



## حساسیت به حرکات توده‌ای خاک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی و رگرسیون چند متغیره (مطالعه موردی: حوضه گرماب رود ساری)

محمد ابراهیم عفیفی

استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان، لارستان، ایران (نویسنده مسئول)

afifi.ebrahim6353@gmail.com

ابوالفضل بهنیا فر

دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد، مشهد، ایران

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۹

### چکیده

حرکت رو به پایین توده‌ای از خاک یا سنگ در اثر نیروی ثقل در دامنه‌ها زمین لغزش نامیده میشود. شناسایی مناطق حساس به زمین لغزش و خطرات آن یکی از گام‌های اول در مدیریت منابع طبیعی و برنامه ریزی توسعه است. هدف از این مطالعه، پیش بینی خطر زمین لغزش در حوضه گرماب رود ساری با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون چند متغیره، روش منطق فازی. موقعیت زمین لغزش‌ها از طریق مشاهدات میدانی و عکس‌های هوایی شناسایی شد. در مرحله بعد، عوامل احتمالی موثر بر زمین لغزش مانند ارتفاع، سنگ شناسی، شیب، جهت شیب، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده‌ها و فاصله از گسل‌ها، مقدار بارندگی و استفاده از زمین، تعیین شده‌اند. سپس، با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره برای تعیین اهمیت هر معیار، به وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه، اعمال شد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تاثیر شیب، فاصله زمین و فاصله از جاده است. برای ارزیابی مدل‌ها، منحنی عملکرد نسبی (ROC) و سطح زیر آن (AUC) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد دقت ۹۱/۵٪ برای مدل وزن شبکه عصبی مصنوعی، دقت ۳/۹۰٪ برای مدل رگرسیون چند متغیره، دقت ۲/۸۶٪ برای مدل گام فازی، دقت ۸۶٪ برای مدل اشتراک فازی، دقت ۴/۸۳٪ برای مدل جامعه فازی و دقت ۷/۸۰٪ برای مدل AHP. همچنین نتایج شاخص SCAI نشان دهنده میزان بیشتری از پایداری است. نقشه نهایی مربوط به مدل شبکه عصبی و رگرسیون چند متغیره نسبت به دو مدل دیگر است.

**کلمات کلیدی:** لغزش، حوضه گرماب رود، روش شبکه عصبی مصنوعی، مدل رگرسیون چند متغیره، روش فازی.



## مقدمه

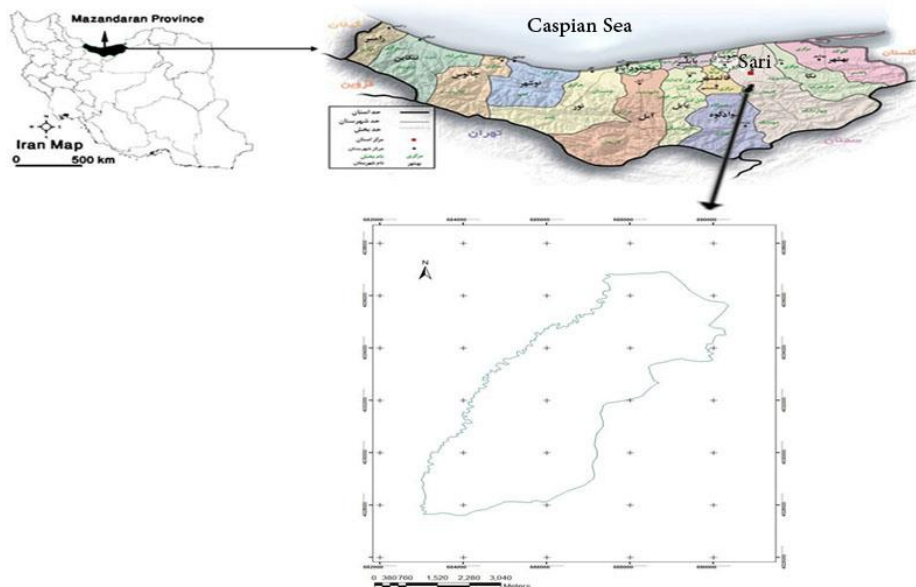
زمین لغزش در حقیقت حرکت رو به پایین توده‌ای از خاک یا سنگ در اثر نیروی ثقل در دامنه‌ها بوده و یکی از مهم‌ترین خطرات زمین‌شناختی محسوب می‌گردد. زمین لغزش‌ها نیز به‌عنوان یکی از انواع مخاطرات طبیعی خسارات اقتصادی - اجتماعی فراوانی به بار می‌آورند. گرچه به‌طور مطلق میزان خسارات اقتصادی ناشی از زمین لغزش‌ها در کشورهای پیشرفته بیشتر است، ولی طبق مطالعات انجام‌شده توسط UNDRC برای بسیاری از کشورهای در حال توسعه، این خسارات ۱-۲ درصد تولید هم از ناخالص ملی آن‌هاست بنابراین می‌توان نتیجه گرفت کشورهای در حال توسعه، هم از نظر جانی و هم از نظر اقتصادی به‌طور نسبی سهم بیشتری از خسارات این پدیده را متحمل می‌گردند. انسان با مسائل زیست محیطی فراوانی مواجه است. بلایای طبیعی جزئی از این مشکلات هستند. بلایای طبیعی سالانه موجب کشته و مجروح شدن صدها هزارتن و بی‌خانمان شدن میلیون‌ها نفر در سراسر جهان می‌شوند. رشد و توسعه شهرها به سوی زمین‌های با شیب بیشتر، تغییر کاربری اراضی و انجام عملیات عمرانی، سبب تغییر در شرایط طبیعی این زمین‌ها و تشدید پدیده‌ی زمین لغزش شده است. از این رو توجه به این پدیده، شناسایی، پیش‌بینی و کنترل آن به‌عنوان یکی از انواع مخاطرات محیطی در مدیریت پایدار حوضه‌های آبریز، امری ضروری به نظر می‌رسد. هم‌اکنون کشور ایران به‌عنوان کشوری در حال توسعه، از نظر وقوع بلایای طبیعی در شمار کشورهای مخاطره‌آمیز قرار دارد. زیرا از میان ۴۰ نوع حوادث و بلایای طبیعی، ۳۰ نوع آن در ایران امکان بروز و فعلیت دارد. در ایران در مورد خسارات ناشی از حرکات توده‌ای مطالعاتی صورت گرفته است. چنانچه خسارات ناشی از ۴۹۰۰ زمین لغزش ثبت شده از سال ۱۳۷۲ تا پایان شهریور ۱۳۹۲ در کشور ۱۲۷۸۹۵ میلیارد ریال برآورد گردیده است مرادی و همکاران (۱۳۸۸). ناپایداری یک دامنه به عوامل متعددی از قبیل لیتولوژی و نوع سنگ، هوازدگی و پوشش خاک سطحی، کیفیت خاک، شکل و شیب دامنه، وضعیت هیدرولوژی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی و فعالیت انسان‌ها روی دامنه بستگی دارد. بررسی پدیده ناپایداری دامنه‌ها در چارچوب تهیه شکل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش از یک سو به منظور شناسایی مناطق دارای پتانسیل بالای ناپایداری دامنه‌ای در محدوده‌های فعالیت بشری و از سوی دیگر جهت شناسایی مکان‌های امن برای توسعه زیستگاه‌ها و سکونت‌گاه‌های جدید و سایر کاربری‌های آتی انسان نظیر راه‌ها، مسیرهای انتقال نیرو، انرژی، نیروگاه‌ها و غیره و ارائه راه حل و کاربرد شیوه‌های کنترل و مدیریت مناسب انجام می‌گیرد. غنائی و همکاران (۱۳۹۴) به منظور تقسیم‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز طالقان، جهت شیب، سنگ شناسی، کاربری اراضی، بارندگی و فاصله از رودخانه، فاصله از خطا و فاصله از جاده برای منطقه بندی خطر زمین لغزش استفاده شد. پس از ساخت و تجزیه و تحلیل لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS، توابع عضویت فازی برای وزن کردن لایه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. لایه فازی تطبیق استاندارد در

محیط GIS و استفاده از عملگر منطق فازی نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش ایجاد شده است. نتایج این مطالعه نشان می دهد که عمل گاما ۰,۷ بیشتر از سایر عملگرهای فازی مناسب است. بر این اساس ۱۸,۹۱ درصد از این ناحیه به عنوان مناطق پر خطر ارائه شده است. صفاری و همکاران (۱۳۹۴)، با هدف ارزیابی خطر زمین لغزش در منطقه مسکونی جیرفت با استفاده از دو روش منطق فازی و شبکه عصبی مورد بررسی قرار گرفت.

## مواد و روش ها

### محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در محدوده ۶۲/۰۷ کیلومتر مربع در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۰۶ دقیقه و ۵۳ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۲۷ دقیقه و ۵۰ ثانیه عرض شمالی و طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۰ دقیقه و ۱۲ ثانیه تا ۵۳ درجه و ۶ دقیقه و ۴ ثانیه طول شرقی واقع در شرق شهرستان ساری واقع است. (شکل ۱) آب و هوای منطقه مرطوب است و میانگین دمای سالانه حداقل ۹,۶ درجه سانتی گراد است.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

مراحل تحقیق در منطقه مورد مطالعه به شرح زیر است:

### تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره

(۱) تهیه اسلاید زمین منطقه؛ (۲) تعیین عوامل موثر در وقوع زمینی لغزش؛ (۳) ارائه لایه های اطلاعات مربوط به عوامل موثر بر وقوع زمینی لغزش؛ (۴) اطلاعات کمی از اطلاعات کیفی، (۵) محاسبه وزن کلاس های مختلف

هر یک از عوامل (۶) ادغام داده ها با نرم افزار آماری و مطلوبیت آماری چند متغیری با استفاده از Minitab، نرم افزار Spss، (۷) تعیین عوامل موثر و استخراج ضرایب مرتبط به هر کدام از آنها، (۸) اعمال ضرایب به دست آمده در لایه های اطلاعات، (۹) تهیه نقشه زون یابی حساسیت به لغزش در منطقه مورد مطالعه.

### تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از روش منطق فازی

استفاده از مدل منطق فازی در پهنه بندی زمین لغزش که بر اساس تجزیه و تحلیل شبکه، هر پیکسل برای هر معیار، بر اساس تابع ایده آل میباشد که مقدار عضویت صفر است. برای تهیه نقشه حساسیت زمینی لغزش بر اساس روابط عملگرهای حاکم و طبقه بندی آن در مناطق مختلف حساسیت با توجه به تغییرات منحنی هیستوگرام کشیده می شود. مراحل حساس سازی زمین لغزش با استفاده از منطق فازی نشان داده شده در شکل (۲).

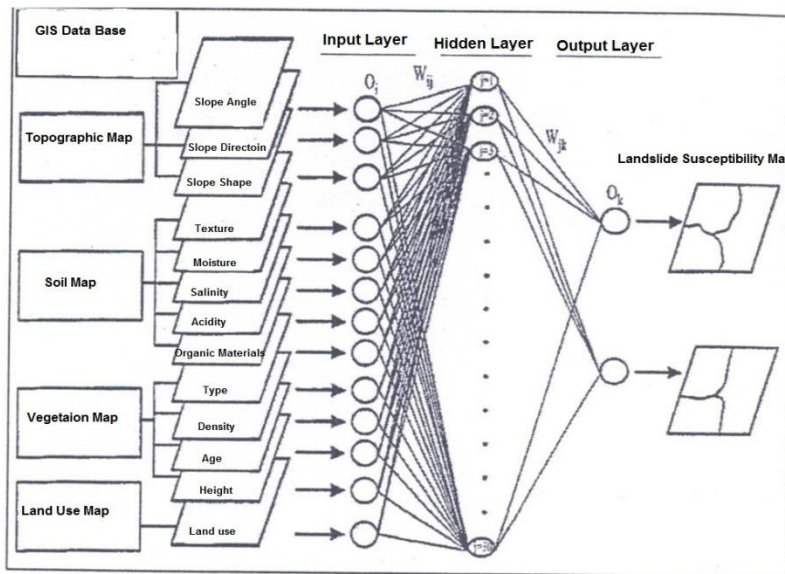


شکل (۲): مراحل ارزیابی نقشه حساسیت زمینی لغزش با استفاده از روش منطقی فازی

در این تحقیق پس از تعیین درجه عضویت هر یک از معیارها، پنج عامل فازی از جمله جامعه فازی، اشتراک فازی، جبر فازی ضرب، جمع جبری فازی و عملگر گاما فازی برای تهیه نقشه خطر حوضه استفاده می شود.

### تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

منطقه بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب در ۱۰ مرحله (۱) تعیین نوع شبکه (چند لایه ی ۲ (perceptron) نحوه ی ورود به داده ها در برنامه ۳) انتخاب نمونه برای آموزش و تست شبکه، ۴) تعیین تعداد پیکسل ها جهت آموزش و آزمایش شبکه، ۵) تعیین تعداد نوروں ها در لایه پنهان، ۸) نسبت یادگیری، ۷) انتخاب تعداد تکرار، ۶) انتخاب عملکرد فعال، ۹) توزین طبیعی است و ۱۰) وزن تعیین می شود (مرادی و همکاران، ۱۳۹۱).



شکل (۳): ساختار شبکه عصبی مصنوعی برای پهنه بندی حرکات توده ای

- طراحی شبکه عصبی مصنوعی

در این مطالعه، با توجه به تمام عوامل مرتبط با لغزش، یک شبکه عصبی مصنوعی با کمک نرم افزار Matlab طراحی شده است. شبکه MLP برای پیش بینی استفاده شد و توابع آستانه مختلف برای تعیین حالت مطلوب آن مورد بررسی قرار گرفتند. آنها عبارتند از:

(A) تابع sigmoid لگاریتمی

$$Y_i = \frac{1}{1 + \exp(-X_j)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

(ب) عملکرد مماسی سیگموئید

$$Y_i = \frac{2}{(1 + \exp(-2X_j)) - 1} - 1 \quad \text{رابطه (۲)}$$



### مقایسه مدل های پهنه بندی حساسیت به لغزش (تجزیه کمی از نقشه های حساسیت زمین لغزش)

نتایج تقسیم بندی حساسیت به لغزش عموماً در قالب نقشه هایی است که مناطق مختلف ریسک را در منطقه نشان می دهد، بسته به تعداد کلاس های خطر در منطقه، با شرایطی مانند حساسیت بسیار پایین، حساسیت کم، حساسیت متوسط، حساسیت بالا یا حساسیت بسیار بالا معرفی می شوند. پس از انطباق نقشه های منطقه بندی، حساسیت لغزش در مدل های مختلف نقشه ها با نقشه توزیع این حرکات در منطقه، اگر درصد شکست در کلاس های پر خطر افزایش یابد و روند صعودی نشان می دهد که روش مورد استفاده برای حساس سازی لغزش مناسب است اگر این روند کاملاً یا تقریباً یکسان باشد، نشان دهنده عملکرد ضعیف این مدل است. برای مقایسه کلاس های حساسیت مختلف در هر نقشه، به طور مستقل، نسبت فشرده سازی یا  $Dr$  استفاده می شود.

$$Dr = \frac{\sum_1^n Si / Ai}{\sum_1^n Si / \sum_1^n Ai} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این راستا،  $Dr$  نسبت تراکم برای هر کلاس حساسیت است،  $Si$  ناحیه لغزش در هر کلاس حساسیت است، و  $Ai$  محدوده هر درجه حساسیت و  $n$  تعداد کلاس های حساسیت به لغزش است. کلاس دارای نسبت فشرده سازی ۱ است که معادل چگالی متوسط لغزش ها در کل منطقه است و کلاس دارای نسبت فشرده سازی ۲ است و دارای چگالی زمین لغزش ها دو برابر ارتفاع چگالی زمین لغزش منطقه است. بنابراین، اگر جدایی بین کلاس های حساسیت با یک شاخص نسبت فشرده سازی بهتر انجام شود، نقشه مطلوب تر است. اگر چند نقشه در یک منطقه ساخته شده باشد، با استفاده از ابزار جمع (کیفیت) (یا  $QS$ )، نقشه های دقیق تر و بهتر می تواند شناسایی شود. مجموع ارزش های سودمند نشان دهنده سود عملکرد مدل در پیش بینی خطر حرکات توده ای در منطقه مطلوب است. به طور معمول، این شاخص برای مدل های مختلف در محدوده ۰ تا ۷ است. گرچه از لحاظ نظری هیچ محدودیتی برای آن وجود ندارد.  $QS$  بیشتر در مدل ها ارزیابی می شود، مدل دارای ابزارهای بیشتری در جدول بندی است. مجموع شاخص شاخص سود ( $QS$ )، از معادله زیر بدست می آید.

$$Qs = \sum_1^n [(Dr - 1)^2 \cdot S] \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این راستا،  $QS$  مجموع ابزار یا کیفیت، نسبت  $Dr$ ،  $N$  تعداد کلاس های خطر، و نسبت  $S$  از منطقه هر رده ریسک به کل منطقه است.

### پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

ابتدا، با توجه به عواملی که برای پهنه بندی موثر در نظر گرفته می شوند و سپس رتبه بندی هر کلاس مربوط به هر یک از عوامل، ضرایبی را که مدل نهایی ارائه می شود، رتبه بندی کرد.

جدول (۱) مقادیر عددی در یک سیستم یکپارچه برای مقایسه زوجی

مقادیر عددی	درجه اهمیت
۹	کاملاً مهم
۷	اهمیت بسیار زیاد
۵	اهمیت زیاد
۳	کمی بهتر
۱	مطلوب
۲، ۴، ۶ و ۸	اولویت بین مقادیر

در روش شناسی مورد بحث، خطر فرود براساس جدول ۲ است.

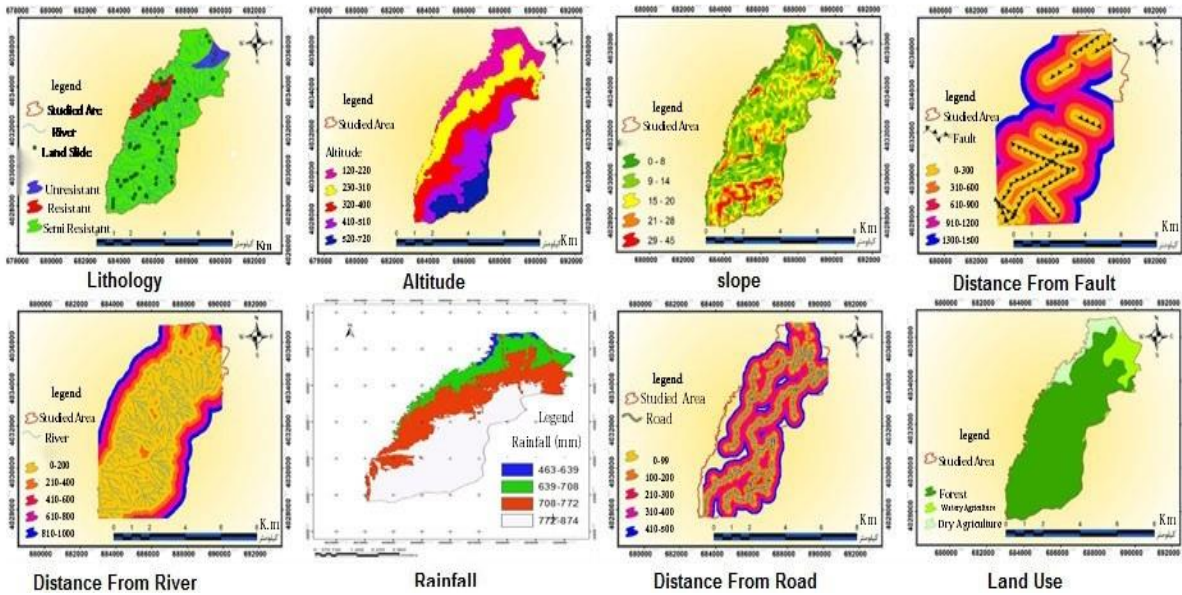
جدول (۲) طبقه بندی خطرات زمین لغزش بر اساس روش AHP

ارزیابی خطر	دامنه امتیازات	امتیاز کلاس (M)
ناتمام	۲۰-۰	۱
کم خطر	۴۰-۲۰	۲
خطر متوسط	۶۰-۴۰	۳
خطر بالا	۸۰-۶۰	۴
بسیار خطرناک	۱۰۰-۸۰	۵

### نتایج

به منظور تهیه یک نقشه آسیب پذیری، تعداد ۸ کنترل کننده براساس رابطه نزدیک آنها با وقوع زمین لغزش در منطقه انتخاب شدند که این عوامل شامل سنگ شناسی، شیب، جهت شیب، استفاده از زمین، بارش، فاصله از گسل ها، فاصله از جاده و ارتفاع است و پس از انتخاب عوامل، هر عامل به چندین طبقه تقسیم می شود. برای ارائه لایه های مختلف عوامل و ارزیابی موضوعی در محیط GIS از نقشه های زمین شناسی، داده های بارش، عکس های هوایی، تصاویر ماهواره ای از منطقه مورد مطالعه و مشاهدات میدانی استفاده شده است. در گام بعدی به ترتیب به ردیف لایه ها و کلاس های هر لایه وزن اختصاص داده شد. برای این منظور از روش تحلیلی با استفاده از نرم افزار ARC GIS استفاده شده است. سپس بر اساس همپوشانی نقشه های موضوعی،

با استفاده از وزن های به دست آمده از این روش، نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه گرماب رود ساری به دست آمد.



شکل (۴): نقشه حساسیت پارامترهای مهم زمین لغزش با مدل AHP در حوضه گرماب رود ساری

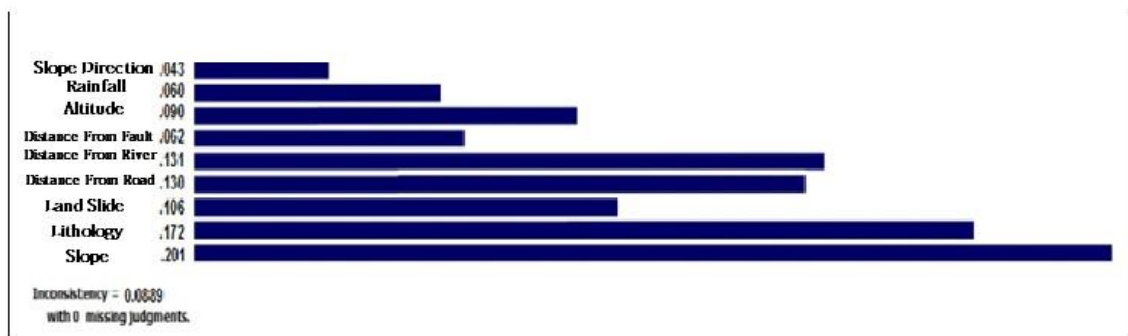




اولویت بندی عوامل موثر بر لغزش با استفاده از روش تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی

جدول (۳): ماتریس وزن برای معیارها

معیارهای	فاصله از جاده	شیب دامنه	جهت شیب	طبقه ارتفاع	سنگ شناسی	کاربری اراضی	فاصله از رودخانه	فاصله از گسل	بارش
فاصله از جاده	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۲
شیب دامنه	۱	۱	۳	۱	۲	۳	۲	۲	۴
جهت شیب	۱,۲	۱,۳	۱	۳	۳	۱	۵	۳	۴
طبقه ارتفاع	۱	۱	۱,۳	۱	۱	۲	۱	۲	۳
سنگ شناسی	۱,۲	۱,۲	۱,۳	۱	۱	۳	۲	۱	۳
کاربری اراضی	۱,۲	۱,۳	۱	۱	۱,۳	۱	۲	۲	۴
فاصله از رودخانه	۱,۲	۱,۲	۱,۵	۱	۱,۲	۱,۲	۱	۳	۱
فاصله از گسل	۱,۲	۱,۲	۱,۳	۱,۲	۱	۱,۲	۱,۳	۱	۳
بارش	۱,۳	۱,۴	۱,۴	۱,۳	۱,۳	۱,۴	۱	۱,۳	۱



شکل (۵): نمایشگر گرافیکی برای هر یک از عوامل موثر با نرم افزار Select Expert

- تلفیق لایه ها

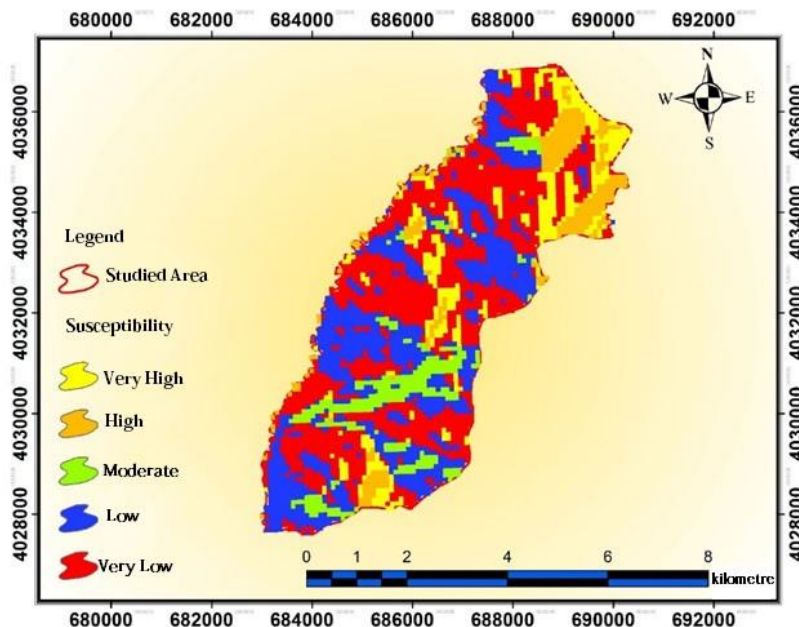
در این مرحله، ترکیبی از لایه های موثر شناسایی شده در زمین لغزش نقشه حساسیت به زمین لغزش گرماب رود تهیه گردید.

رابطه (۵):

$$AHP = 9394234 * aspect + 939891 * rain + 939191 * dem + 939821 * disfulte + 931318 * disriver + 931394 * disroad + 931984 * land use + 931724 * lithology * + 932911 * slope$$

### ترسیم نهایی پهنه بندی در مدل AHP

پس از مقایسه جفت معیارها در نرم افزار Expert Select و محاسبه وزن نسبی و نهایی در محیط Arc GIS نقشه پهنه بندی خطر لغزش تهیه شد.

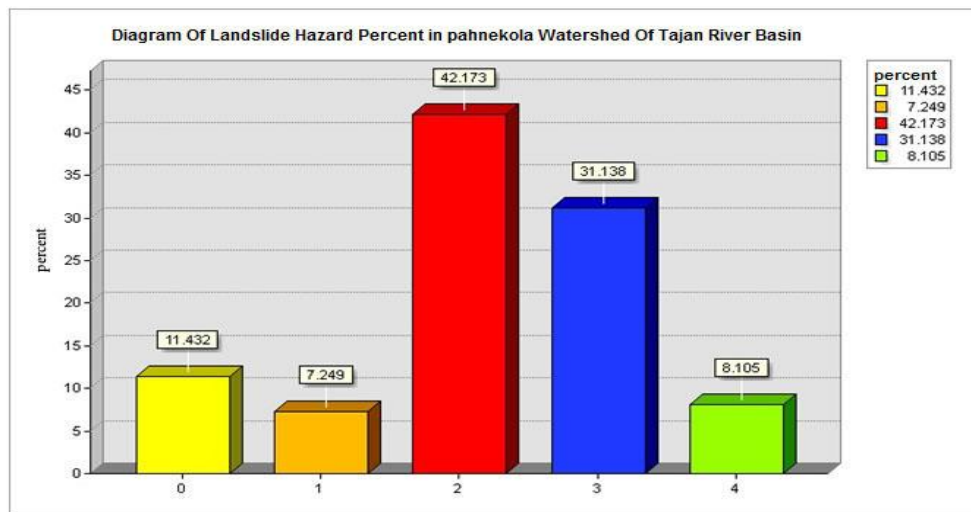


شکل (۶): نقشه حساسیت به زمین لغزش در حوضه گرماب رود ساری از روش AHP

نتایج نقشه پهنه بندی خطر لغزش با استفاده از مدل AHP در شکل (۶) ارائه شده و نشان می دهد که ۱۸/۶۷ درصد از منطقه در منطقه خطر بالا قرار دارد. با این نقشه، مناطق خطرناکی از مناطق کم خطر و چگونگی استفاده آنها، و توسعه ساختارهای مهندسی عمران و جلوگیری از آسیب های زمینی لغزش می توانند شناسایی شوند.

جدول (۶): درصد کلاس خطر زمین لغزش در حوضه گرماب رود با استفاده از روش AHP

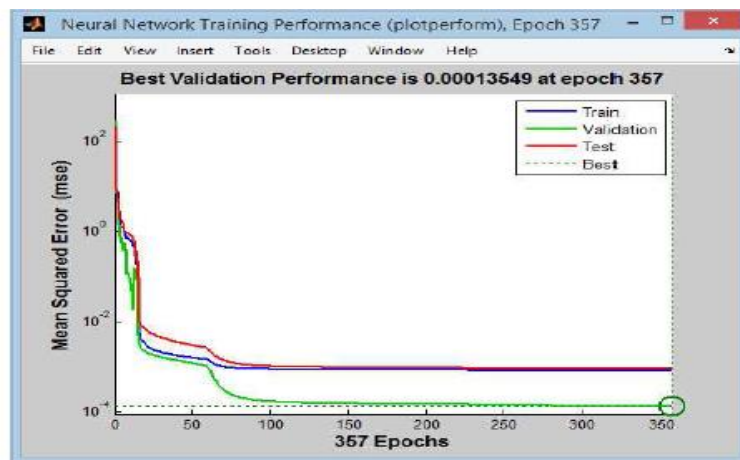
درصد ناحیه	درصد خطر
۱۸،۶۷	خیلی زیاد
۷،۲۴	زیاد
۳۴،۸۶	متوسط
۳۱،۱۳	کم
۸،۱۰	خیلی کم



نمودار (۱): حساسیت زمین لغزش در حوضه گرماب رود با استفاده از روش AHP

- بررسی میزان خطای شبکه عصبی آموزش داده شده

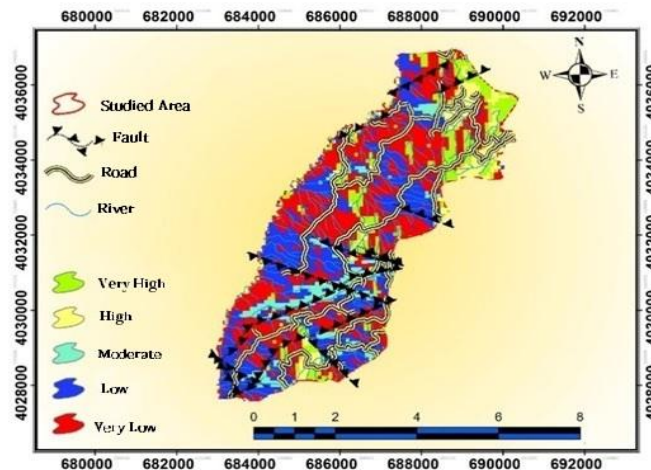
پس از اتمام آموزش، اکنون باید با اطلاعاتی که در آموزش استفاده نشده است، آزمایش شود و میزان خطای واقعی تعیین شود.



شکل (۷): کاهش در طول آزمایش

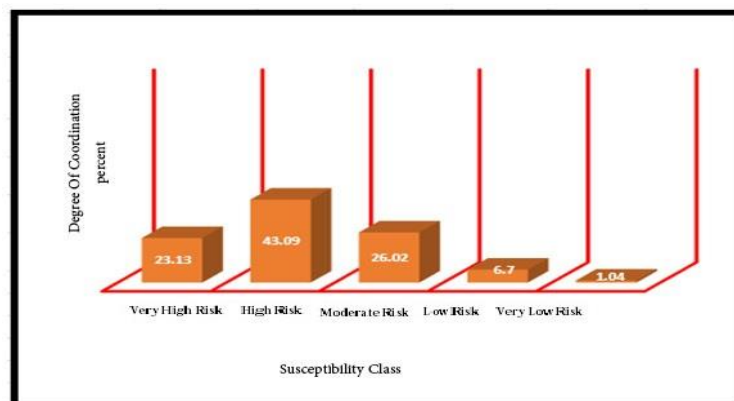
به منظور ارزیابی شبکه عصبی ایجاد شده، پارامترهای موثر زمین لغزش تهیه شده و سیستم پهنه بندی منطقه ۴۰ تحقیق معرفی شد. این پایگاه داده شامل اطلاعات در مورد شیب، جهت شیب، سنگ شناسی، مدل ارتفاع دیجیتال، بارندگی، فاصله از خطا و استفاده از زمین و ... منطقه است. این داده ها برای تغذیه شبکه عصبی ایجاد شده، بر اساس بیشترین مقدار داده موجود در پایگاه داده بین صفر و یک نرمال شده است. سپس داده های نرمال شده به یک پیوند (forward) ارسال می شود. (انتشار خطا) شبکه عصبی. به طور خلاصه، ابتدا پارامترهای ورودی استخراج شده و شبکه عصبی توسط الگوریتم پخش خطا ارائه شد. سپس کارایی یادگیری

شبکه مورد آزمایش قرار گرفت. ساختار نهایی شبکه دارای ۷ نرون در لایه ورودی، ۲۰ نرون در لایه میانی و ۱ نرون در لایه خروجی است. دقت شبکه در حدود ۹۱/۲۵ تخمین زده شد. پس از بهینه سازی ساختار، تمام اطلاعات شبکه به شبکه ارائه شد. خروجی حاصل از شبکه عصبی با اختلاف ۰,۲ به پنج دسته با ریسک بسیار بالا، بالا، متوسط و کم و بسیار پایین تقسیم شد. در نهایت نقشه نهایی آن با ArcGIS ۱۰,۳ تهیه شد (شکل ۸).



شکل (۸): منطقه پهنه بندی حساسیت زمین لغزش در حوضه گرماب رود با روش شبکه عصبی

نمودار (۲): درجه همبستگی منطقه پهنه بندی حساس به روش شبکه عصبی

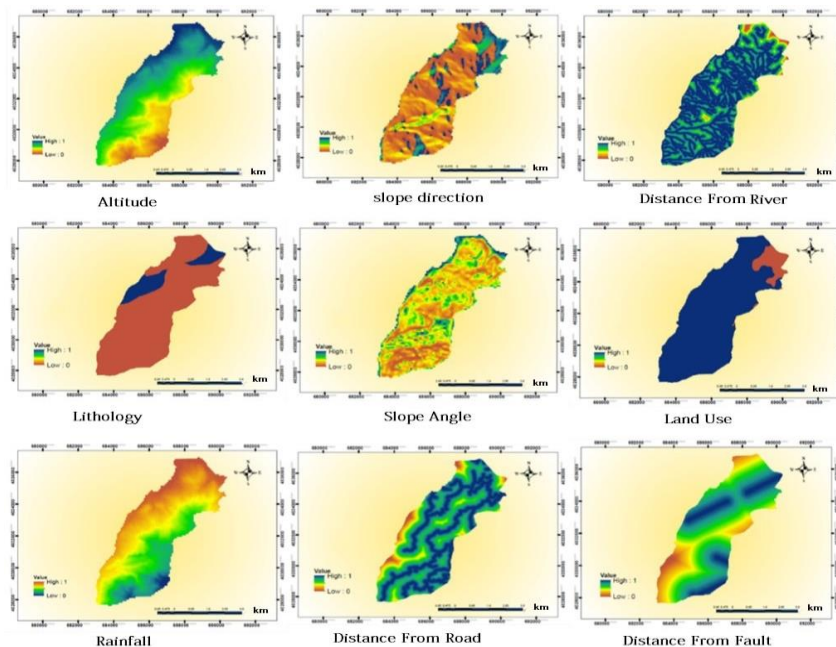


جدول ۷: درجه هم بستگی حساس به زمین لغزش به روش شبکه عصبی

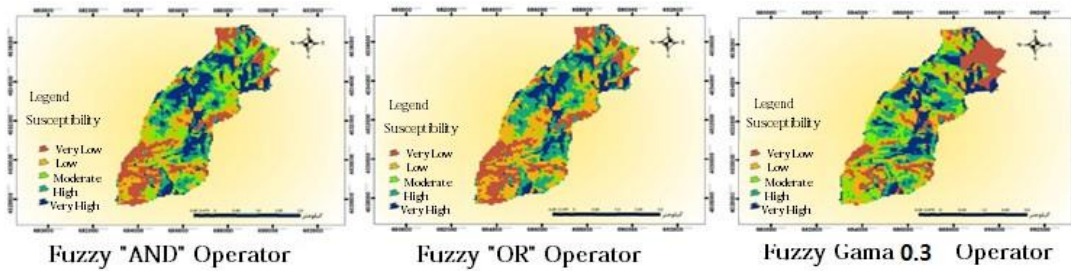
نوع تابع	پارامتر
قوسی	شیب دامنه
قوسی	کاربری اراضی
خطی	فاصله از شبکه رودخانه
سطحی	بارندگی
سطحی	سنگ شناسی
قوسی	جهت دامنه
خطی	ارتفاع
خطی	فاصله از گسل
خطی	فاصله از جاده

## کدهای فازی

نتایج فازی سازی عوامل موثر بر خطر زمین لغزش با استفاده از توابع عضویت فازی در شکل های زیر نشان داده شده است.



شکل (۹): نقشه استاندارد فازی شده پارامترهای لغزشی



شکل (۱۰): نقشه حساسیت لانسلید به روش فازی

جدول ۸: محدوده و درصد کلاس های حساس به زمین لغزش در حوضه گرماب رود ساری توسط عملگر فازی

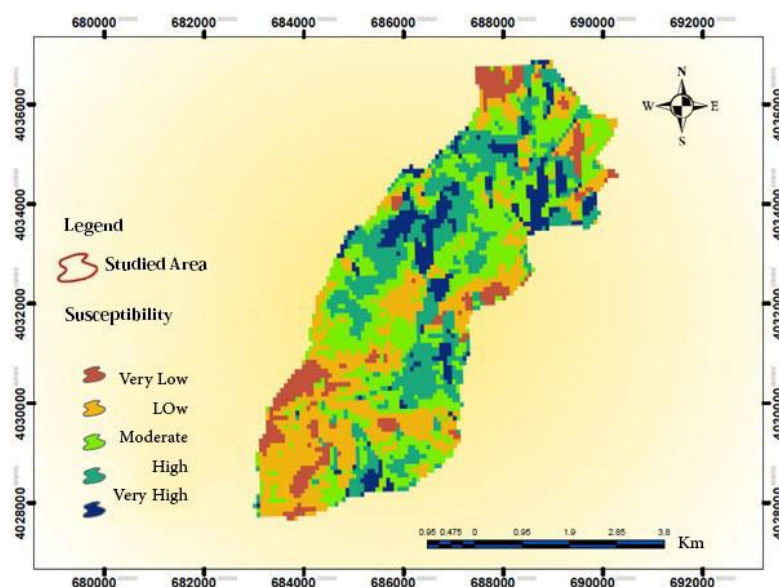
گامای فازی ۰,۳		فازی OR		فازی AND		کلاس های پهنه بندی
درصد	مساحت هکتار	درصد	مساحت هکتار	درصد	مساحت هکتار	
۴۵,۲۷	۸۵۲	۳۰,۳۶	۶۹۳	۱۸,۱۹	۵۹۰	خیلی زیاد
۲۰,۷۳	۸۶۷	۲۵,۲۷	۹۱۷	۱۹,۷۱	۸۳۴	زیاد
۲۰,۱۲	۷۵۰	۸,۵۴	۷۳۱	۳۲,۶۴	۸۶۴	متوسط
۶,۰۶	۵۲۱	۱۵,۷۶	۵۷۶	۱۶,۶۴	۶۷۳	کم
۷,۸۰	۲۵۳	۲۰,۰۵	۳۲۶	۱۲,۸۰	۳۱۸	خیلی

به منظور اجرای مدل در نرم افزار SPSS، وزن ها به شکل ASCII تبدیل شده و به نرم افزار SPSS منتقل می شوند. ضرایب هر معیار بر اساس جدول ۸ محاسبه شد. ضریب مثبت نشان می دهد که متغیرهای مستقل بیشتر در معرض لغزش قرار می گیرند و همچنین ضریب منفی احتمال متغیر مستقل در زمین لغزش را نشان می دهد.

جدول ۹: ضرایب حاصل از مدل رگرسیون چند متغیره

عامل	ضریب	انحراف معیار
مقدار ثابت	۰,۳۷۶	۰,۰۳۷
جهت شیب	۰,۰۱۱	۰,۰۱۹
ارتفاع	۰,۰۱۶	۰,۰۰۶
فاصله از گسل	۰,۰۱۳	۰,۰۰۷
سنگ شناسی	۰,۰۲۶	۰,۰۰۷
کاربری اراضی	۰,۰۱۸	۰,۰۰۴
فاصله از رودخانه	۰,۰۲	۰,۰۱۳
بارندگی	۰,۰۰۱	۰,۰۱۴
فاصله از رودخانه	۰,۰۰۷	۰,۰۰۷
زاویه شیب	۰,۰۲۸	۰,۰۰۶

بر اساس نتایج بدست آمده از این مدل، تمام معیارها بر روی ارزیابی لغزش اثر مثبت دارند. بر اساس ضرایب به دست آمده، بیشترین تاثیر را روی زاویه شیب و سنگ شناسی و حداقل اثر فاصله از رودخانه و بارندگی در پتانسیل زمین لغزش است. (جدول ۸). در نهایت، با استفاده از ضرایب وزن حاصل از جدول (۸) و کاربرد آنها در هر دسته از نقشه های عملیاتی در محیط ArcGIS، نقشه زمین لغزش به دست آمد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: نقشه حساسیت زمین لغزش بر اساس رگرسیون چند متغیره

منطقه و درصد خطر حساسیت زمین لغزش در حوضه براساس از روش رگرسیون چند متغیره در جدول ۹ نشان داده شده است.



جدول ۱۰: محدوده و درصد کلاسهای حساس به لغزش با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره

محدوده کلاس	مقدار کلاس (ha)	درصد از کلاس ها
خیلی زیاد	۸۵۲	۲۵,۲۷
زیاد	۸۶۷	۲۰,۷۳
متوسط	۷۵۰	۴۰,۱۲
کم	۵۲۱	۶,۰۶
خیلی کم	۲۵۳	۷,۸۰

### ارزیابی مدل های پهنه بندی

به منظور ارزیابی کارایی مدل های ارائه شده در این مطالعه، میزان آمادگی برای ارزیابی موفقیت مدل ها مطابق با ویژگی های هر کدام از آنها، میزان مناسب بودن تجزیه و تحلیل مبتنی بر سازگاری فضایی بین نقشه گرفته شده از روش و لغزش (گابریل، ۲۰۱۱: ۶۹). درجه تناسب بیانگر عملکرد مدل با ارزیابی خطای نسبی و موفقیت نسبی است.

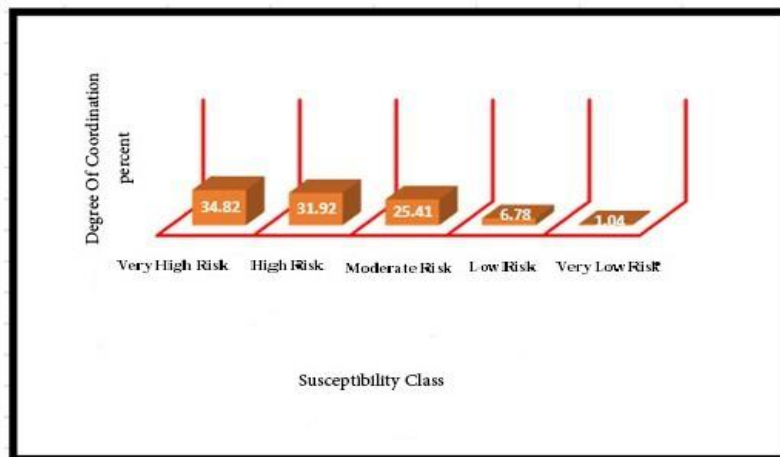
خطای مربوطه:

"جمع آوری ارزش کلاس های پیشین کم و خیلی کم" و ارزیابی موفقیت نسبی موفقیت: "خلاصه ارزش کلاس های استعداد بالا و بسیار بالا". کمترین خطای نسبی و بالاترین میزان موفقیت نسبی، بهترین مدل و بهترین نقشه چهار مدل فوق است.

- مدل سلسله مراتبی AHP

نتایج نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل AHP نشان داد که حدود ۶۶ درصد از حوضه آبخیز در مناطق بسیار زیاد و خطر بالا و ۳۴ درصد از حوضه ها در مناطق خطرناک، بسیار کم و متوسط بوده است (نمودار ۳)





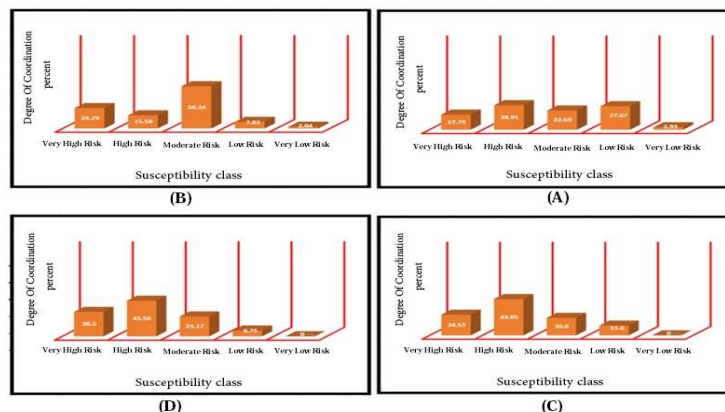
نمودار (۳): نتیجه درجه مناسب مدل AHP با زمین لغزش

### نتیجه درجه مناسب مدل AHP با زمین لغزش

همانطور که قبلاً ذکر شد، وزن نسبی با توجه به معیار شیب، سنگ شناسی، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، استفاده از زمین، ترتیب به شیب، جهت شیب و کلاس های بارش  $0 / 0.4334, 0 / 0.0629, 0.0609$  /  $0.0901$ ،  $0.1316, 0.1304, 0.1064$  /  $0.2019, 0.1742$ ، ارتفاع محاسبه شده است که شیب دارای بالاترین وزن است و بیشترین تاثیر را در میان عوامل موثر بر لغزش دارد و بیشترین تاثیر را در منطقه بندی دارد، به طوری که بر سایر عوامل تأثیر می گذارد.

### نتیجه مقایسه درجه از عملگر منطق فازی با زمین لغزش

در این مطالعه، پهنه بندی خطر لغزش در زیر حوضه گرماب رود ساری با استفاده از عملگر منطق فازی انجام شد. نتایج ارزیابی درجه عملگر منطق فازی با لغزش در نمودار ۴ نشان داده شده است.



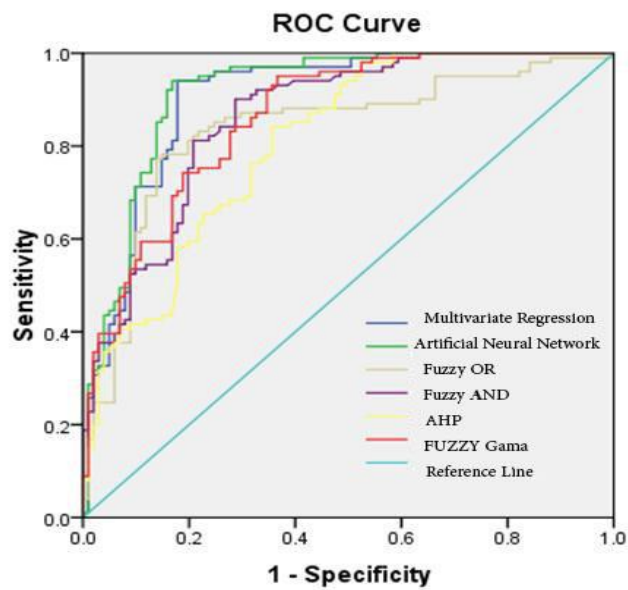
نمودار (۴). الف) درجه مناسب فازی و مدل با زمین لغزش، ب) درجه مقایسه مدل منطق جبری فازی با لغزش

ج) مدل مجموع جبری فازی با زمین لغزش د) نتیجه مدل گاما فازی ۰,۳

بر اساس نمودار (۴)، نتایج نشان می‌دهد که صحت زون ریسک لغزش با استفاده از عملگر سهم فازی همیشه کم و غیر قابل اطمینان است به دلیل حداقل ارزش عضویت هر عامل در هر نقطه. بیش از ۳۰ درصد از حوضه خطرناک و بسیار کم است (نمودار ۴). در عملگر جبر فازی، تعدادی از عوامل وزن دهی نیز به صفر و حدود ۱۰ درصد از حوضه در کلاس‌های پایین و بسیار خطرناک اضافه می‌کنند (شکل ۴). در عملگر تنظیم فازی، دقت نقشه به دلیل در نظر گرفتن حداکثر مقدار عضویت در هر نقطه، کمینه و غیر قابل اطمینان است، به طوری که حدود ۶۷ درصد از سطح حوضه در خطر سطوح بالا و بسیار بالا است. عملگر فازی دارای ارزش پیکسل به سمت یک است و دقت بسیار کمی در تعیین توانایی مناطق لغزنده دارد (شکل ۴ (C) ارزیابی عملگرهای مختلف مدل فازی و AHP با استفاده از نقشه توزیع لغزش نشان داد که مدل فازی گاما ۰,۳ بهترین مدل برای تعیین قابلیت لغزش لغزش است (شکل ۴). با توجه به اختلاف شدید بین نتیجه استفاده از عملگرهای جمع جبری مبهم با ضرب فازی و برای به دست آوردن نتیجه مناسب تر و تعدیل حساسیت بالا از ضریب عملگر فازی و حساسیت بسیار کم از جمع جبری از فازی گاما، بین این دو عملگر استفاده می‌شود. این مطالعه نشان می‌دهد که در عملگر فازی ۰,۳ توزیع زمین لغزش زیاد است. همانطور که ۶۹ درصد از حوضه آبریز در سطوح خطر بالا و بسیار بالا است و حدود ۷ درصد از حوضه در سطوح خطر پایین و بسیار پایین است.

### تاییدیه

برای ارزیابی مدل پیشنهادی، منحنی عملکرد نسبی (ROC) مورد استفاده قرار گرفته است (پورقاسمی ۲۰۱۲؛ پورتنقی و همکاران، ۲۰۱۴). منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از تعادل بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار ممکن است (پورقاسمی، ۲۰۱۳). شاخص عملکرد نسبی منحنی اجزای عمودی و افقی است که از ماتریس مقایسه با تعریف آستانه بین صفر و یک حاصل می‌شود. سطح زیر منحنی ROC، AUC نامیده می‌شود، نشان دهنده ارزش پیش بینی سیستم با توصیف توانایی آن برای ارزیابی دقیق وقایع رخداد (وقوع زمین لغزش) و (عدم وقوع) زمینی لغزش است. در ارزیابی مدل‌های پهنه بندی خطر لغزش، شیب‌های مشابهی که در منطقه بندی استفاده می‌شود نمی‌توانند مورد استفاده قرار گیرند (Kamak ۲۰۰۶)، از این رو، از ۱۷۶ لغزش، ۷۰٪ (۱۲۴ امتیاز) از این تعداد برای مدل سازی و ۳۰٪ (۵۲ امتیاز) از نقاط برای ارزیابی مدل استفاده شد (Pradhan et al., ۲۰۰۹, Zare et al., ۲۰۱۳). برای دستیابی به یک مدل منطقه ای مناسب برای شهر ساری، منحنی ROC مورد استفاده قرار گرفت. در ارزیابی ROC، اگر سطح منحنی بالا باشد، دقت مدل نیز بالاتر است. همچنین بین ۰,۵ تا ۱ متغیر است. به طور کلی، تقسیم ۰,۹ - ۱، عالی، ۰,۸ - ۰,۹، بسیار خوب، ۰,۷ - ۰,۸، خوب، ۰,۶ - ۰,۷، متوسط و ۰,۵ - ۰,۶، ضعیف برای آن ارائه شده است. منحنی ROC برای شش مدل در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲: منحنی ROC و سطح زیر آن

نتایج نشان می دهد دقت ۰,۹۱۵ برای مدل شبکه عصبی، دقت ۰,۹۰۳ برای مدل رگرسیون چند متغیر، دقت ۰,۸۶۲ برای مدل فازی گاما، ۰,۸۶ برای مدل منطق فازی، دقت ۰,۸۳۴ برای اجتماع فازی، و دقت ۰,۸۰۷ برای مدل AHP. دقیق ترین روش شبکه عصبی است. نتایج دقت روش های ذکر شده با انحراف استاندارد آنها در جدول ۱۰ نشان داده شده است.



جدول ۱۱: نتایج محاسبه منحنی ROC منطقه زیر منحنی

تست نتیجه متغیر (ها)	مساحت	خطای استاندارد	Sig.b متضاد	همبستگی اطمینان ۹۵٪	
				حد پایین	حد بالا
رگرسیون چند متغیره	.۹۰۳	.۰۲۲	.۰۰۰	.۸۶۰	.۹۴۷
شبکه های عصبی مصنوعی	.۹۱۵	.۰۲۱	.۰۰۰	.۸۷۵	.۹۵۶
فاز OR	.۸۳۴	.۰۳۰	.۰۰۰	.۷۷۵	.۸۹۳
فاز AND	.۸۶۰	.۰۲۶	.۰۰۰	.۸۱۰	.۹۱۰
AHP	.۸۰۷	.۰۳۰	.۰۰۰	.۷۴۹	.۸۶۶
گاما فازی ۰,۳	.۸۶۲	.۰۲۵	.۰۰۰	.۸۱۳	.۹۱۱

متغیر نتایج آزمون: EBF, FR دارای حداقل یک اتصال بین گروه حالت واقعی مثبت و گروه حالت منفی واقعی منفی است. آمار ممکن است منحرف شود

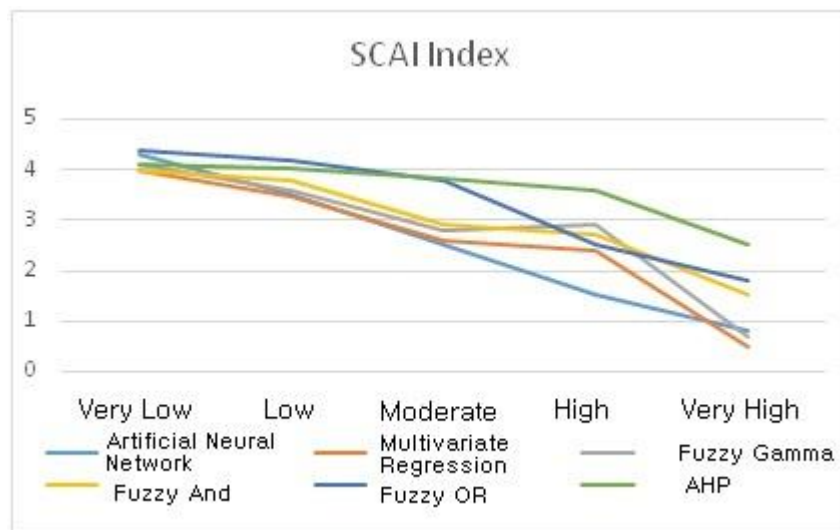
a. تحت فرض غیر پارامتری

b. ۰,۵ = فرض صفر: منطقه واقعی

به منظور اعتبار بین کلاس های نقشه نهایی هر مدل، شاخص SCAI مورد استفاده قرار گرفت:

$$SCAI = \frac{\text{percentage forecast area}}{\text{percentage landslide in each classe}}$$

درصد وقوع زمین لغزش در کلاسهای حساسیت بسیار بالا، این شاخص باید پایین باشد و باید در کلاسهای کم و بسیار حساسیتی بالاتر باشد. نتایج نشان می دهد که دقت طبقه بندی بین مدل های شبکه عصبی و رگرسیون چند متغیره بیشتر از سایر مدل ها است. نتایج این شاخص در نمودار (۱) نشان داده شده است.



نمودار (۱): نتایج شاخص SCAI در همه مدل ها

## نتیجه

هدف از پهنه بندی خطر زمین لغزش علاوه بر اکتشاف علمی برای کاهش آسیب پذیری از خطر زمین لغزش است. از مطالعه عوامل موثر بر وقوع زمین لغزش و تجزیه و تحلیل نمودارها، جداول و مدل های پهنه بندی و ارزیابی مدل ها، نتایج به شرح زیر اعلام میگردد.

۱. شیب دامنه یکی از عوامل موثر در ایجاد یک پدیده زمینی لغزش است. به طور معمول، دامنه هایی که دارای شیب بیشتری هستند احتمال بیشتری دارند که تحت شرایط مشابه قرار بگیرند. از آنجا که شیب دامنه ها حجم و وزن نسبی لغزش را بر روی سطح سطح لغزش افزایش می دهد و نیروی لغزش را افزایش می دهد. با افزایش شیب، درصد لغزش افزایش می یابد و دلیل این امر استفاده از مواد است زیرا در شیب زیاد معمولاً مواد سنگ هایی هستند که دارای مقاومت بیشتری هستند. ما نتیجه می گیریم که شیب نقش مهمی در وقوع زمینی لغزش دارد، به طوری که اگر یک واحد سنگ شناختی بسیار حساس در شیب کم قرار گیرد، زمین برای زمین لغزش وجود ندارد. مانند واحدهای کواترنری که از رسوبات حاصل برای حرکت تشکیل شده است، اما به علت قرار گرفتن در دامنه های کم، لغزش در آنها کمتر شده است.

۲. یکی دیگر از عواملی است که در بی ثباتی دامنه موثر است. متوسط بارش سالانه حوضه ۵۰۰-۷۰۰ میلی متر است، اما یک نگاه اجمالی به لغزش ها نشان می دهد که بیشترین لغزش در مناطقی که میانگین بارندگی سالانه در مناطق بیش از ۵۵۰ میلی متر است رخ می دهد و این نشان دهنده افزایش ارتباط مستقیم بارندگی با وقوع زمین لغزش است.



۴. نتایج تجزیه و تحلیل نقشه پهنه بندی خطر لغزش با استفاده از منطق فازی نشان داد که حدود ۲۹ درصد از حوضه آبریز در یک منطقه بسیار خطرناک و ۴۲ درصد در یک منطقه با خطر بالا است. این واقعیت حساسیت بالایی از حوضه را در پدیده زمین لغزش نشان می دهد.

۵- با توجه به این که روش شبکه عصبی و رگرسیون چند متغیره تجزیه و تحلیل دقیق تر از نقش عوامل موثر بر وقوع زمین لغزش نسبت به سایر روش های کمی، نتایج قابل قبول تر و متمایز تر از روش AHP در این مطالعه است.

### بحث و نتیجه گیری

در بررسی رابطه بین عوامل موثر در وقوع زمینی لغزش نتایج نشان داد که از میان تمام عوامل، فاکتور فاصله از جاده یکی از عوامل موثر بر لغزش زمین است. محدوده زمین لغزش در اطراف جاده ها در منطقه مطالعه بسیار زیاد است و هرچه فاصله از جاده ها گرفته شود، میزان لغزش ها کاهش می یابد. دلیل اصلی این امر این است که جاده ها در وضعیت طبیعی قرار دارند، به عبارت دیگر، شیب تعادل منطقه، ایجاد عمودی، و پایین آوردن بخش پایین جاده با فشار اضافی و افزایش وقوع زمینی لغزش نزدیک جاده ها می باشد. شادفر و همکاران (۱۳۸۴)؛ فاطمی و همکاران (۱۳۸۴)؛ محمدی (۳۸۶)؛ پورحسامی (۱۳۸۶)؛ زارع و همکاران (۲۰۰۵) یالین و همکاران (۲۰۰۸)؛ لی (۲۰۰۷)؛ همچنین به نتیجه گیری مشابه در مورد افزایش رانندگی در اطراف جاده ها رسید. بزرگترین رابطه دامنه ها با شیب درجه ۰-۸ نشان می دهد. اما در دامنه های ۲۵ تا ۳۸ به علت ویژگی های آب و هوایی و پوشش گیاهی، شرایط خیس شدن در این درجه کاملاً شیب دار شده است که با درگیری شدید و عوامل انسانی مواجه است. نتایج تقریباً هماهنگ با نتایج بسیاری از محققان است، به طوری که محققان بر این باورند که حساسیت وقوع زمین لغزش در دامنه های متوسط در مقایسه با دامنه های کوچک و شیب دار بسیار بالا است و تنها اختلاف نظر در مورد شیب وجود دارد. (پورقاسمی ۱۳۸۶) دامنه های ۲۲ تا ۲۶ درصد، محمدی (۱۳۸۶)، شیب ۳۰ تا ۴۰ درصد، جاکار و همکاران. Schecker و همکارانش (۲۰۱۲)، شیب ۲۰ تا ۳۰ درصد، Boi و همکاران (۲۰۱۲)، شیب ۲۰ تا ۴۰ درصد، و همچنین به دست آوردن (۲۲ تا ۲۸ درصد)، ۲۲ تا ۲۸ درصد دامنه، لی و همکارانش (۲۰۰۷) چنین نتایجی نتایج سازگاری نقشه جریان با وقوع زمین لغزش نشان داد که بیشتر زمینی لغزش ها در فواصل ۲۱۰-۴۰۰ متر از آبراهه ها رخ می دهد، زیرا آبریز ها به علت فرسایش رودخانه و ساییدگی دیوار در امتداد رودخانه باعث ایجاد گرانش به سقوط و در نتیجه بی ثباتی از دامنه های مشرف به رودخانه است. شاخص قدرت رودخانه نیز این بحث را تایید می کند، زیرا در مناطقی که ظرفیت قدرت افزایش می یابد، تاثیر آن روی زمین لغزش ها افزایش می یابد. Pradhan و همکاران (۲۰۱۰)، همکاران (۲۰۱۲) zare et al. (۲۰۱۲) Boiand و سالاریان و همکاران. (۲۰۱۴) همچنین چنین نتایجی را به دست آورد. بسیاری از لغزش ها در باغ ها و زمین های کشاورزی وجود دارد. یکی از دلایل اصلی وقوع زمین لغزش تغییرات در استفاده از زمین و جنگل زدایی به مناطق مسکونی است و تبدیل آنها به باغ ها



یکی از علل اصلی لغزش در حوضه است. این شرایط هنگامی که ویژگی های فیزیوگرافی شیب نیز به علت اضافه می شود و همچنین افزایش حرکت توده های لغزش در غیاب ریشه های درختان تشدید می شود، شدت یافته است. این نتایج با احمدی و همکاران هماهنگ است. پژوهشی (۱۳۸۲)، شادفر و همکاران (۱۳۸۴)، فاطمی و همکاران (۱۳۸۴)، محمدی (۱۳۸۶) (۲۰۰۴) Orkanoqlo et al و زارع و همکاران. (۱۳۸۹). در ارزیابی نقش بارش با وقوع زمینی لغزش، نتایج نشان داد که بیشترین همبستگی بین سطح بارش باران ۷۰۰-۹۰۰ میلیمتر است و همبستگی نزدیک بین بارش و ارتفاع وجود دارد، به دلیل افزایش ارتفاع حوضه، مقدار زمین لغزش ها با بیشتر زمین لغزش ها که در ارتفاع ۳۲۰ تا ۴۰۰ متر قرار دارند، افزایش می یابد. این روند، همانطور که در نتایج نشان داده شده، نقش بارش در وقوع زمینی لغزش را نشان می دهد، حساسیت لغزش ها با افزایش ارتفاع افزایش می یابد، اما این روند در ارتفاع زیاد است زیرا بارش معمولاً برف است. و غلبه پدیده یخبندان در بخش بزرگی از سال، منجر به پدیده کند شدن و همچنین کمبود آب کافی میشود و کاهش دخالت انسان در طبیعت و در ارتفاعات بالا باعث میشود که به دلیل لغزش در ارتفاعات کاهش یابد. نتایج این بخش از تحقیق مربوط به نتایج زارع و همکارانش بود (۱۳۸۹). جوری و همکاران (۲۰۱۲) Yalsin و همکاران. (۲۰۱۲) Scheker و همکاران. (۲۰۱۲) و سالاریان و همکاران. (۲۰۱۴). مطالعه فاصله از گسل نشان می دهد که بیشترین میزان لغزش ها، ۰-۳۰۰ متر از گسل است. دامنه هایی که در فاصله های ۰-۳۰۰ متر واقع شده اند نشان می دهد که گسل به عنوان خطر در منطقه مورد مطالعه محسوب می شود. پارامتر اصلی وقوع زمین لغزش نقش مهمی ایفا کرده است. این نتایج با نتایج مقیمی و همکاران سازگار است. (۱۳۸۷)، پورقاسمی (۱۳۸۶)، زارع علی (۱۳۸۹) جوری و همکارانش (۲۰۱۲). به منظور دستیابی به بهترین مدل منطقه ای برای ارزیابی حساسیت زمینی لغزش، روش ارزیابی ROC و سطح زیر منحنی آن (AUC) در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از ارزیابی ROC در مدل شبکه عصبی نشان داد که سطح زیر منحنی با ۹۱۵٪ برابر است. یعنی حساسیت مدل شبکه عصبی ۹۱٫۵٪ درست است. همچنین با توجه به اهمیت نامتقارن مدل، پیش بینی مدل در خطر زمین لغزش خطر زمین لغزش بسیار خوب است. نتایج روش ارزیابی ROC در مدل رگرسیون چند متغیره نشان داد که سطح منحنی ۹۳۰٪ است. بنابراین، حساسیت مدل وزن ۳/۹۰ درست است. همچنین، با توجه به اینکه سطح زیر سطح بیش از ۹٪ بود، دقت مدل در کلاس بسیار خوب بود. نتایج ارزیابی ROC در مدل های فازی، فازی و فازی گاما جامعه نشان داد که سطح انحنای برابر ۸۶، ۸۶۲ و ۸۳۴ و ۸۰۷ درصد است. نتایج حاصل از این نتایج نشان می دهد دقت بالاتر مدل شبکه عصبی نسبت به مدل های دیگر و سپس روش رگرسیون چند متغیره.



## منابع

- احمدی، احمد، ۱۳۸۴. ایجاد یک مدل منطقه ای برای خطر حرکت جرم با استفاده از ویژگی های کیفی سیستم های سلسله مراتبی (AHP) (مطالعه موردی، حوضه طالقان). مجله منابع طبیعی ایران، شماره ۵۸.
- سمیه رنجبر، حجت الله، سعید عبدالملکی. ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل فازی علم شناسی و روش تلفیقی فازی - وسن در منطقه ماسکون جیرفت. مجله زمین شناسی مهندسی. کتاب هفتم شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۲. ۱۶۰۱-۱۶۲۲
- محمدی، مریم. ۱۳۸۸. ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از روش فازی تصمیم گیری چند معیاره، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۳ (۶)، ص. ۵۱-۸۲.
- روستایی، شهرام. احمدزاده، ۱۳۹۱. پهنه بندی مناطقی که تحت تاثیر خطر زمینی لغزش در جاده تبریز-مارند با استفاده از سنجش از دور و GIS قرار دارند. مطالعات ژئومورفولوژی کمی ۱ (۱)، ص ۴۷ تا ۵۸
- سفیدیاری (۱۳۸۱). ارزیابی آسیب های زمین لغزش روش های تنوع در حوضه دماوند، پایان نامه کارشناسی ارشد حوزه آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ص. ۱۵۹
- سیارپور، ۱۳۷۸. پتانسیل خطر زلزله در جنوب خلخال در ایتان، اردبیل. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ایران.
- صفاری امیر. آخردار، آرش ۱۳۹۲. مقایسه مدل نسبت فرکانس و توابع عضویت فازی در نسبت خطر زمین لغزش (مطالعه موردی: جاده ارتباطی ماریان-سندج، جغرافیا و مخاطرات زیست محیطی، شماره ۴. صفحات ۷۹-۹۶.
- Bui DT, Pradhan B, Lofman O, Revhaug I, Dick OB. ۲۰۱۲. 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, ۹۶: ۲۸-۴۰
- Duman, T.Y., T. Can, C. Gokceoglu and H.A. Nefeslioglu. ۲۰۰۵. Landslide susceptibility mapping of Cekmece area (Istanbul ,Turkey) by conditional probability. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, ۲: ۱۵۵-۲۰۸.
- Ercanoglu, M., C. Gokceoglu and W.J. Van Asch Th. ۲۰۰۴. Landslide susceptibility zoning of North of Yenice (NW Turkey) by multivariate statistical techniques. Natural Hazard, ۳۲: ۱-۲۳
- Jouri, M.H., Zare, M., Askarizadeh, D., Fakhre Ghazi, M., Salarian, T., & Miarrostami, S. (۲۰۱۳). Landslide Susceptibility Mapping for Subalpine Grassland Using Frequency Ratio and Landslide Index Model (Case Study: Masoleh Watershed, Iran). Journal of Rangeland Science. ۳(۱), pp. ۲۱-۳۰.
- Komac, M., ۲۰۰۶., A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in Perialpine Slovenia, Geomorphology, ۷۴: ۱۷-۲۸.
- Lee, S., ۲۰۰۷, Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping, Environmental Geology, ۵۲: ۶۱۵-۶۲۳.