

## ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (مطالعه موردی: جاده‌ی حیران – استان اردبیل)

فریبا اسفندیاری درآباد\* - استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.  
مسعود رحیمی - دانش‌آموخته دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه تبریز.  
اصغر نویدفر - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه تهران.  
ارسان مهروز - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه محقق اردبیلی.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۳۱ تائید نهایی: ۱۳۹۹/۰۲/۳۱

### چکیده

زمین‌لغزش‌ها همواره موجب خسارات جانی و مالی، از دست رفتن منابع طبیعی و زیرساخت‌های زیربنایی از قبیل جاده‌ها، پل‌ها و خطوط ارتباطی می‌شوند. جاده ارتباطی حیران در حال حاضر تحت تأثیر فرایند لغزش و گسیختگی دامنه‌ای دستخوش تغییر می‌باشد. در این پژوهش حساسیت زمین‌لغزش محور ارتباطی حیران با استفاده مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و توابع خطی، چندجمله‌ای، شعاعی و حلقوی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان موردنرسی قرار گرفت. معیارهای مؤثر در شناسایی حساسیت زمین‌لغزش در سطح منطقه موردمطالعه شامل لایه‌های استخراج شده از سطوح ارتفاعی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، شیب، جهت شیب و فاصله از جاده می‌باشد. لایه‌های اطلاعاتی بعد از آماده‌سازی در محیط نرم‌افزار SPSS Modeler اجرا شد و نقش و ارزش هر کدام از پارامترها بر اساس روش‌های مختلف به دست آمد. بر اساس نتایج ارزیابی مدل به ترتیب عامل زمین‌شناسی، ارتفاع، جهت شیب و کاربری اراضی، بیشترین ارزش را در نایابیاری دامنه‌ها در این محدوده داشته‌اند. همچنین نتایج نشان داد، کاربری‌های که در طبقه حساسیت زیاد قرار گرفته‌اند عمدهاً مربوط به اراضی مرتع، زمین کشاورزی و جاده‌های ارتباطی (بالاتر از ۱۴۰۰ متر) می‌باشند که در قسمت‌های غربی گردنۀ حیران واقع شده‌اند. سازندگان تحت تأثیر لغزش در محدوده موردمطالعه عمدهاً تناوب توف، ماسه‌سنگ توفی به همراه گدازه‌های برشی و گدازه‌های پیروکسین آندزیت می‌باشد. در قالب مقایسه بین مدل‌ها جهت ارزیابی مطابقت آن با واقعیت منطقه به نظر می‌رسد مدل ماشین بردار پشتیبان نسبت به شبکه عصبی مصنوعی کارایی بهتری جهت ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در محور ارتباطی گردنۀ حیران دارد. شایان ذکر است، لزوم توجه به نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش طی عملیات جاده‌سازی و تعریض آن می‌تواند سبب کاهش ریسک مخاطره‌ی زمین‌لغزش در محدوده مسیر جاده حیران–آستارا گردد.

واژگان کلیدی: حساسیت زمین‌لغزش، شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، محور ارتباطی حیران.

### مقدمه

رخداد زمین‌لغزش یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی به حساب می‌آید که منجر به خسارات قابل توجه و از دست رفتن زندگی انسان‌ها و آسیب به زیرساخت‌ها در سراسر جهان می‌شود (گریما<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۵؛ راگوانشی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۴؛ بن<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۸). در این رابطه باید گفت که حرکت زمانی اتفاق می‌افتد که تنفس برشی<sup>۴</sup> مواد نسبت به مقاومت برشی<sup>۵</sup> آن‌ها افزایش یابد، و نمایانگر مکانیسمی است که ناشی از حرکت دامنه‌ای می‌باشد و بنابراین زمین‌لغزش را از دیگر اشکال فرایندهای تخریب توده‌ای در میاناب‌ها (فرساش خاک) متمایز می‌سازد. برآیند این نیروها در ارتباط با مورفلوژی دامنه و پارامترهای ژئوتکنیکی مواد، تعیین‌کننده نوع خاصی از لغزش است که می‌تواند اتفاق بیفتد. بنابراین، تحلیل افزایش احتمالی تنفس برشی و یا کاهش مقاومت برشی مواد کلید فهم زمین‌لغزش‌ها و اقدامات حفاظتی مناسب می‌باشد (اسفندياری و همکاران: ۱۳۹۷). مهم‌ترین عوامل اصلی شامل ویژگی‌های ژئومورفیک و زمین‌شناسی، رخمنون‌های سنگی، جنس سنگ و پوشش گیاهی است (فرناندز<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۴؛ کوبیتو و همکاران، ۲۰۰۵؛ موریراز<sup>۷</sup>، ۲۰۰۵). تاکنون متخصصان مختلف علوم طبیعی مطالعات زیادی در مورد حرکات توده‌ای انجام داده‌اند، ولی به دلیل پیچیده بودن این پدیده، بیشتر مدل‌های مورداستفاده حالت کیفی داشته و برای منطقه‌ای خاص کاربرد دارند. در حال حاضر اطلاعات مربوط به چند دهه اخیر، ابزارهای قدرتمندی هستند که می‌توانند در راستای بهبود برنامه‌ریزی کاربری زمین و اجتناب از توسعه نواحی حادثه‌خیز مورداستفاده قرار گیرند. این رویه مؤثرترین و اقتصادی‌ترین راه جهت کاهش خطرات آتی می‌باشد (آکسوی و ارکانوگلو<sup>۸</sup>، ۲۰۱۲). در این خصوص، تهییه نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش، ابزار مهمی برای برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای هستند (ملچیور<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۸). اعتبار نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش عمدهً وابسته به میزان و کیفیت داده‌های موجود، مقیاس کار و انتخاب روش مناسب تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی می‌باشد. فرآیند ایجاد چنین نقشه‌هایی شامل چندین رویکرد کیفی و کمی می‌باشد (آیالو<sup>۱۰</sup> و همکاران: ۲۰۰۵). هدف از تهییه نقشه حساسیت زمین‌لغزش، تفکیک سطح زمین به مناطق همگن، بر اساس احتمال ناپایداری به واسطه حرکات توده‌ای در موقعیت‌های خاص می‌باشد (Das<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۲). این نقشه‌ها به تجسم فضایی برای پیش‌بینی زمین‌لغزش در آینده برای مناطق خاصی کمک می‌کند (Daw<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). بهمنظور کاهش خسارات و صدمات، مطالعات زیادی جهت ارائه نقشه پهنه‌بندی حساسیت خطر زمین‌لغزش صورت گرفته است:

یائو<sup>۱۳</sup> و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیقی نقشه حساسیت زمین‌لغزش در دامنه‌های هنگ‌کنگ را بر اساس مدل SVM تهییه نمودند. در این تحقیق از درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع، منحنی پروفیل شیب، لیتوژوژی، پوشش گیاهی و شاخص رطوبت توبوگرافی به عنوان پارامترهای تأثیرگذار در حساسیت بروز پدیده زمین‌لغزش استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان‌دهنده

<sup>1</sup>. Girma

<sup>2</sup>. Raghuvanshi

<sup>3</sup>. Pan

<sup>4</sup>. Shear stress

<sup>5</sup>. Shear strength

<sup>6</sup> Fernandes

<sup>7</sup> Moreiras

<sup>8</sup> Aksoy and Ercanoglu

<sup>9</sup> Melchiorre

<sup>10</sup> Ayalew

<sup>11</sup> Das

<sup>12</sup> Dou

<sup>13</sup>. Yao

کارابی بالای این مدل در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش می‌باشد. کونفورتی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقی به ارزیابی توانایی شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی زمین‌لغزش‌های خوبه رودخانه توربلو<sup>۲</sup> واقع در ایتالیا پرداختند. آن‌ها در این تحقیق ده شاخص مرتبط با وقوع زمین‌لغزش شامل: لیتلولوژی، گسل، کاربری اراضی، شبکه زهکشی و مجموعه‌ای از فاکتورهای توپوگرافی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و شاخص قدرت جریان (SPI) را مورد بررسی قراردادند. نتایج نشان می‌دهد که روش شبکه عصبی مصنوعی موفق به شناسایی مناطق لغزشی شده و می‌تواند جهت برنامه‌ریزی آمایش زمین و طرح‌های زیربنایی استفاده شود. هسو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی به کاربرد تکنیک‌های دورسنجی در شناسایی مخاطرات زمین‌لغزش در بخش‌هایی از خطوط راه‌آهن تایوان پرداختند. طبق نتایج آن‌ها در مجموع حدود ۴۸ مورد زمین‌لغزش سطحی، ۱۱ مورد ریزش سنگ، و ۷ مورد جریان واریزه‌ای در طول مسیر راه‌آهن شناسایی شد. آن‌ها بیان می‌دارند نتایج این تحقیق می‌تواند به بهبود ساخت‌وساز، پیشگیری از حوادث و مدیریت خدمات راه‌آهن در این بخش از تایوان کمک کند. همزه<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی به ارزیابی و پهنه‌بندی مخاطرات زمین‌لغزش بر پایه GIS در اتیوپی مرکزی پرداختند. جهت استخراج شیب، جهت شیب و ارتفاع از مدل رقومی به دست آمده از تصاویر ASTER و جهت استخراج کاربری اراضی و پوشش گیاهی از تصاویر سنجنده Landsat ETM+ ماهواره استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که حدود ۲۱ درصد منطقه در کلاس خطر زیاد و ۸ درصد منطقه در کلاس خطر خیلی زیاد از نظر مخاطره زمین‌لغزش قرار می‌گیرد. سائیتو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۷) طی تحقیقی به تأثیر قطع درختان جنگل بر وقوع زمین‌لغزش با تأکید بر آنالیز بارش‌های آستانه‌ای در ژاپن پرداختند. آن‌ها در این مطالعه نقش بارش‌های آستانه‌ای را در وقوع زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در هر دوره با استفاده از عکس‌های هوایی مورد مطالعه قرار داده و ارتباط بین زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده و ویژگی‌های توپوگرافی را با استفاده از DEM با قدرت تفکیک ۱۰ متر مورد ارزیابی قراردادند. نتایج کار آن‌ها حاکی از ارتباط قوی بین حذف درختان جنگلی و بروز زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی می‌باشد. هونگ<sup>۶</sup> و همکاران، (۲۰۱۶) در تحقیقی به پیش‌بینی فضایی لغزش‌های محدوده‌ای در چین با استفاده از مدل SVM پرداختند. آن‌ها در این تحقیق ۲۸۲ زمین‌لغزش را در محدوده مورد مطالعه از طریق تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی و مطالعات میدانی شناسایی کردند. از این تعداد نقاط لغزشی ۷۰ درصد به عنوان داده‌های آموزشی انتخاب شده و بقیه جهت صحت سنجی مورداستفاده قرار گرفته است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مدل RBF-SVM دارای عملکرد بالایی در تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش بوده و می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آمایش سرزمین مفید واقع شود. پولیکرتیز<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقی به ارزیابی و مقایسه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از رگرسیون لجستیک و شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. آن‌ها در این تحقیق فهرست زمین‌لغزش‌ها را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مطالعات میدانی به دست آورده‌اند. هشت فاکتور اصلی مورداستفاده در این تحقیق شامل: ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، فاصله از شبکه راه‌ها، فاصله از شبکه آبراهه، فاصله از عناصر تکتونیکی، کاربری اراضی و لیتلولوژی بوده است. نتایج صحت سنجی آن‌ها نشان داد که هر دو مدل دارای دقت بالایی بوده اما مدل رگرسیون لجستیک برتری نسبی بالاتری را در تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش در محدوده مورد مطالعه داشته است. احمدآبادی و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و الگوریتم SVM به شناسایی سطوح مستعد زمین‌لغزش در آزادراه خرم‌آباد- پل زال پرداختند.

<sup>1</sup>. Conforti<sup>2</sup>. Turbolo<sup>3</sup>. Hsu<sup>4</sup>. Hamza<sup>5</sup>. Saito<sup>6</sup>. Hong<sup>7</sup>. Polykretis

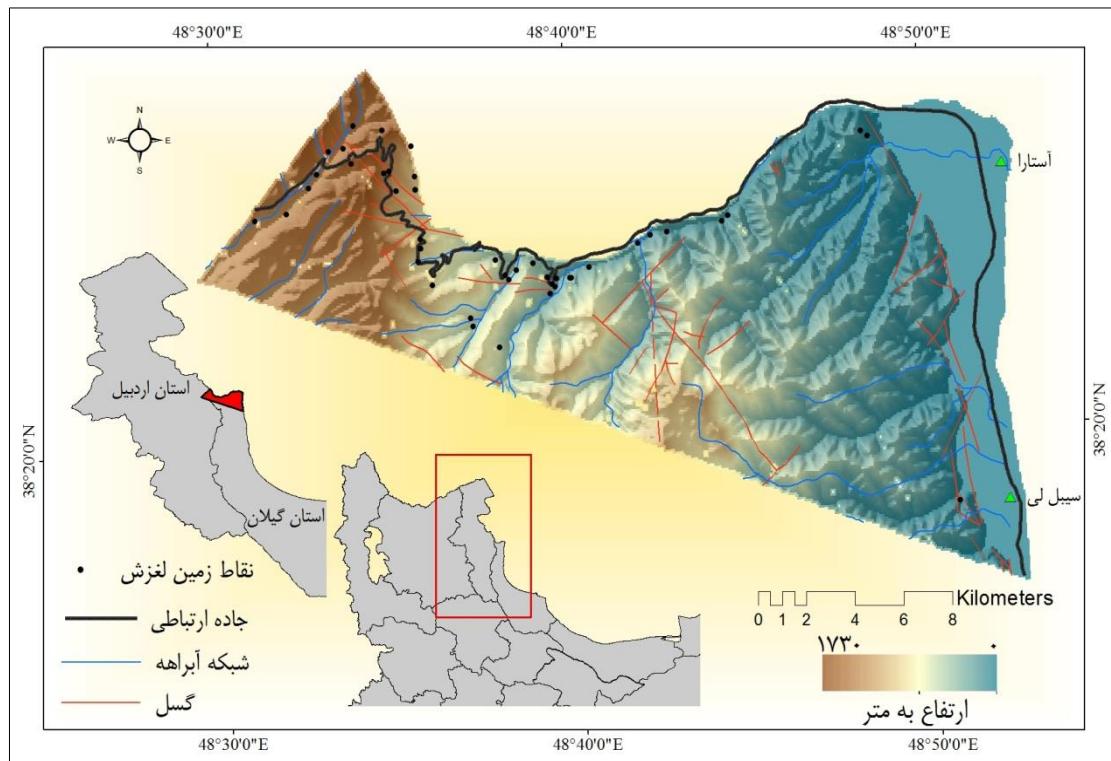
نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتریک، انحنای پلان و پروفیل توانسته ویژگی‌های شکلی سطوح را به صورت کمی مشخص نماید و درنتیجه نقش مهمی در افزایش دقت شناسایی سطوح مستعد لغزش داشته باشد. آن‌ها اشاره می‌کنند که با توجه به درهم‌ریختگی و زبری سطوح لغزشی این شاخص‌ها کارایی خوبی در شناسایی پهنه‌های لغزشی داشته‌اند. عمامالدین و همکاران (۱۳۹۷) در تحقیقی به ارزیابی خطر زمین‌لغزش در محور جاده هراز با استفاده از فرایند سلسه‌مراتبی، تحلیل شبکه عصبی مصنوعی و مطالعات میدانی پرداختند. آن‌ها در این مطالعه ۲۶۱ نقطه‌ی خیز متاثر از لغزش و ریزش ثبت کردند. از بین این تعداد نقاط برداشت شده ۱۹۱ مورد با سطح پرخطر تشخیص داده شد. طی تحقیقات آن‌ها، بیشترین خطر در رابطه با اشتراک مخاطرات مربوط به ریزش و رواناب به دست آمده است. اسفندياری و همکاران (۱۳۹۷) خطر وقوع زمین‌لغزش را در محور مواصلاتی خلخال-سرچم با استفاده از مدل‌های آماری فاکتور قطعیت و رگرسیون لجستیک موردمطالعه قراردادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که در حدود ۲۳ درصد از کل منطقه موردمطالعه در کلاس خطر زیاد و بسیار زیاد احداث شده است. آن‌ها اشاره می‌کنند که در مقیاس کلی، زمین‌لغزش‌های ۲۳ کیلومتر در پهنه‌های با خطر زیاد و بسیار زیاد احداث شده است. این تحقیقی به مقایسه مدل شبکه عصبی مصنوعی با مدل منطق فازی در ارزیابی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز سیمره چنان پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی با ضریب کاپای ۰/۹۱ مدل کارآمدتری نسبت به مدل منطق فازی در تهیه نقشه خطر لغزش‌های حوضه سیمره چنان است. همچنین آن‌ها اشاره می‌کنند که از میان عوامل تأثیرگذار بر زمین‌لغزش در منطقه موردمطالعه عامل شیب به عنوان مهم‌ترین عامل و عوامل سنگ‌شناسی و خاک در مراتب بعدی قرار دارند. روستایی و همکاران (۱۳۹۷) طی تحقیقی به شناسایی و پایش ناپایداری دامنه‌ای در حوضه آبریز طالقان با استفاده از روش اینترفرامتری تفاضلی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در بازه زمانی موردمطالعه مناطق ناپایدار در دامنه غربی با دقت بالایی نسبت به شیب‌های شرقی آشکارسازی شده‌اند. میانگین میزان جابجایی محاسبه شده پهنه لغزشی در این دوره ۶-تا ۱۳ میلی‌متر بوده است. مهم‌ترین نقطه لغزشی شناسایی شده توسط این محققان، توده لغزشی میناوند و زیدشت بوده است که در مجاورت سد طالقان و مناطق مسکونی قرار دارد.

جاده مواصلاتی حیران به عنوان پل ارتباطی بین استان‌های اردبیل، آذربایجان شرقی و غربی با استان‌های شمالی کشور در حال حاضر تحت تأثیر مخاطرات دامنه‌ای قرار دارد. بر اساس مشاهدات میدانی زمین‌لغزش‌های متعددی در این منطقه اتفاق افتاده و احتمال وقوع زمین‌لغزش‌های دیگر نیز بسیار می‌باشد. درواقع لزوم توجه به زمین‌لغزش‌های این منطقه زمانی احساس می‌شود. در این پژوهش سعی خواهد شد با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی منطقه، ضمن شناسایی مهم‌ترین عوامل در ایجاد زمین‌لغزش در گردنۀ حیران، مناطق مستعد زمین‌لغزش شناسایی و کارایی روش‌های مورداستفاده در این پژوهش موردنرسی قرار گیرد.

#### منطقه مطالعاتی

گردنۀ حیران در مسیر ارتباطی اردبیل- آستارا قرارگرفته است. این گردنۀ در شمال شرق شهر اردبیل و غرب شهر مرزی آستارا قرار دارد. از رودخانه‌های مهم محدوده مورد بررسی رودخانه‌های آق چای، کریم چای هستند که به سمت رودخانه آستارا چای زهکشی می‌شوند. منطقه از نظر تکتونیکی دارای گسل‌های بارزی همچون گسل آستارا است. در مسیر گردنۀ حیران از نمین تا آستارا سازندهای مختلفی را می‌توان شناسایی نمود. از نزدیکی نمین تا روستای حیران، سنگ اصلی را برش ولکانیکی از نوع آندزیت پیروکسن دار آئوسن تشکیل می‌دهد. در قسمتی از این مسیر رسوبات کنگلومرایی با سیمان سست دارای قطعات آتشفسانی، به صورت ناپیوستگی آذرین پی بر روی برش‌های آتشفسانی آندزیتی قرارگرفته است. از روستای حیران تا ۱۵ کیلومتری آستارا، سنگ‌های رسوبی، برونزد دارند که به کرتاسه مربوط می‌شوند. از ۱۵ کیلومتری آستارا به ترتیب سنگ‌های ماسه‌سنگ توفی با میان لایه‌ای از گدازه‌های آندزیتی پالئوسن و رسوبات کواترنری

قرارگرفته‌اند (رضایی مقدم، ۱۳۷۷). بیشترین ارتفاع منطقه ۱۷۳۰ در قسمت بالادست رودخانه آستارا چای و کمترین ارتفاع در خروجی دره در محدود شهر آستارا قرار دارد. غالب کاربری زمین‌ها در محدوده موردمطالعه از نوع کاربری کشاورزی و مرتع می‌باشد. محدوده موردمطالعه به دلیل متأثر شدن از جریان‌های اقلیمی دریای خزر تحت تأثیر اقلیم مرطوب خزری بوده و دارای میانگین بارش نزدیک به ۸۴۰ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۱ نقشه موقعیت جغرافیایی محدوده موردمطالعه را در شمال غرب کشور نشان می‌دهد.

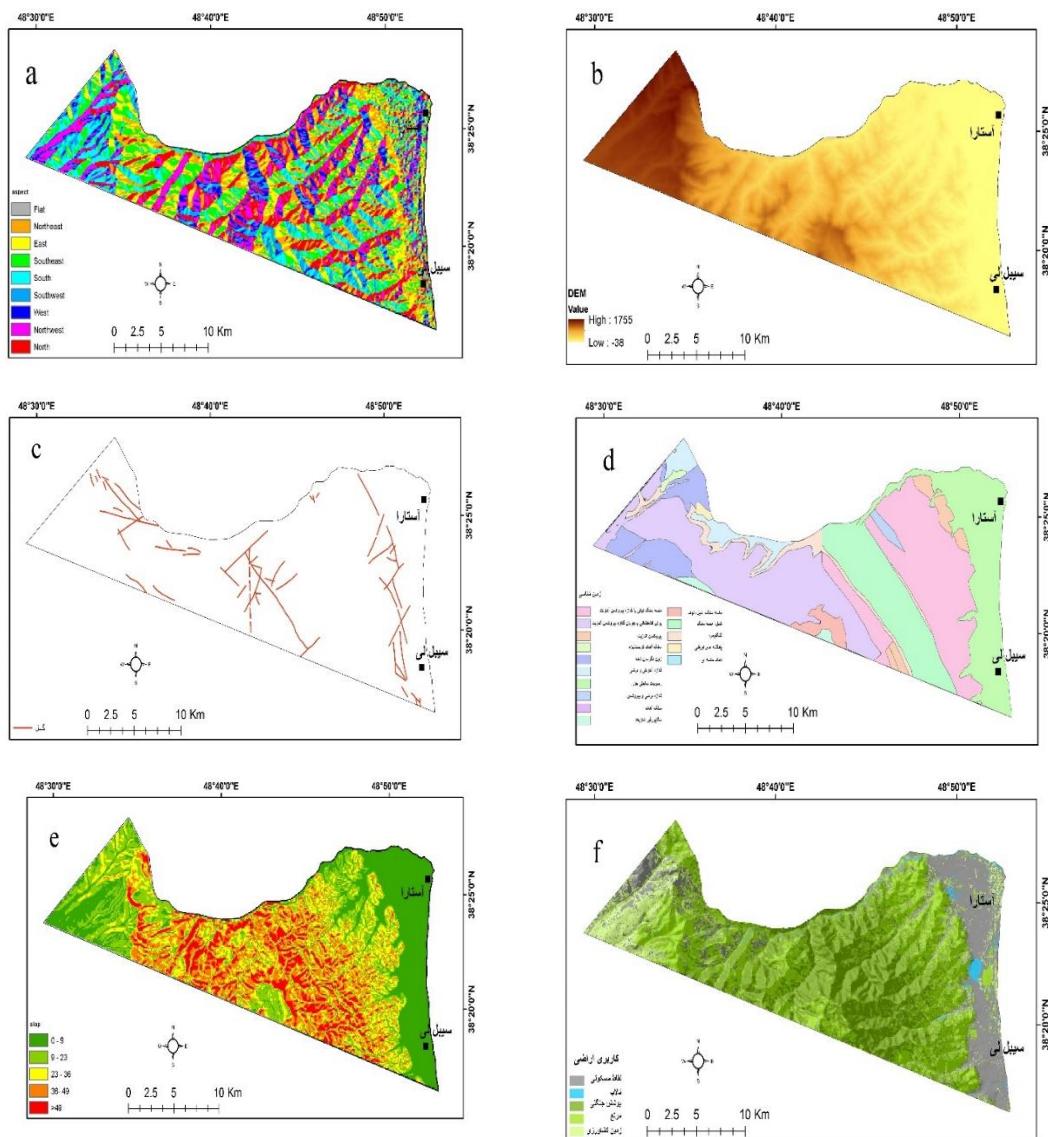


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه

## مواد و روش‌ها

داده‌های مورداستفاده در این تحقیق شامل: نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه باقدرت تفکیک ۱۲/۵ متر مربوط به ماهواره ALOS – PALSAR، تصاویر ماهواره‌ای Sentinel 2 (باقدرت تفکیک ۱۰ متر)، تصاویر Google Earth، داده‌های اقلیمی، مطالعات میدانی و نیز منابع کتابخانه-ای می‌باشد. جهت تهیه و آماده‌سازی لایه‌ها و اجرای مدل‌های تحقیق از نرم‌افزارهای SPSS Modeler, Arc GIS و ENVI استفاده گردید.

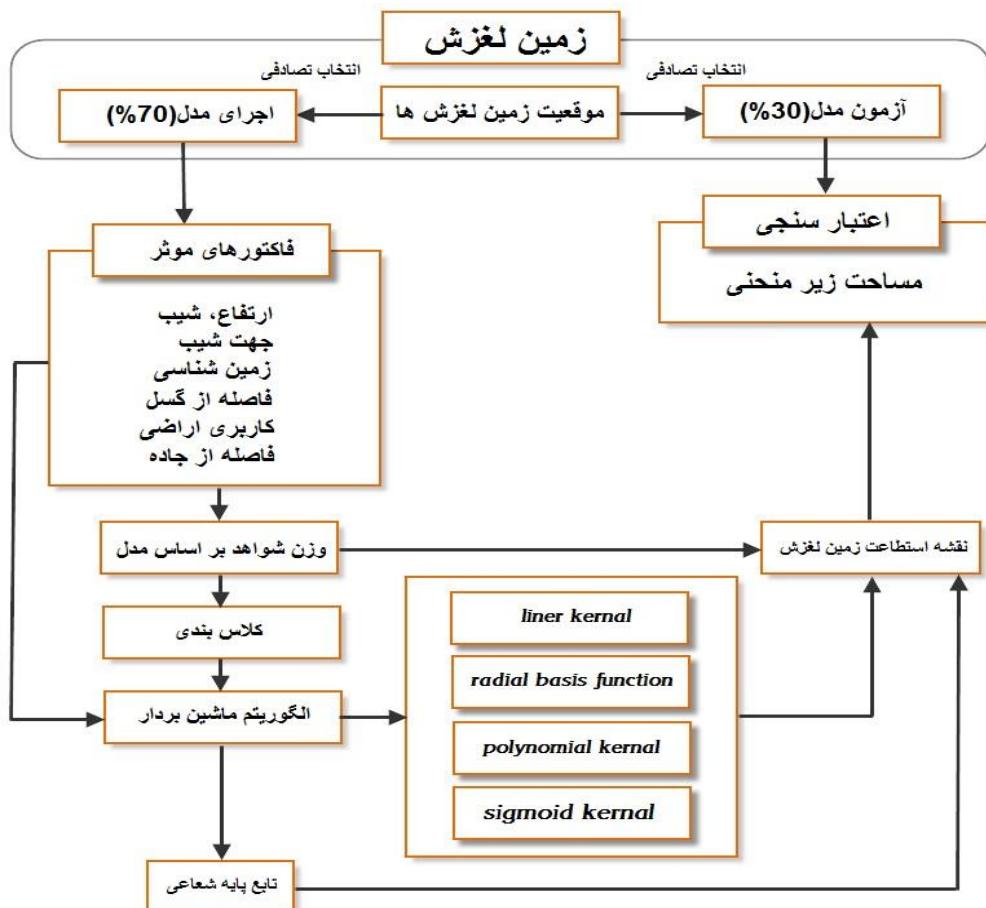
در این پژوهش به منظور تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش، موقعیت زمین‌لغزش‌های رخداده در محدوده موردمطالعه در طی بازدید میدانی از منطقه توسط GPS و نیز تصاویر ماهواره‌ی Sentinel 2A ثبت شد. لایه‌های مورداستفاده برای این پژوهش شامل: زمین‌شناسی، گسل، ارتفاع، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، جاده می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲. عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در محدوده مورد مطالعه: (a) جهت شیب (b) توزیع ارتفاعی (c) فاصله از گسل (d) نقشه زمین‌شناسی (e) شیب (f) کاربری اراضی

آماده‌سازی لایه‌ها به صورت پیکسل مبنا انجام شد. در این روش هر پیکسل شامل تمامی اطلاعات لایه‌های مورد استفاده در پژوهش را شامل می‌شود. لذا برای هر پیکسل با مشخصات تمامی لایه‌های دخیل در صورت رخداد زمین‌لغزش عدد یک و در صورت عدم رخداد زمین‌لغزش مقدار صفر در نظر گرفته شد. مزیت این روش عدم هیچ‌گونه دخل و تصرف از جانب کارشناس بر نتایج احتمالی تحمیل پژوهش است. لذا مرحله اول آماده‌سازی لایه‌ها در محیط نرم‌افزار Arc GIS صورت گرفت که به عنوان ورودی برای اجرای مدل ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی در نرم‌افزار SPSS Modeler است. جهت آماده‌سازی ابتداء تمامی لایه‌ها به حالت رستر تبدیل شدند و در ادامه این لایه‌های رستری با یکدیگر ترکیب شدند. فایل رستر نهایی شامل تمامی اطلاعات لایه‌های مورد استفاده در پژوهش را در برمی‌گیرد. هر پیکسل از فایل رستری شامل ارزش ارتفاعی، شیب، جهت شیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از جاده و فاصله از گسل را در برمی‌گیرد.

لایه اطلاعاتی آماده شده در محیط نرم‌افزار SPSS Modeler با نسبت ۷۰ درصد برای اجرای مدل و ۳۰ درصد برای اعتبار سنجی مدل در نظر گرفته شدند (شکل ۳). هدف اصلی از جدا کردن مجموعه نمونه‌های آموزشی و آزمایشی، ساخت یک مدل و آزمون مدل به دست آمده با نمونه‌های آزمایشی مستقل است (احمدآبادی و همکاران، ۱۳۹۴).



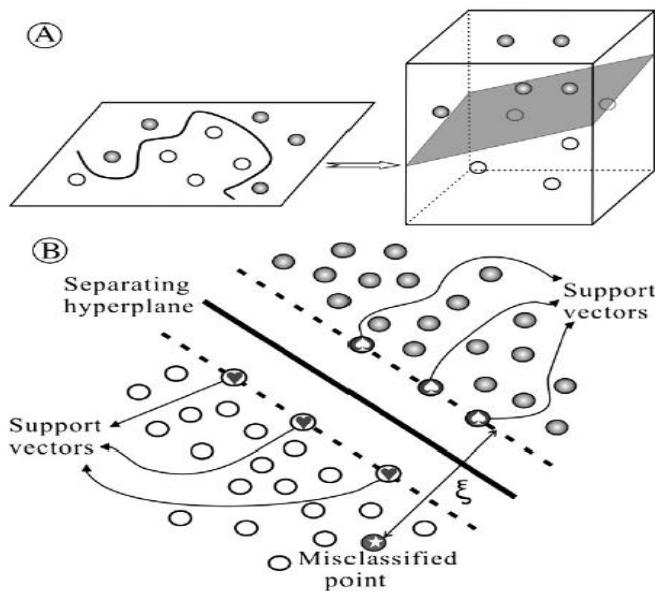
شکل ۳. فلوچارت مدل مورد استفاده برای اجرای پهنه‌بندی زمین‌لغزش (ماشین بردار پشتیبان)

### الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)

مدل SVM بر پایه تئوری یادگیری آماری بناسده است. بر اساس این تئوری می‌توان کران نرخ خطای ماشین یادگیری را برای داده‌های طبقه‌بندی نشده، به عنوان نرخ خطای تعیین‌یافته در نظر گرفت (شکل ۴). این کران‌ها به عنوان تابعی از مجموع نرخ خطاهای آموزشی هستند که میزان پیچیدگی طبقه‌بندی کننده‌ها را نشان می‌دهند. به منظور کمینه کردن نرخ خطاهای آموزشی تعیین‌یافته، باید نرخ خطای آموزش و پیچیدگی طبقه‌بندی کننده کاهش یابد. این کار را می‌توان با بیشینه کردن حاشیه جداسازی انجام داد. بنابراین، از آنجایی که حاشیه جداسازی به بعد داده‌های ورودی بستگی ندارد، این طبقه‌بندی کننده، کارایی مناسبی دارد. مدل SVM که در دهه اخیر استفاده از آن گسترش یافته بر پایه انتقال غیرخطی همگام با یک بعد بالای فضایی ویژه است (واپنیک<sup>۱</sup>، ۱۹۹۵: ۱).

<sup>1</sup>. Support Vector Machine

<sup>2</sup>. Vapnik

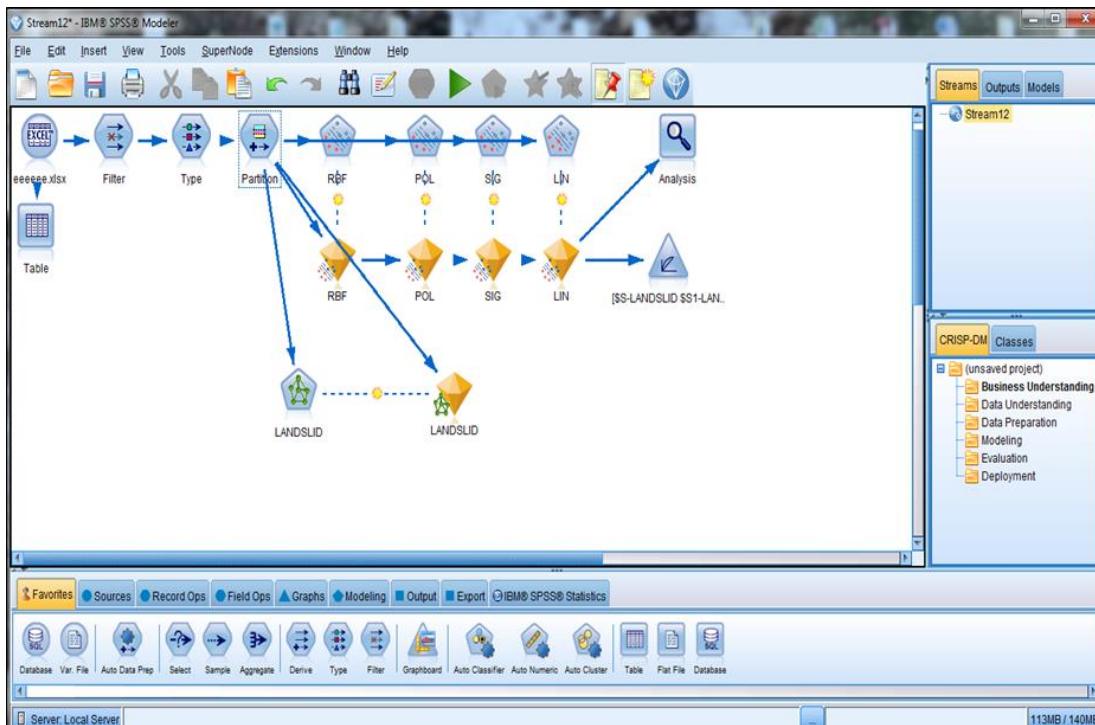


شکل ۴. اصول SVM (a)، تفاوت دو کلاس با حداقل فاصله(b)، موارد غیرقابل تفکیک و متغیرهای غیردقیق (b) (یائو و همکاران، ۲۰۰۸)

### شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه عصبی مصنوعی به عنوان مجموعه‌ای از گره‌های بهم پیوسته تعریف می‌شوند که می‌تواند برای مدل‌سازی مسائل و مشکلات زمین‌لغزش در ارتباط بین فاکتورهای عوامل ایجاد‌کننده و پاسخ‌ها کمک نمایند. الگوریتم‌های مختلف برای شبکه عصبی مصنوعی در بحث‌های نظری مطرح شده است. پرسیترون چندلایه و تابع پایه شعاعی از شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌طور گسترده در مدل‌سازی زمین‌لغزش استفاده می‌شود. شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌طور کلی شامل یک لایه وردی، یک یا چند لایه پنهان، و یک لایه خروجی است (کاوزوگلو<sup>1</sup> و ماتر، ۲۰۰۳). در این پژوهش جهت برآورد بهتر حساسیت زمین‌لغزش و مقایسه روش‌های مختلف، روش شبکه عصبی مصنوعی نیز مورداستفاده قرار گرفت. بعد از آماده‌سازی لایه‌ها بر اساس ارزش‌های هر پیکسل در نرم‌افزار GIS Arc GIS، در نرم‌افزار SPSS Modeler مدلی مطابق شکل ۵ تنظیم شد. قبل از اجرای مدل می‌بایست نوع داده‌ها (اسمی، ترتیبی،...) و نسبت اجرای مدل و آزمون تنظیم شود. با توجه به اینکه مدل ماشین بردار پشتیبان چهار تابع مختلف (چندجمله‌ای، شعاعی، حلقوی، خطی) دارد در تنظیم مدل هر چهار تابع اجرا می‌شود. در کنار مدل ماشین بردار، مدل شبکه عصبی مصنوعی نیز مطابق شکل ۵ تنظیم و آماده‌سازی شد. خروجی نرم‌افزار SPSS Modeler برای هر کدام از لایه‌های مورداستفاده در مدل‌های مختلف مورداستفاده در تحقیق ارزش عددی تولید می‌کند. درنهایت مقادیر هر کدام از لایه‌ها در نرم‌افزار Arc GIS به نقشه حساسیت زمین‌لغزش منتهی می‌شود.

<sup>1</sup>. Kavzoglu



شکل ۵. فرایند اجرای مدل ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی در نرم‌افزار SPSS Modeler

### یافته‌های تحقیق

در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش مهم‌ترین بخش کار تهیه لایه پراکندگی زمین‌لغزش‌های منطقه می‌باشد. میزان دقت و ارزیابی درست پهنه‌بندی تا حد زیادی مربوط به این بخش از کار هست. لذا جهت ارزیابی دقیق و صحت پهنه‌بندی کارهای میدانی جزء لینفک مطالعه زمین‌لغزش‌ها می‌باشد. بدین منظور، کارهای میدانی جهت شناسایی زمین‌لغزش‌های منطقه صورت گرفت. مهم‌ترین ابزار کار در این مرحله GPS می‌باشد. تعداد ۴۲ مورد از زمین‌لغزش‌های مهم در طول گردنه حیران برداشت شد (شکل ۶).



شکل ۶. زمین لغزش‌های اتفاق افتاده در مسیر محور حیران-آستارا

مقادیر ارزش‌های هر کدام از عوامل دخیل در رخداد زمین لغزش در گردنه حیران در جدول ۱ آمده است. در مدل شبکه عصبی مصنوعی بیشترین ارزش برای عامل کاربری اراضی و کمترین ارزش برای عامل ارتفاع و جهت شیب محاسبه شد. برای تابع خطی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان همه عوامل به میزان ۰/۱۷، ارزش گذاری شد و تمامی عوامل به یک میزان در رخداد زمین لغزش معرفی شدند. در تابع شعاعی الگوریتم ماشین بردار بیشترین ارزش برای عامل کاربری اراضی به میزان ۰/۰۲۱ و کمترین مقدار برای عامل ارتفاع و زمین‌شناسی برآورد شد. بر اساس تابع چندجمله‌ای بیشترین ارزش برای عوامل شیب و فاصله از گسل محاسبه شد. بعد از ارزیابی نهایی، مدل حلقوی الگوریتم ماشین بردار به عنوان مبنای پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در منطقه انتخاب شد. در این مدل بیشترین ارزش برای عامل زمین‌شناسی به میزان ۰/۰۲۱ محاسبه شد. با دقت در نتایج مدل SVM می‌توان دید سه تابع Radial basis function، Sigmoid kernel، Polynomial kernel، Liner kernel، Sigmoid kernel، Polynomial kernel (Neural net) تقریباً مشابهی ارائه داده‌اند. تابع Radial basis function بیشتر با مدل شبکه عصبی مصنوعی (Neural net) در بیان عوامل تأثیرگذار در ناپایداری دامنه همپوشانی زیادی دارد.

جدول ۱. مقادیر اثر هر یک از عوامل مؤثر بر رخداد زمین لغزش بر اساس مدل‌های کمی

Sigmoid kernel	Polynomial kernel	Radial basis function	Liner kernel	Neural net	پارامتر
۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۰۷	ارتفاع
۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۱۷	۰/۲۴	شیب
۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۰۷	جهت شیب
۰/۲۱	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۱۴	زمین‌شناسی
۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۲۱	۰/۱۷	۰/۳۸	کاربری اراضی
۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۱۷	۰/۱۰	گسل

مبانی کلاس‌بندی نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش بر طبق روش طبیعی جنکس<sup>۱</sup> صورت گرفته است. داده‌های هر کلاس که بیشترین مشابهت را به هم دارا هستند در یک کلاس قرار می‌گیرند. اساس این روش در به حداقل رساندن میانگین انحراف از معیار از میانگین کلاس‌ها است. این روش واریانس درون کلاس‌ها را کاهش و واریانس بین کلاس‌ها را به حداقل می‌رساند (جنکس، ۱۹۶۷). مقادیر درصد طبقات کم تا خیلی زیاد حساسیت زمین‌لغزش در جدول ۲ آمده است. بر اساس نتایج بدست‌آمده، بیشتر از ۴۰ درصد مساحت محدوده در گروه خیلی زیاد حساسیت لغزش قرار گرفته‌اند. این بخش از محدوده در طبقه ارتفاعی بالای ۱۴۰۰ متر در بخش‌های بالادست محور ارتباطی عمده‌تاً تحت کاربری مسکونی و کشاورزی قرار گرفته است. این بخش‌ها از نظر حساسیت زمین‌لغزش در طبقه خیلی زیاد جای گرفتند (شکل ۷). کمترین مقدار حساسیت زمین‌لغزش مربوط به طبقه کم است که عمده‌تاً در بخش‌های کم شیب حاشیه غربی دریای خزر و در محدوده شهرستان آستانه واقع شده است.

بر اساس مقادیر درصد طبقات بین توابع مختلف کرنل شبکه شیاهت زیادی برقرار است. در روشن شبکه عصبی مصنوعی تنها طبقه خیلی زیاد با توابع مدل کرنل درصد نزدیک به هم را دارا می‌باشند ولی در سایر طبقات اختلاف چند درصدی بدست‌آمده است. در روشن شبکه عصبی مصنوعی بیشتر از ۶۰ درصد از مساحت حوضه بین طبقه زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است و در حدود ۳۵ درصد بین طبقه متوسط و کم قرار گرفته است. شکل (۸) نقشه حساسیت زمین‌لغزش را در محور ارتباطی حیران- آستانه بر اساس توابع الگوریتم ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی نشان می‌دهد.

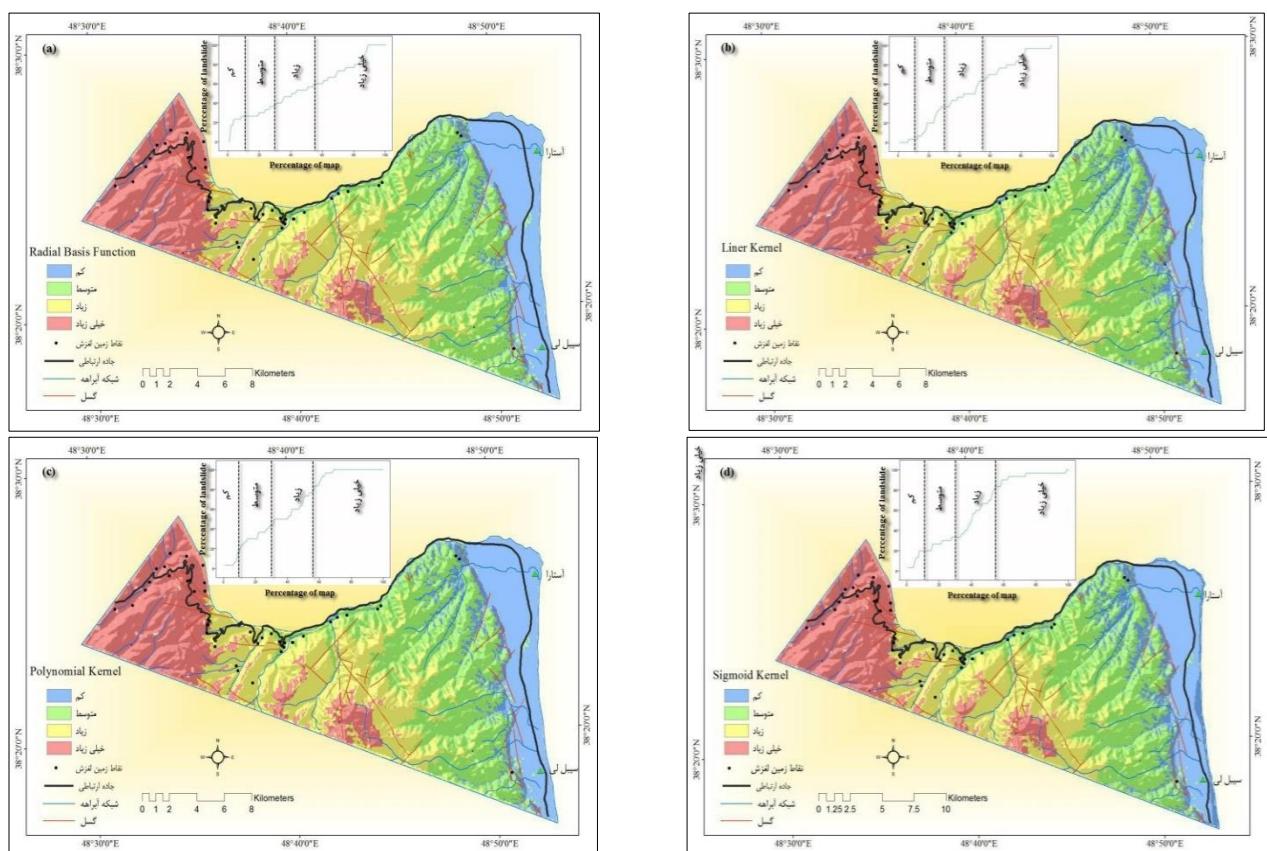


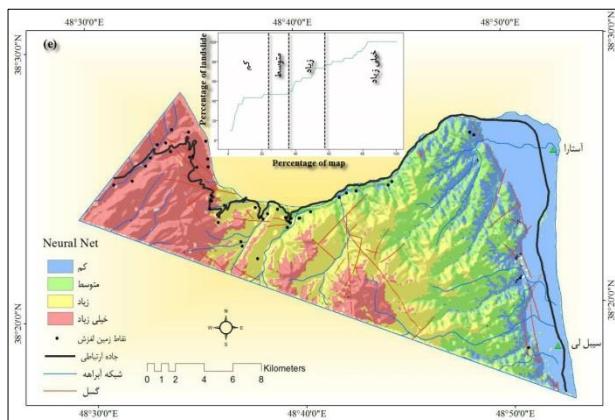
شکل ۷. نمونه‌هایی از زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در مسیر موصلاتی حیران به سمت آستانه و بسته شدن مسیر ارتباطی

<sup>1</sup>. Jenks natural breaks

جدول ۲. مقدار درصد حساسیت زمین لغزش بر اساس مدل‌های کمی

Sigmoid kernel	Polynomial kernel	Radial basis function	Liner kernel	Neural net	طبقات
۱۲/۷۰	۱۲/۰۷	۱۲/۰۹	۱۲/۰۸	۲۳/۲۵	کم
۱۸/۰۴	۱۸/۱۷	۱۸/۱۷	۱۸/۱۷	۱۲/۵۰	متوسط
۲۷/۴۶	۲۷/۶۵	۲۷/۶۵	۲۷/۶۵	۲۲/۷۷	زیاد
۴۱/۷۸	۴۲/۰۸	۴۲/۰۷	۴۲/۰۸	۴۱/۴۷	خیلی زیاد



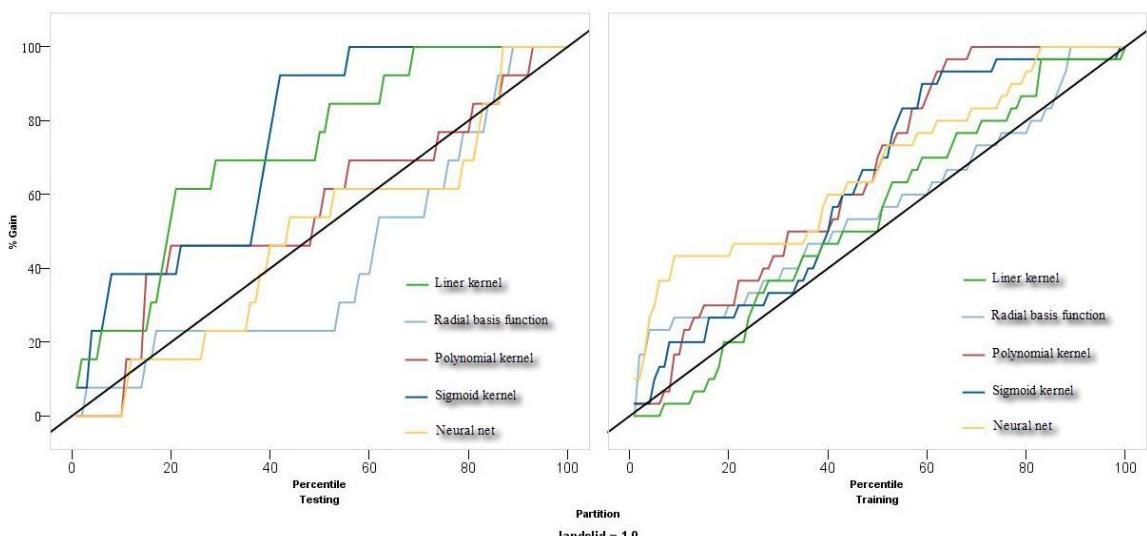


شکل ۸. نقشه حساسیت زمین‌لغزش در محور ارتباطی هیران- آستارا

(a: Radial basis function, b: Liner kernel, c: Polynomial kernel, d: Sigmoid kernel, e: Neural net)

### ارزیابی مدل

با توجه به اینکه برای ارزیابی مدل نمی‌توان از همان نقاط لغزشی استفاده کرد که در پهنه‌بندی استفاده شده است. در این پژوهش نیز بعد از آماده‌سازی داده‌ها ۷۰ درصد از داده‌ها برای اجرای مدل و ۳۰ درصد برای ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفت. خروجی نرم‌افزار SPSS Modeler برای ارزیابی در شکل ۹ نشان داده شده است. تصویر سمت راست نمودار داده‌های آموزشی و تصویر سمت چپ آزمون مدل بر اساس مدل‌های مورد استفاده در پژوهش است. اساس صحت سنجی در این نمودار مساحت سطح زیر سطح منحنی است، لذا بر اساس نمودار تست مدل، مدل حلقوی بیشترین مساحت زیر منحنی را نسبت به سایر مدل‌ها دارا می‌باشد و کمترین مقدار مساحت مربوط به مدل شعاعی است. از این‌رو مدل حلقوی برای مدل‌سازی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مناسب است.



شکل ۹. منحنی ارزیابی روش‌های مختلف جهت پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش (نمودار سمت راست: داده‌های آموزشی - نمودار سمت چپ: داده‌های تست مدل)

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته و نتایج تحقیقات در محدوده ارتباطی گردنۀ هیران عامل لیتو‌لوژی و تغییر کاربری و حجم زیاد ساخت‌وساز و بر هم زدن شبی طبیعی زمین برای جاده‌سازی و از بین رفتن مقاومت جانبی در طول مسیر گردنۀ هیران باعث تشدید زمین‌لغزش‌ها شده است (رضایی مقدم، ۱۳۷۷؛ اسفندیاری، ۱۳۸۷). نتایج مطالعه با استفاده از مدل‌های

آماری دو متغیره و منطق فازی بیانگر نقش فعالیت‌های انسانی از قبیل کشاورزی، مسکونی و احداث جاده است (صفاری و همکاران، ۱۳۹۲). نتایج این تحقیق بر نقش عامل زمین‌شناسی در مرتبه اول و عوامل ارتفاع، جهت شیب و کاربری اراضی در مرتبه‌های بعدی تأکید دارد. بخش‌هایی از منطقه که حساسیت بالایی از نظر زمین‌لغزش داشتند عمدتاً دارای سازندهای تناب و توف، ماسه‌سنگ توفی به همراه گدازه‌های برشی و گدازه‌های پیروکسن آندزیت است که در طبقه ارتفاعی بالای ۱۴۰۰ و شیب بیشتر از ۲۰ درصد است. این قسمت‌ها تحت دخالت‌های انسانی از قبیل احداث جاده، مرتع و ساخت‌وساز قرار گرفته‌اند. لذا نتیجه این تحقیق نیز در تأیید کارهای صورت گرفته قبلی است.

### نتیجه‌گیری

بر اساس ارزیابی نهایی بین مدل‌های مختلف الگوریتم ماشین بردار و شبکه عصبی مصنوعی، تابع حلقوی الگوریتم ماشین بردار بعد از ارزیابی نهایی به عنوان مبنای پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در منطقه انتخاب شد. با توجه به لایه‌های مورد استفاده در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش، به ترتیب عامل زمین‌شناسی، ارتفاع، جهت شیب و کاربری اراضی، بیشترین ارزش را در ناپایداری دامنه‌ها در این محدوده داشته‌اند. سازندهای زمین‌شناسی تحت تاثیر رخداد زمین‌لغزش عموماً شامل: توف، ماسه‌سنگ توفی به همراه گدازه‌های برشی و گدازه‌های پیروکسن آندزیت است. با توجه به دخل و تصرف زیاد در طول محور ارتباطی حیران – آستارا، کاربری‌های مربوط به مرتع، زمین‌کشاروزی و جاده‌های ارتفاعی عموماً در کلاس حساسیت زیاد جای گرفته‌اند. لذا در کنار شرایط محیطی مستعد برای رخداد زمین‌لغزش فعالیت‌های انسانی نقشی تاثیرگذار در تشدید ناپایداری دامنه‌ها در این محدوده دارد.

در آخر جهت کاهش مخاطرات دامنه‌ای در مسیر ارتباطی حیران رعایت موارد زیر به عنوان مهم‌ترین اقدامات عملیاتی پیشنهاد می‌گردد:

- لزوم توجه به حفظ تعادل مورفودینامیک دامنه‌ها در عملیات تعریض مسیر جاده حیران
- جلوگیری و ممانعت از افزایش شیب دامنه‌ها طی دست‌کاری‌های صورت گرفته توسط فعالیت‌های انسانی در اطراف جاده حیران
- جلوگیری از قطع درختان و از بین بردن پوشش گیاهی اطراف حریم جاده حیران
- نظارت مستمر بر نواحی مستعد مخاطره زمین‌لغزش در اطراف جاده حیران، جهت جلوگیری از وقوع خسارات جانی و مالی
- زهکشی مناسب توده‌های خاکی قرار گرفته در پشت دیواره‌های حفاظتی اطراف جاده حیران
- رعایت فاصله عرضی مناسب بین ترانشه‌ها و دیواره‌های حفاظتی از مسیر جاده حیران

### منابع

- احمدآبادی، ع.، رحمتی، م.، ۱۳۹۴. کاربرد شاخص‌های کمی ژئومورفومتریک در شناسایی پهنه‌های مستعد زمین‌لغزش با استفاده از مدل *SVM* (مطالعه موردی: آزادراه خرم‌آباد–پل زال)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۴، شماره ۳، صص ۱۹۷–۲۱۳.
- اسفندیاری درآباد، ف.، ۱۳۸۷. پهنه‌بندی پتانسیل خطر زمین‌لغزش جاده ارتباطی اردبیل–آستارا با استفاده از *GIS*. فصل نامه جغرافیایی سرزمین. سال پنجم، شماره ۱۸، صص ۱۱۳–۱۲۴.
- اسفندیاری درآباد، ف.، رحیمی، م.، ۱۳۹۷. ارزیابی و پیش‌بینی مکانی وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های آماری فاکتور قطعیت و رگرسیون لجستیک (منطقه مطالعاتی: جاده مواصلاتی خلخال–سرچم)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۱، شماره ۲، صص ۱۴۵–۱۵۸.

- اصغری، ص، بلواسی، ا، ۱۳۹۷. مقایسه مدل شبکه عصبی مصنوعی با مدل منطق فازی در ارزیابی خطر زمین‌لغزش(مطالعه موردی: حوضه آبریز سیمراه چنار)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۷، شماره ۲، صص ۱۸۲-۱۵۸.
- صفاری، ا، بهشتی، ا، صفیری، ن، ۱۳۹۲. مقایسه مدل‌های آماری دومتغیره و منطق فازی در پهنه‌بندی زمین‌لغزش (مطالعه موردی: محدوده گردنه حیران در محور اردبیل – آستارا)، دومین کنفرانس بین‌المللی مخاطرات محیطی.
- رضایی مقدم، م.ح، ۱۳۷۷. پژوهشی پیرامون علل زمین‌لغزه‌های گردنه حیران، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه تبریز، شماره ۱۶۸.
- روستایی، ش، خدایی، ل، ۱۳۹۵. ارزیابی روش‌های تحلیل شبکه (*ANP*) و رگرسیون لجستیک در بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در محدوده محور و مخزن سد، مطالعه موردی: سد قلعه چای. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۵، شماره ۳، صص ۶۷-۸۰.
- روستایی، ش، مختاری، د، اشرفی، ز، ۱۳۹۷. شناسایی و پایش ناپایداری دامنه‌ای به روش پردازش ایترافرمتری تفاضلی در حوضه آبریز طالقان. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۷، شماره ۳، صص ۱۸-۳۰.
- عمادالدین، س، مرادی؛ آ، ۱۳۹۷. ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از فرایند سلسه مراتبی (*AHP*)، تحلیل شبکه عصبی مصنوعی(*ANN*) و مطالعات میدانی با رویکرد ریسک(مطالعه موردی: محور جاده هراز)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. دوره ۶، شماره ۴، صص ۱۷۲-۱۹۰.
- فیض‌نیا، س، حسن‌زاده، م، احمدی، ح، ۱۳۸۰. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوزه آبخیز شلمان رود در استان گیلان، منابع طبیعی ایران، دوره ۵۴، شماره ۳، صص ۲۰۷-۲۲۰.
- *Aksoy, B. and Ercanoglu, M., 2012. Landslide identification and classification by object-based image analysis and fuzzy logic: An example from the Azdavay region (Kastamonu, Turkey). Computers & Geosciences, 38(1), pp.87-98.*
- *Conforti, M., Pascale, S., Robustelli, G., & Sdao, F. 2014. Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy). Catena, 113, 236-250.*
- *Cubito, A., Ferrara, V. and Pappalardo, G., 2005. Landslide hazard in the Nebrodi Mountains (Northeastern Sicily). Geomorphology, 66(1), pp.359-372.*
- *Das, I., Sahoo, S., van Westen, C., Stein, A. and Hack, R., 2010. Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). Geomorphology, 114(4), pp.627-637.*
- *Dou, J., Yamagishi, H., Pourghasemi, H. R., Yunus, A. P., Song, X., Xu, Y., & Zhu, Z. (2015). An integrated artificial neural network model for the landslide susceptibility assessment of Osado Island, Japan. Natural Hazards, 78(3), 1749-1776.*
- *Fernandes, N.F., Guimarães, R.F., Gomes, R.A., Vieira, B.C., Montgomery, D.R. and Greenberg, H., 2004. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. Catena, 55(2), pp.163-181.*
- *Girma, F., Raghuvanshi, T.K., Ayenew, T., Hailemariam, T., 2015. Landslide hazard zonation in Ada Berga District, Central Ethiopia – a GIS based statistical approach. J. Geomatics 90, 25–38 (i).*
- *Hamza, T., & Raghuvanshi, T. K. 2017. GIS based landslide hazard evaluation and zonation–A case from Jeldu District, Central Ethiopia. Journal of King Saud University-Science, 29 (2), 151-165.*

- Hong, H., Pradhan, B., Jebur; M. N., Bui, D. T., Xu, C., & Akgun, A. 2016. *Spatial prediction of landslide hazard at the Luxi area (China) using support vector machines*. *Environmental Earth Sciences*, 75(1), 40.
- Hsu, C. H., Tsao, T. C., Huang, C. M., Lee, C. F., & Lee, Y. T. 2016. *Using Remote Sensing Techniques to Identify the Landslide Hazard Prone Sections along the South Link Railway in Taiwan*. *Procedia Engineering*, 143, 708-716.
- Jenks, George F. 1967. "The Data Model Concept in Statistical Mapping", *International Yearbook of Cartography* 7: 186-190.
- Kavzoglu, T., & Mather, P. M. 2003. *The use of backpropagating artificial neural networks in land cover classification*. *International journal of remote sensing*, 24(23), 4907-4938.
- Melchiorre, C., Matteucci, M., Azzone, A. and Zanchi, A., 2008. *Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation*. *Geomorphology*, 94(3), pp.379-400.
- Moreiras, S.M., 2005. *Climatic effect of ENSO associated with landslide occurrence in the Central Andes, Mendoza province, Argentina*. *Landslides*, 2(1), pp.53-59.
- Pan, X., Nakamura, H., Nozaki, T., Huang, X., 2008. *A GIS-based landslide hazard assessment by multivariate analysis* *Landslides*. *J Jpn. Landslide. Soc.* 45 (3), 187–195.
- Polykretis, C., & Chalkias, C. 2018. *Comparison and evaluation of landslide susceptibility maps obtained from weight of evidence, logistic regression, and artificial neural network models*. *Natural hazards*, 93(1), 249-274.
- Raghuvanshi, T.K., Ibrahim, J., Ayalew, D., 2014. *Slope stability susceptibility evaluation parameter (SSEP) rating scheme – an approach for landslide hazard zonation*. *J. Afr. Earth Sci.* 99, 595– 612.
- Saito, H., Murakami, W., Daimaru, H., & Oguchi, T. 2017. *Effect of forest clear-cutting on landslide occurrences: Analysis of rainfall thresholds at Mt. Ichifusa, Japan*. *Geomorphology*, 276, 1-7.
- Tsangaratos, P. and Ilia, I., 2016. *Comparison of a logistic regression and Naïve Bayes classifier in landslide susceptibility assessments: The influence of models complexity and training dataset size*. *Catena*, 145, pp.164-179.
- Vapnik, V. (2013). *The nature of statistical learning theory*. Springer science & business media.
- Yao, X., Tham, L. G., & Dai, F. C. 2008. *Landslide susceptibility mapping based on support vector machine: a case study on natural slopes of Hong Kong, China*. *Geomorphology*, 101(4), 572-582.