

بررسی عوامل مؤثر بر زمین لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن در حوزه آبخیز لتیان

- ❖ اصغر کوه‌پیما*؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، کرج، ایران.
- ❖ سادات فیض‌نیا؛ استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

چکیده

زمین لغزش هر ساله در نقاط مختلف جهان سبب زیان‌های اقتصادی و اجتماعی بسیاری می‌شود. این زیان‌ها می‌تواند با استفاده از اقدامات مدیریتی مناسب مانند تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در حوضه تا حد زیادی کاهش یابد. هدف از تحقیق حاضر پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از روش فاصله‌ماهلانوبیس در حوزه لتیان است. ابتدا بر اساس تفسیر عکس‌های هوایی و بازدیدهای میدانی گسترده تعداد ۲۰۸ مورد زمین لغزش شناسایی و با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی زمین مرجع شده و نقشه پراکنش زمین لغزش‌های حوضه به‌دست آمد. سپس نقشه ۱۲ عامل مؤثر که شامل بارش، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، سنگ‌شناسی، ارتفاع، در صد شیب، جهت شیب، شاخص انحنا، عرضی دامنه، حداکثر شتاب افقی زلزله و شاخص رطوبت توپوگرافیکی به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش تهیه شد و ارتباط هر یک از عوامل و نقاط لغزشی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش حوزه آبخیز لتیان بر اساس مدل فاصله‌ماهلانوبیس به‌دست آمد. برای ارزیابی نتایج نیز از آزمون‌های ROC و کای اسکور استفاده شد. نتایج نشان داد بیش از ۸۰ درصد حوضه در محدوده کلاس خطر زیاد و خیلی زیاد حساسیت قرار گرفته است. شاخص AUC (مساحت زیر منحنی ROC) برای این مدل برابر ۰/۸۹۶ یا ۸۹/۶٪ به‌دست آمده که نشان دهنده قابلیت و دقت بالای مدل است. همچنین نتایج آزمون کای اسکور بیانگر تفکیک مناسب کلاس‌های حساسیت زمین لغزش توسط مدل می‌باشد.

کلید واژگان: پهنه‌بندی، زمین لغزش، فاصله‌ماهلانوبیس، شاخص ROC، لتیان

۱. مقدمه

روش فاصله ماهالانوبیس در تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش در حوزه آبخیز لتیان می‌باشد. تاکنون در حوزه آبخیز لتیان تحقیقات اندکی در مورد زمین لغزش صورت گرفته است. به عنوان مثال در تحقیقی تحت عنوان "پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در دامنه شمالی مخزن سد لتیان با استفاده از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی، تراکم سطح، شاخص هم پوشانی و ارزش اطلاعاتی" پهنه‌بندی خطر زمین لغزش را بر اساس نه پارامتر لیتولوژی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، شیب، جهت شیب، ارتفاع، زاویه اصطکاک مواد تشکیل دهنده و کاربری اراضی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داده که به ترتیب روش‌های تراکم سطح و شاخص هم پوشانی کارایی بیشتری در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش داشته‌اند [۲]. یا در موردی دیگر ارزیابی کارایی مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوزه آبخیز سد لتیان، بر اساس لایه‌های اطلاعاتی شامل زمین شناسی، فاصله از گسل‌های فعال، طبقات ارتفاعی، شیب، وجه شیب، بارندگی و پوشش گیاهی و همچنین به‌کارگیری روش‌های نیلسن، تراکم سطح، ارزش اطلاعاتی و وزن متغیرها، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش انجام شده است که نتایج آن‌ها نشان می‌دهد روش‌های وزن متغیرها و ارزش اطلاعاتی کاراترین روش‌ها هستند [۱۱].

۲. روش شناسی

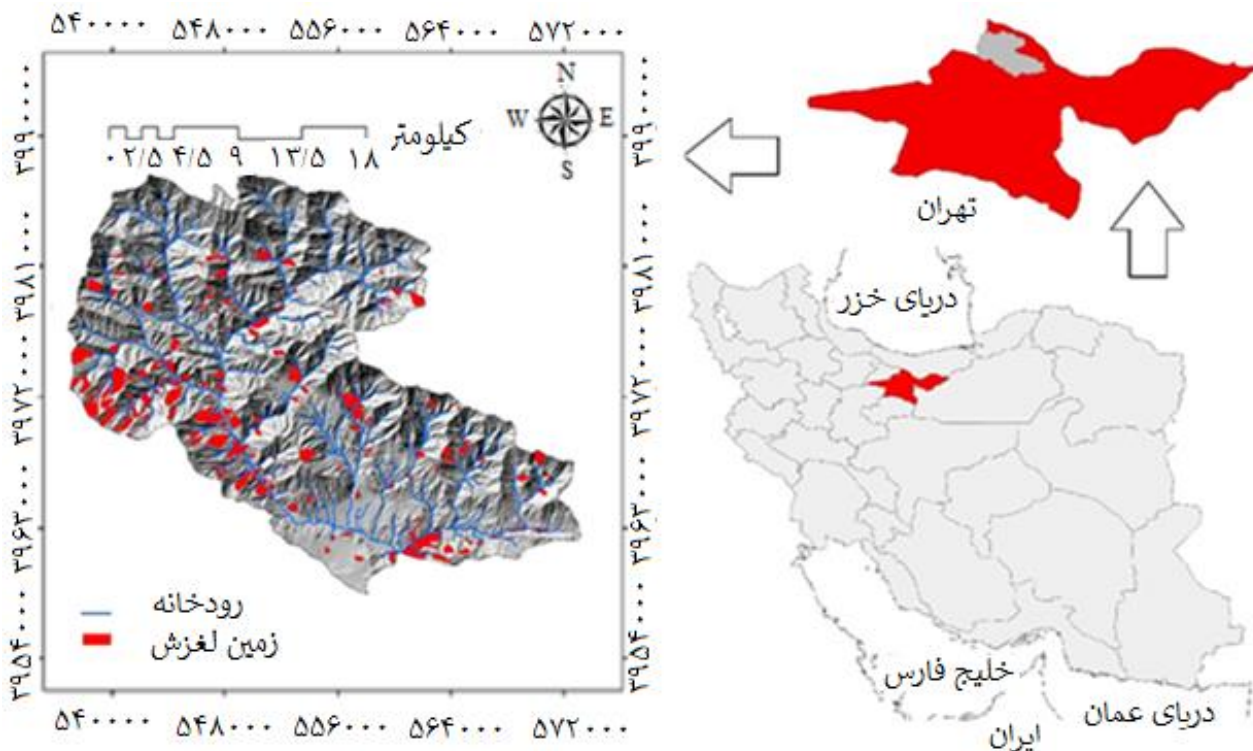
۱.۲. موقعیت و شرایط حوزه

حوزه آبخیز سد لتیان با مساحت ۷۰۷۹۳ هکتار از لحاظ تقسیمات کشوری در محدوده شهرستان شمیرانات و بین طول جغرافیایی $51^{\circ} 22'$ تا $51^{\circ} 51'$ شرقی و عرض جغرافیایی $35^{\circ} 45'$ تا $36^{\circ} 5'$ شمالی واقع شده است (شکل ۱). این حوضه از شمال به حوزه آبخیز سد لار، از غرب به حوزه آبخیز کرج، از جنوب به حوزه آبخیز شمال تهران و از شرق به حوزه آبخیز دماوند محدود می‌شود. حداکثر ارتفاع درحوضه، ۴۳۲۵ متر در کوه ولدر بالدر و

زمین لغزش پدیده‌ای است که سالانه خسارات فراوانی را از نظر جانی مالی و منابع طبیعی در پی داشته است [۳۰]. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که تا اوایل سال ۱۳۷۸ حدود ۲۵۹۰ زمین لغزش در کشور اتفاق افتاده که سبب مرگ ۱۶۲ نفر، تخریب ۱۷۶ باب خانه، خسارت مالی به مبلغ ۱۸۶۶ میلیارد ریال، تخریب ۶۷۶۳ هکتار جنگل، تخریب ۱۷۰ کیلومتر راه ارتباطی و حجم ۹۶۳۸۰۷ متر مکعب رسوب سالیانه شده است [۲۳]. بنابراین بررسی این پدیده مخرب و شناسایی مناطق حساس کمک زیادی در کاهش خسارات احتمالی می‌نماید. با استفاده از نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش، می‌توان مناطق حساس به زمین لغزش را شناسایی و در مورد برنامه‌های مورد نظر تصمیم‌گیری نمود [۱]. در نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش سطح زمین را به نواحی ویژه و مجزایی از درجات بالقوه حساسیت تقسیم می‌کنند. این فرایند که بر مبنای شناخت ویژگی‌های طبیعی و بر پایه مدل‌سازی کمی 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. محققان [۲۰] سه رویکرد اصلی در ارزیابی حساسیت زمین لغزش را به صورت کیفی، نیمه کمی و کمی طبقه‌بندی کرده‌اند. روش‌های کیفی بر پایه نظرات کارشناسی می‌باشند [۱۰]. مدل‌هایی که از روش‌های وزن دهی و نرخ دهی استفاده می‌کنند به عنوان روش‌های نیمه کمی شناخته می‌شوند [۳۲]. نمونه‌ای از این روش‌ها تحلیل سلسله مراتبی [۱۶] و ترکیب خطی وزن [۱۸] و روش فاکتور اطمینان [۹] می‌باشد. روش‌های کمی بر پایه منطق ریاضی از همبستگی بین فاکتورهای مؤثر و وقوع زمین لغزش بنا شده که شامل رگرسیون تحلیلی دومتغیره، چندمتغیره و لجیستیک، منطق فازی، آنالیز شبکه مصنوعی می‌باشند [۳، ۴، ۶]. هدف از این تحقیق در درجه اول تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش و سپس ارزیابی کارایی

واحدهای زمین شناسی یعنی پرکامبرین شروع شده و به رسوبات کواترنر ختم می شود، اما اکثر سازندهای موجود در منطقه مربوط به زمان اتوسن است. کاربری حوضه متنوع بوده و دارای کاربری های جنگل، مرتع، زراعت آبی و مسکونی می باشد [۱۷]

حداقل ارتفاع ۱۵۰۰ متر از سطح دریا در محل خروجی سد لتیان است. مطابق طبقه بندی اقلیمی آمبرژه این حوضه در ناحیه کوهستانی سرد واقع شده است و میانگین بارش سالیانه حوضه ۵۷۳ میلی متر است. حوزه آبخیز لتیان در دامنه جنوبی البرز (البرز مرکزی) قرار گرفته است. تقسیمات چینه شناسی در منطقه از قدیمی ترین



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز لتیان

جغرافیایی زمین مرجع شده و نقشه پراکنش زمین لغزش های حوضه به دست آمد. همچنین بر اساس مرور منابع و با بررسی های انجام شده در حوضه تعداد ۱۲ عامل شامل کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، سنگ شناسی، ارتفاع، درصد شیب، جهت شیب، شاخص انحنای عرضی دامنه، بارش، حداکثر شتاب افقی زمین لرزه (PGA) و شاخص رطوبت توپوگرافیکی (TWI) به عنوان مهم ترین عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش در نظر گرفته شد. نقشه مدل رقومی

۲.۲. روش تحقیق

جهت پهنه بندی حساسیت زمین لغزش بر اساس روش فاصله ماهالانوبیس، ابتدا بر اساس عکس های هوایی و بازدید های میدانی گسترده تعداد ۲۰۸ مورد زمین لغزش شناسایی و تعیین حدود شد. شناسایی زمین لغزش ها با استفاده از کتابچه راهنمای شناسایی زمین لغزش ها [۱۵] صورت گرفت و زمین لغزش ها در دو شکل اصلی لغزش چرخشی و لغزش انتقالی طبقه بندی گردید. سپس نقشه ها با استفاده از سیستم اطلاعات

۳.۲. مدل فاصله ماهالانوبیس

این نوع از فاصله در سال ۱۹۳۶ توسط پراسانتا کاندرا ماهالانوبیس آرا نه شد، اما اخیراً جهت ارزیابی مکانی زمین لغزش استفاده می شود [۳۱]. فرض ساده این مدل مبتنی بر آن است که شرایط مشابه، خروجی مشابهی دارند. در یک محیط فیزیکی، مشاهده یک پدیده نظیر زمین لغزش وابسته به یک شرایط مکانی خاص تحت عنوان عدم پایداری، می باشد. این شرایط خاص تحت تأثیر یک سری متغیر (عواملی تأثیرگذار در وقوع زمین لغزش) در قالب برداری قابل توصیف است. به عبارت دیگر هر سلول از یک محیط فیزیکی در قالب یک بردار به صورت رابطه ۱ قابل نمایش است.

$$\text{Cell}_i = [a_{1(i)}, a_{2(i)}, a_{3(i)} \dots a_{n(i)}; S] \quad (1)$$

که در آن Cell_i ، $a_{1(i)}$ ، $a_{2(i)}$ ، $a_{3(i)}$... $a_{n(i)}$ متغیرهای تأثیرگذار معرف هر پیکسل (مقادیر شیب، ارتفاع، فاصله از جاده و سایر عوامل در سلول i) بوده و S می تواند ۱ به معنای پیکسل کاملاً ناپایدار (حداکثر احتمال وقوع زمین لغزش) و ۰ به معنای پیکسل کاملاً پایدار باشد. در این روش پیکسل هایی که در آن ها زمین لغزش رخ داده تعیین شده، مقادیر عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش در این سلول ها لیست شده و از هر کدام از آن ها میانگین گرفته می شود، این مقادیر میانگین به عنوان مقادیری تعریف می شوند که سبب حداکثر احتمال وقوع زمین لغزش شده اند. حال احتمال وقوع زمین لغزش در سایر سلول ها (سلول های عدم حضور زمین لغزش) از رابطه ۲ و در قالب فاصله بیان می گردند.

$$D_m = \sqrt{(x - m)^T \Sigma^{-1} (x - m)} \quad (2)$$

که در آن X بردار یا ماتریس هر یک از عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش، m میانگین مقادیر هر یک از عوامل، T

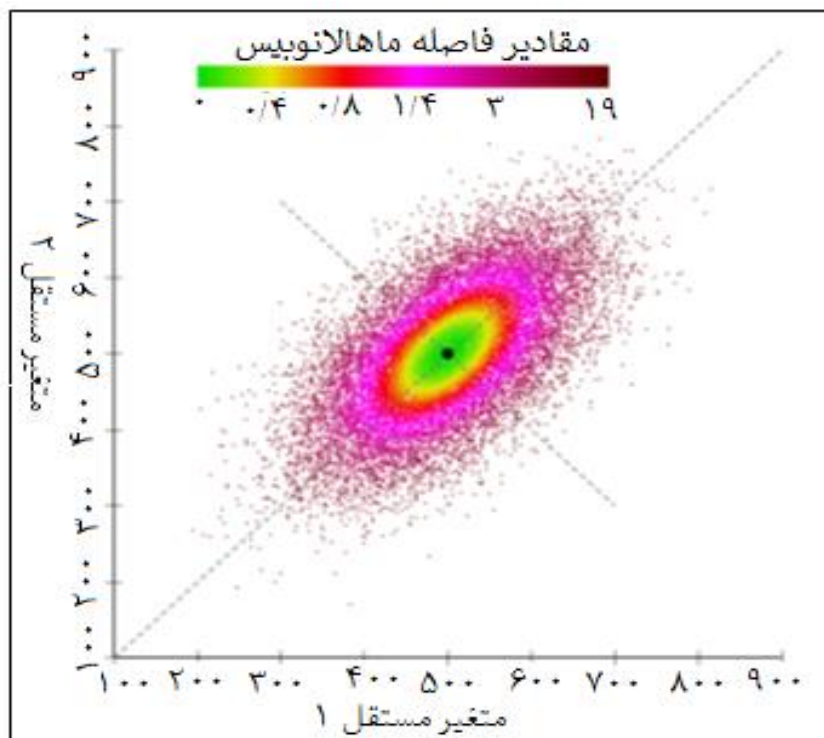
ارتفاع (DEM)^۱ از روی نقشه رقومی توپوگرافی ۱:۱۰۰۰۰ حوزه سد لتیان و نقشه شیب، جهت شیب، مقدار بارش، شاخص انحنای عرضی و طولی دامنه، شاخص رطوبت توپوگرافی و شاخص پستی و بلندی (اختلاف ارتفاع) نسبی از روی نقشه DEM تهیه شده است. نقشه های کاربری اراضی، جاده و رودخانه (حاصل از نقشه های توپوگرافی ۱:۱۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰) از مطالعات جامع اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان تهران، نقشه زمین شناسی و گسل حوزه از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه و استخراج گردیده است. نقشه عامل حداکثر شتاب افقی زلزله نیز از نقشه گسل های حوزه لتیان تهیه شده است. پس از تهیه نقشه این عوامل و آماده سازی و اصلاح آن ها در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی، باید نرخ کلاس های مختلف عوامل تعیین گردد. برای این کار در مورد نقشه عوامل کمی از نمودار فراوانی تجمعی پیکسل ها در مقابل ارزش هر پیکسل استفاده شده است. روی این منحنی مناطقی که شیب منحنی تغییر پیدا می کند را به عنوان مرز یک کلاس با کلاس دیگر در نظر می گیرند. در مورد نقشه عوامل کیفی نیز کلاسه بندی با توجه به محتویات هر لایه صورت گرفت. بعد از کلاسه بندی به منظور تعیین نرخ هر کلاس که در پهنه بندی از اهمیت بالایی برخوردار است، از قطع دادن نقشه پراکنش زمین لغزش ها با هر کدام از لایه های اطلاعاتی استفاده شد [۱۲]. پس از تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش ها و نرخ دهی کلاس های عوامل مؤثر بر زمین لغزش، آن ها را به افزونه Mahalanobis Distance در محیط نرم افزار ArcGIS 10.2 وارد و نقشه پهنه بندی حساسیت زمین لغزش بر اساس الگوریتم مدل فاصله ماهالانوبیس تهیه گردید.

^۱ Digital Elevation Model

^۲ Prasanta Chandra Mahalanobis

داده شده است. مقادیر در قالب فاصله از مرکز بیضوی فرضی (حداکثر احتمال وقوع زمین لغزش) ارائه شده‌اند.

معکوس یا به اصطلاح ترانهاده ماتریس مقادیر عوامل و Σ^{-1} ماتریس کواریانس معکوس می‌باشد. در شکل ۲ این فاصله در قالب نمودار با فرض وجود تنها دو عامل نمایش



شکل ۲. شمایی از نمودار فاصله ماهالانوبیس با دو متغیر فرضی

۴.۲. ارزیابی نتایج روش پهنه‌بندی

نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش بر اساس نقاط عطف منحنی فراوانی تجمعی پیکسل‌ها [۱۲] به پنج کلاس حساسیت خیلی کم، حساسیت کم، حساسیت متوسط، حساسیت زیاد و حساسیت خیلی زیاد تقسیم شد. به منظور ارزیابی میزان تفکیک مناسب کلاس‌های حساسیت زمین لغزش از آزمون کای اسکور و جهت ارزیابی صحت نتایج پیش‌بینی مدل، از آزمون ROC [۲۹، ۳۵، ۳۵] استفاده شد. از آنجایی که نمی‌توان جهت ارزیابی نتایج مدل از همان نقشه پراکنش زمین لغزش‌های منطقه استفاده نمود [۱۹] بخشی از داده‌ها برای مدل‌سازی (۷۰٪) و بخش دیگر برای ارزیابی مدل

هرچه این فاصله (Dm) کم‌تر باشد، نزدیکی به شرایط میانگین لغزش بیشتر، در نتیجه احتمال وقوع زمین لغزش افزایش می‌یابد. فاصله ماهالانوبیس همانند فاصله اقلیدسی است با این تفاوت که مقادیر متغیرها صرفاً روی بردار دوبعدی مختصات منتقل نشده بلکه توسط ماتریس کواریانس نرمال‌سازی می‌شود. در واقع به نوعی یک فاصله احتمالاتی است، لذا استفاده از آن برای مسائل احتمالاتی نظیر ارزیابی وقوع پدیده زمین لغزش، بهتر و پرکاربردتر است [۳۱]. در این تحقیق به دلیل بیشتر بودن تعداد عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش (بیش از دو عامل) به جای واریانس از کواریانس استفاده شد که در رابطه ۲ نیز پیش‌بینی شده است.

زیر طبقه‌بندی می‌شود: ۱-۰/۹: عالی، ۰/۸-۰/۹: خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸: خوب، ۰/۶-۰/۷: متوسط و ۰/۵-۰/۶: ضعیف [۳۴].

۳. نتایج

با قطع دادن نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها و نقشه هر یک از عوامل مؤثر بر زمین لغزش، میزان تأثیر کلاس‌های مختلف عوامل در وقوع زمین لغزش مشخص شده است. جدول ۱. کلاس‌های دارای بیشترین و کمترین سطح لغزشی را نشان می‌دهد.

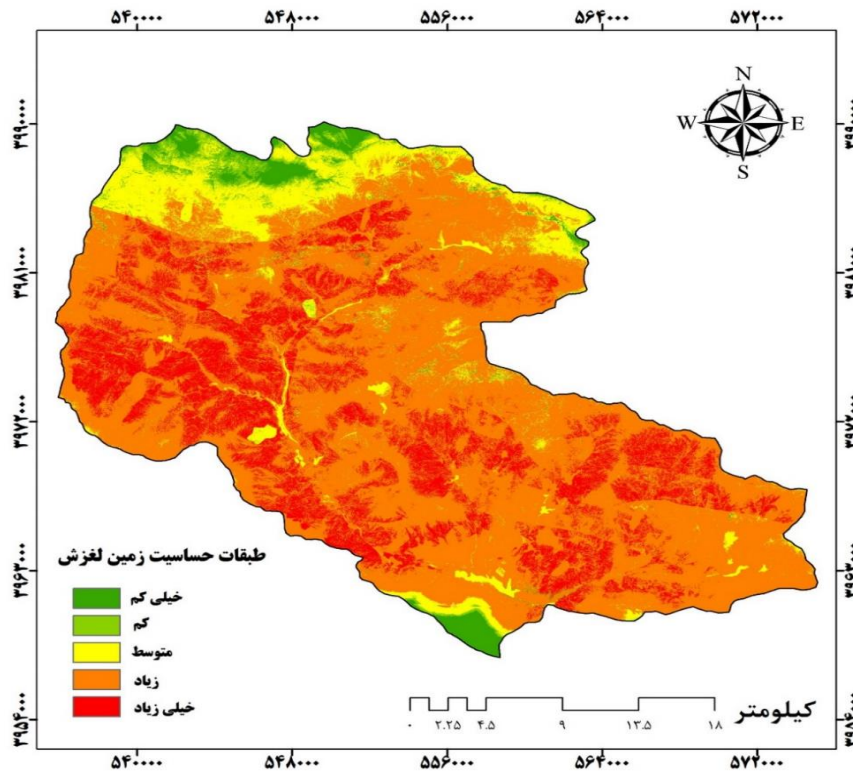
جدول ۱. کلاس‌های دارای بیشترین و کمترین سطح لغزشی

کمترین سطح لغزش		بیشترین سطح لغزش		سطح لغزش عوامل
حجم لغزش (هکتار)	کلاس	حجم لغزش (هکتار)	کلاس	
۳۱/۳۱	دریاچه سد	۴۱۴۷/۹۲	مرتع	کاربری اراضی
۱۴۷/۴۲	۹۵۰۰ <	۱۶۹۳/۴۲	۴۰۰۰-۶۵۰۰	فاصله از غسل (متر)
۲/۷۸	۱۸۰۰ <	۱۶۷۱/۰۲	۰-۲۰۰	فاصله از آبراهه (متر)
۷۶/۲۴	۴۰۰۰ <	۱۸۹۲/۸۱	۰-۵۰۰	فاصله از جاده (متر)
۰/۲۶	سازند روته	۳۷۴۶/۵۱	سازند کرج	سنگ‌شناسی
۱۴۰/۴۶	۳۵۰۰-۴۳۱۶	۱۲۹۶/۳۷	۲۰۰۰-۲۳۰۰	ارتفاع (متر)
۰/۱۴	۲۰۰-۴۰۰	۳۲۴۱/۰۹	۳۰-۶۵	درصد شیب
۴۳/۵۱	هموار	۱۱۴۱/۸۸	شمال غرب	جهت شیب
۱۴۹۳/۲۰	بدون انحنای	۲۰۱۷/۴۸	انحنای محدب	شاخص انحنای عرضی
۳۶/۲۹	۳۰۰-۴۰۰	۱۸۹۲/۶۸	۴۵۰-۵۵۰	بارش (میلیمتر)
۷۶۶/۸۰	۰/۱-۴۱/۴۷	۲۳۶۴/۴۲	۰/۳۴-۰/۴۱	PGA
۸۴۴/۱۷	رطوبت زیاد	۲۴۱۷/۱۰	رطوبت متوسط	TWI

و در صد مساحت هر کلاس حساسیت در جدول ۲ ارائه شده است که به ترتیب ۲۷/۸، ۲۹/۳۸، ۲۲/۹، ۱۴/۱۷ و ۵/۷۲ درصد مساحت حوضه در کلاس‌های خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند.

(۳۰٪) در نظر گرفته شد [۷، ۸] منحنی ROC یکی از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها است که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند [۳۳]. سطح زیر منحنی ROC (AUC)، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق تو صیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وقوع زمین لغزش) و عدم وقوع رخداد (عدم وقوع زمین لغزش) است. ایده آل‌ترین مدل بیشترین AUC را دارد. مقادیر AUC از ۰/۱-۵ متغیر است. چنانچه مقدار AUC برابر ۰/۵ باشد بیانگر کارایی ضعیف و AUC برابر ۱ بیانگر بهترین دقت در تهیه نقشه پهنه‌بندی است. مقادیر AUC به صورت

نقشه عوامل بر اساس الگوریتم مدل فاصله ماهالانوبیس با هم ترکیب شدند. نقشه حساسیت حاصل بر اساس نقاط عطف منحنی تجمعی فراوانی پیکسل‌ها به پنج کلاس حساسیت طبقه‌بندی شد (شکل ۳). مساحت



شکل ۳. نقشه حساسیت زمین لغزش حوزه آبخیز لتیان به روش فاصله ماھالانوبیس

جدول ۲. مساحت و درصد مساحت کلاس‌های حساسیت زمین لغزش حوزه آبخیز لتیان به روش فاصله ماھالانوبیس

کلاس خطر	صفات بیانی	مساحت (ha)	درصد مساحت
I	خیلی کم	۲۵۱/۱۵	۳/۰۳
II	کم	۱۵۴۱/۷	۲/۱۷
III	متوسط	۷۵۲۵/۴۴	۱۰/۶۳
IV	زیاد	۴۵۴۹۱/۴	۶۴/۲۵
V	خیلی زیاد	۱۴۰۸۸/۶۹	۱۹/۹
	جمع	۷۰۷۹۳	۱۰۰

معنی دار ($P < 0/05$) می‌باشد.

نتایج حاصل از منحنی ROC بر اساس ۳۰ درصد نقاط لغزشی در شکل ۵ نشان داده شده است. شاخص AUC (مساحت زیر منحنی ROC) برای این مدل برابر ۰/۸۹۶ یا ۸۹/۶٪ به دست آمده که نشان دهنده قابلیت

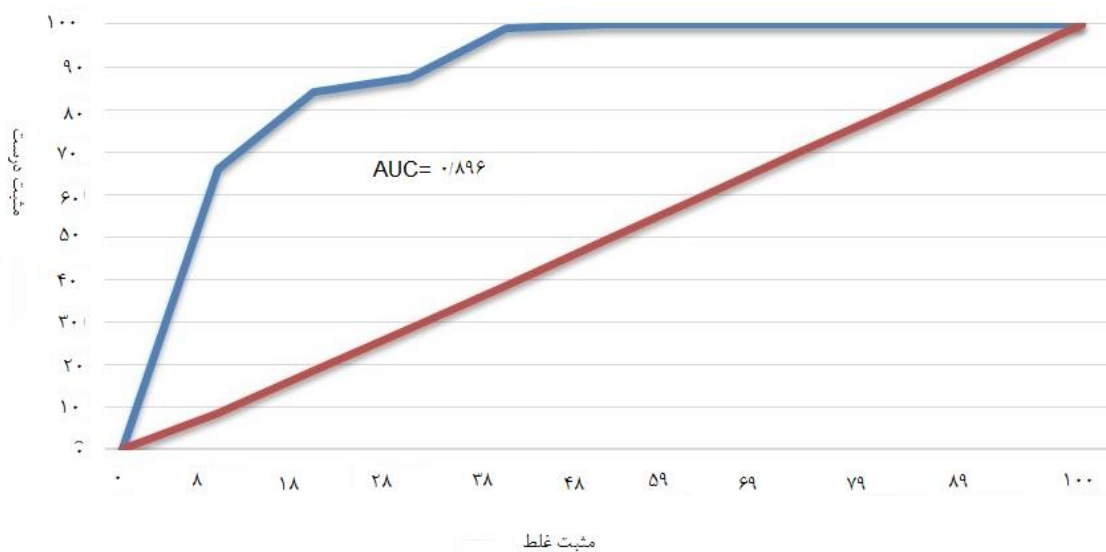
جهت تعیین میزان تفکیک کلاس‌های حساسیت زمین لغزش از آزمون کای اسکوئر استفاده شده است (جدول ۳). همان‌طور که مشاهده می‌گردد مدل، تفکیک مناسبی را از کلاس‌های حساسیت ارائه می‌کند و تفاوت داخلی کلاس‌های حساسیت در سطح اطمینان ۹۵ درصد

¹ Chi square (x^2)

دقت بالای مدل است.

جدول ۳. مقادیر کای اسکوتر کلاس‌های خطر مدل‌های مختلف

عنوان	فاصله ماهالانوبیس
کای اسکوتر	۹۳۸۶۶/۰۷
درجه آزادی (df)	۴
P-value	<۰/۰۵



شکل ۴. منحنی Roc و سطح زیر منحنی (AUC)

پارامتری در یک منطقه مهم در حالی که در منطقه دیگر اهمیتی ندارد و حتی پارامترهای مؤثر در وقوع زمین لغزش در مناطق مشابه هم می‌توانند تفاوت داشته باشند [۲۳]. در تحقیق حاضر ۱۲ عامل شامل کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، سنگ‌شناسی، ارتفاع، درصد شیب، جهت شیب، شاخص انحنای عرضی دامنه، بارش، حداکثر شتاب افقی زمین لرزه (PGA) و شاخص رطوبت توپوگرافیکی (TWI) به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش در نظر گرفته شده، با نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها تلفیق گردید و بدین ترتیب نرخ کلاس‌های مختلف عوامل به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده (جدول ۱) در عامل کاربری اراضی بیشترین مساحت لغزش یافته در کاربری

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در حوزه آبخیز لتیان از مدل فاصله ماهالانوبیس استفاده شده است. تاکنون مطالعه‌ای در مورد زمین لغزش با استفاده از این مدل در کشور انجام نشده است. محققان [۳۱]، با استفاده از روش فاصله ماهالانوبیس و شبکه عصبی مصنوعی داده‌های تعلیمی را تفکیک و غنی‌سازی کرده و در نهایت به پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش حوضه زانتي در یونان پرداختند. با توجه به مطابقت بالای نتایج با مقادیر آزمایشی، روش فاصله ماهالانوبیس روشی مناسب برای پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در حوضه مذکور معرفی شده است. هیچ استاندارد برای تعداد پارامترهای مؤثر در وقوع زمین لغزش وجود ندارد و بعضاً

نتایج بررسی عامل شیب نشان می‌دهد که بیشتر زمین لغزش‌های منطقه در شیب‌های ۳۰-۶۵ درصد رخ داده است (۳۲۴۱/۰۹ هکتار). در شیب‌های کم نیروهای مقاوم (عمودی) بر نیروهای محرک (افقی) غلبه دارد و شرایط وقوع زمین لغزش فراهم نمی‌شود در شیب‌های بالا هم احتمالاً خاک کافی برای وقوع این پدیده وجود ندارد. بررسی جهت شیب نشان می‌دهد که بیشتر زمین لغزش‌ها در جهت شمال غرب رخ داده که به دلیل وجود بارندگی و رطوبت بیشتر در این دامنه‌ها و نفوذ بیشتر آب و در نتیجه کاهش مقاومت برشی خاک است. این نتیجه با تحقیقات گذشته [۵، ۱۳] مطابقت نشان می‌دهد. بررسی شکل شیب نشان می‌دهد که بیشتر زمین لغزش‌ها در شیب‌های محدب رخ داده است که با نتایج سایر محققان [۲۷] مطابقت نشان می‌دهد. بررسی عامل بارش در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیشتر زمین لغزش‌ها در طبقه بارش ۴۵۰-۵۵۰ میلی‌متر رخ داده است (۱۸۹۲/۶۸ هکتار) که بیانگر حساسیت بالای عرصه به عامل بارش در منطقه است. بررسی شاخص TWI نیز بیانگر بیشترین سطح لغزشی در کلاس رطوبت متوسط می‌باشد. می‌توان چنین استنباط نمود که در رطوبت‌های پایین، افزایش مقاومت برشی سطح لغزنده مانع وقوع زمین لغزش شده و در رطوبت‌های بالاتر پوشش مناسب سبب این موضوع می‌شود. نتایج پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش بر اساس مدل فاصله ماهالانوبیس (شکل ۳ و جدول ۲) نشان می‌دهد که بیش از ۸۰ درصد سطح حوزه در منطقه با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته که لزوم توجه بیشتر مسئولین مربوطه را می‌طلبد. همچنین نتایج به دست آمده از آزمون‌های کای اسکور و ROC (جدول ۳ و شکل ۴) بیانگر کارایی مناسب روش فاصله ماهالانوبیس در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در حوزه آبخیز لتیان می‌باشد.

مرتع (۴۱۴۷/۹۲ هکتار) رخ داده است این در حالی است که نتایج برخی محققان [۲۸] نشان دهنده بیشترین وقوع زمین لغزش‌ها در کاربری‌های جنگلی است. دلیل این امر به وسعت زیاد اراضی مرتعی در حوزه آبخیز لتیان و رفت و آمدهای زیاد انسان و دام و در نتیجه دخالت زیاد در اکوسیستم‌های این نواحی بر می‌گردد. بررسی فاصله از رودخانه و جاده نشان می‌دهد که بیشتر زمین لغزش‌های اتفاق افتاده به ترتیب در فواصل ۰-۱۰۰ و ۵۰۰-۰ متری عوامل مذکور رخ داده است که به خوبی همبستگی وقوع زمین لغزش با حریم جاده و آبراهه را نشان می‌دهد. محققین به نقش مهم جاده سازی در وقوع زمین لغزش تأکید کرده‌اند [۱۴، ۲۱، ۲۶]. در تحقیقی دیگر [۳] نزدیکی به جاده را اولین و مهم‌ترین عامل مؤثر در وقوع زمین لغزش دانسته‌اند و عنوان کرده‌اند اکثر زمین لغزش‌ها در فاصله ۰-۱۰۰ متری از جاده متمرکز شده‌اند. برعکس بررسی عوامل فاصله از گسل و بالتبع PGA همبستگی خوبی بین این عوامل با وقوع زمین لغزش را نشان نمی‌دهد. در عامل سنگ شناسی سازند کرج که در منطقه مورد مطالعه متشکل از شیل و سیلتستون می‌باشد بیشترین مساحت زمین لغزش را به خود اختصاص داده است (۳۷۴۶/۵۱ هکتار). این سازندها به دلیل داشتن ذرات ریزدانه رس و مارن با جذب رطوبت مستعد لغزش شده و در روی دامنه به حرکت در می‌آیند. در عامل ارتفاع طبقه ارتفاعی ۲۳۰۰-۲۰۰۰ متر بیشترین سطح لغزشی (۱۲۹۶/۳۷ هکتار) را دارا است. به هر حال این که در یک محدوده ارتفاعی خاص زمین لغزش‌های بیشتری نسبت به ارتفاعات دیگر رخ داده است که نشان دهنده تأثیر ارتفاع بر وقوع زمین لغزش در حوضه است. چنانچه برخی محققین [۴] نیز در تحقیق خود ارتفاع را به عنوان مهم‌ترین عامل در وقوع حرکت‌های توده‌ای معرفی کرده‌اند. در هر صورت افزایش وقوع زمین لغزش در محدوده ارتفاعی مذکور احتمالاً به علت افزایش بارش در این محدوده ارتفاعی است که سبب افزایش رطوبت توده خاک و در نتیجه لغزندگی بیشتر این محدوده شده است.

References

- [1] Ahmadi, H., Esmaeeli, A., Feiznia, S. and Jafari, M. (2033). Zonation mass movements using Multivariate Regression (MR) and Analytical Hierarchy Process (AHP). The case study Garmchay basin. Iranian journal of Natural Resources, 4, 24- 34. (In Persian).
- [2] Attapoor, H. and Ahmadi, R. (2014). Landslide susceptibility zoning in north latyan catchment using hierarchical analysis, density level, overlapping index, informative value. Geological Engineering Journal, 3, 3003-3032.
- [3] Ayalew, L. and Ymagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakud-Yahiko Mountains, Central Japan. Geomorphology, 65, 15-31.
- [4] Bui, D.T., Lofman, O., Revhaug, I. and Dick, O. (2011). Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. Natural Hazards, 59 (3), 1413–1444.
- [5] Can, T., Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C., Sonmez, H. and Duman, Y. (2005). Susceptibility assessments of shallow earth flows triggered by heavy rainfall at three catchment's by logistic regression analysis. Geomorphology, 82, 250-271.
- [6] Caniani, D., Pascale, S., Sdao, F. and Sole, A. (2008). Neural networks and landslide susceptibility: a case study of the urban area of Potenza. Hazards, 45, 55–72.
- [7] Clerici, A., Perego, S., Tellini, C. and Vescovi, P.A. (2006). GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the conditional analysis method: the Baganza valley case study (Italian Northern Apennines). Environ. Geol, 50(7), 941–961.
- [8] Constantin, M., Bednarik, M., Jurchescu, MC. and Vlaicu, M. (2010). Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania), Environmental Earth Science. DOI 10.1007/s12665-010-0724-y, 10 pp.
- [9] Devkota, K.C., Regmi, A.D., Pourghasemi, H.R., Yoshida, K., Pradhan, B. and Ryu, I.C. (2013). Althuwaynee OF. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya. Natural Hazards, 65(1), 135-165.
- [10] Fall, M., Azam, R. and Noubactep, C.A. (2006). Multi-method approach to study the stability of natural slopes and landslide susceptibility mapping. Eng Geol, 82(4), 241–263.
- [11] Fattahi Ardakani, M.L., Ghayomian, J. and Jalali, N. (2003). Evaluation of the effectiveness of landslide risk zoning models in latyan catchment. Geological Engineering Journal, 1, 25-42.
- [12] Feiznia, S., Kalarostaghi, A., Ahmadi, H. and Safae, V.H. (2005). Factors affecting landslide occurrence and landslide hazard zonation in Shirin Rood basin, Sari. Iranian Journal of Natural resources, 57, 3-20.
- [13] Garcia-Rodriguez, M J. Malpica JA. Benito B. Diaz M. Susceptibility assessment of earthquaketriggered landslides in El Salvador using logistic regression. Geomorphology. 2008; 95: 172-191.
- [14] Greco, R., Sorriso, Valvo. And Catalano, E. (2007). Logistic regression analysis in the evaluation of mass movement's susceptibility case study: Calabria, Italy. Eng. Geol, 89, 47-66.
- [15] Highland L. And Bobrowsky PT: The landslide handbook: a guide to understanding landslides Reston, VA, USA: US Geological Survey. 2008: 129 p
- [16] Kalarostaghi, A., Habibnejad, M. and Ahmadi, H. (2007). The study of landslides in relation to changes in land use and road. The case study Tajan Basin in Saree. Journal of Geographical researches, 81-91. (In Persian)
- [17] Kouhpeima, A. (2017). Landslide susceptibility zonation, risk assessment and management (A case study: Latyan Watershed). Phd thesis, Tehran University, in press. (In Persian).
- [18] Kouli, M., Loupasakis, C., Soupios, P. and Vallianatos, F. (2010). Landslide hazard zonation in high risk areas of Rethymno Prefecture, Crete Island, Greece. Hazards, 52, 599–621.
- [19] Lee, S. and Choi, J. (2004). Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model. Intl. J. Geograph. Inform. Sci, 18(8), 789- 814.
- [20] Lee, E.M. and Jones, D.K. (2006). Landslide risk assessment. Thomas Telford. 2004; London: 454 p

- [21] Lee S. Sambath T. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models. *Environ. Geol*, 50, 847-855.
- [22] McLachlan, G.J. (1999). Mahalanobis distance, *RESONANCE*, pp. 20–26, Article accessed on 10th May 2013.
- [23] Mir Sanei, R.v. and Kardan, R. (2000). Analytical approach to the features landslide Country. Proceedings of First Conference on Environmental Engineering Geology of Iran. First edition, Tarbiat Moallem University, Tehran
- [24] Motavali, S., Esmali, R. and Hoseinzade, M.M. (2010). The susceptibility of landslide occurrence using Logistic Regression in Vaz catchment. *Quarterly Physical Geography*, 5, 73-83. (In Persian)
- [25] Nefeslioglu, H.A., Gokceoglu, C. and Sonmez, H. (2008). An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Eng. Geol*, 97, 171-191
- [26] Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y. and Durmaz, S. (2008). Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Easten Black Sea Region of Turkey), *Geomorphology*, 94, 401-418.
- [27] Neuhäuser, B. and Terhorst, B. (2007). Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW- Germany). *Geomorphology*, 86, 12–24.
- [28] Pourghasemi, H.R., Moradi, H.R., Mohamadi, M., Mostafazadeh, R. and Goli Garideh, A. (2013). Landslide hazard zoning using Bayesian theory. *Journal of Water and Soil Science*, 62, 109-121.
- [29] Regmi, N.R., Giardino, J.R. and Vitek, J.D. (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115, 172–187.
- [30] Shareat Jafari, H. (1996). Landslide (principles and foundation of natural slope stability). Sazeh publication. 148p. (In Persian)
- [31] Tsangaratos, P. and Benardos, A. (2014). Estimating landslide susceptibility through a artificial neural network classifier. *Natural Hazards*, 74(3), 1489-1516.
- [32] Yalcin, A. (2012). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey: comparisons of results and confirmations. *Catena*, 72, 1–12
- [33] Van Western, C.J. (2002). Use of weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping. 21 pp.
- [34] Zhu, C. and Wang, X. (2009). Landslide susceptibility mapping: A comparison of information and weights-of-evidence methods in Three Gorges Area. *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*, DOI 10.1109/ESIAT.2009. 187: 342-346.

