiz, F. A. 2011. Application of logistic regression and fuzzy operators to landslide susceptibility assessment in Azdavay (Kastamonu, Turkey). *Environ Earth Sci* 64:949–964.
- Ercanoglu M, Gokceoglu C. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environmental Geology* 2002, 41: 720-730.
- Gupta, R. P & Joshi, B. C. 1990. Landslide hazard zoning using the GIS approach—a case study from Ramganga catchment, Himalayas. *Engineering geology*, 28, 119–131.
- Guzzetti, F et al. 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31: 181–216.
- Juang CH, Lee DH, Sheu C (1992). Mapping slope failure potential using fuzzy sets. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 118(3), 475-493.
- Lan, H. X et al. 2004. Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. *Engineering Geology* 76. 109- 128.
- Lee, S & Biswajeet, P. 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides* 4:33–41.
- Magliulo, P et al. 2008. Geomorphology and landslide susceptibility assessment using GIS and bivariate statistics: a case study in southern Italy. *Nat Hazards* 47: 411-435.
- Melchiorre, C et al. 2008. Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation, *Geomorphology* 94: 379–400.
- Regmi, N. R et al. 2010. Assessing susceptibility to landslides: Using models to understand observed changes in slopes. *Geomorphology* 122, pp.25–38.
- Remondo, J et al. 2003. Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in Northern Spain; *Nat. Hazards* 30(3), pp 437-449.
- S. Lee & J. Choi 2010. Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model. *International Journal of Geographical Information Science*, Volume 18, Pages 789-814
- Van Westen, C. J & Soeters, R. 1998. Geographic information systems in slope instability zonation (GISSIZ). ITC. P: 156.
- Van Westen, C. J. 1997. Statistical landslide hazard analysis. *ILWIS 2.1 for windows applications guide*. ITC publication, Enschede, pp. 73-84.
- Wang, K. L & Lin, M.L. 2010. Development of shallow seismic landslide potential map based on newmark's displacement: the case study of Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Environ Earth Sci*, 60: 775-785.
- Yilmaz, I. 2009. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat-Turkey). *Comp Geosci* 35(6):1125–1138.