

## تحلیل کمی ناپایداری های دامنه ای در دامنه های مشرف بر اتوبان در حال احداث تهران - شمال (تهران - سولقان) با استفاده از روش رگرسیون لجستیک

شهرام روستایی<sup>۱</sup>

داود مختاری<sup>۲</sup>

کریستینه جانانه<sup>۳</sup>

### چکیده

ناپایداری های دامنه ای از مشخص ترین نوع مخاطرات طبیعی هستند که با دخالت های انسانی تشدید شده و موجب ایجاد خسارت های جانی و مالی به ویژه در جاده های کوهستانی می گردند. بنابراین ارزیابی کمی پتانسیل وقوع ناپایداری ها در مناطقی که مستعد وقوع ناپایداری ها هستند ضروری می باشد. منطقه مورد مطالعه بزرگراه در حال احداث تهران - شمال می باشد که همیشه در معرض انواع ناپایداری ها قرار دارد.

در این مطالعه از روش رگرسیون لجستیک برای تحلیل کمی ناپایداری ها در دامنه های مشرف بر اتوبان تهران - شمال (حد فاصل تهران - سولقان) استفاده شده است. جهت بررسی پتانسیل وقوع حرکات دامنه ای لایه های جداگانه ۱۴ فاکتور موثر در وقوع ناپایداری ها (شامل طبقات ارتفاعی، شیب، جهت شیب، زمین شناسی، کاربری اراضی، بارش، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، پوشش گیاهی، اقلیم، LS، SPI و TWI) در محیط GIS تهیه و با لایه پراکنش ناپایداری های موجود انطباق داده شدند و تراکم آن ها در واحد سطح محاسبه شد. در ادامه با استفاده از نرم افزار ادریسی مدل رگرسیون لجستیک انجام شد.

با توجه به نتایج مشخص گردید که عوامل زمین شناسی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، اقلیم و LS با دارا بودن ضرایب مثبت، همبستگی بیشتری با وقوع ناپایداری ها نشان می دهند و اهمیت عوامل فاصله از گسل، فاصله از جاده و اقلیم به ترتیب بیشتر از سایر عوامل می باشد. بر اساس نقشه های تهیه شده، بخش های میانی و جنوبی اطراف جاده و قسمت کوچکی در شمال منطقه از نظر وقوع ناپایداری ها بیشترین پتانسیل را دارند و ۲۷/۱۴ درصد اراضی، مناطق با پتانسیل وقوع ناپایداری های متوسط به بالا هستند که ۸۶/۲۶ درصد ناپایداری ها در آن ها به وقوع پیوسته اند، همچنین ۴/۵۷ درصد منطقه دارای پتانسیل خیلی زیاد بوده که ۶۱ درصد ناپایداری ها در آن به وقوع پیوسته اند. در نهایت می توان گفت این مدل جهت پهنه بندی احتمال وقوع ناپایداری ها در منطقه مورد مطالعه مناسب می باشد.

**واژگان کلیدی:** ناپایداری های دامنه ای، رگرسیون لجستیک، بزرگراه تهران - شمال، پهنه بندی خطر.

### مقدمه

ناپایداری های دامنه ای شرایطی است که منجر به حرکت توده ای مواد تشکیل دهنده دامنه به سمت پایین می شوند (IAEG, 1990:13) این حرکت رو به پایین مواد سطحی، تحت تأثیر گرانش زمین صورت گرفته و میزان تحرک مواد با حضور آب موجود در رسوبات افزایش می یابد (Pareta et al, 2012:2). ناپایداری های دامنه ای یکی از انواع مخرب فرسایش در دامنه ها می باشند که موجب ایجاد خسارت های مالی و جانی در جاده ها می شوند. امروزه ناپایداری ها بیشتر از این که جنبه طبیعی داشته باشد، متاثر از دخالت و

<sup>۱</sup> استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی (نویسنده مسئول)

Email : sh\_roostaei@yahoo.com.com - Tel: 09143134410

<sup>۲</sup> استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری مخاطرات محیطی - ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی

دستکاری های انسانی هستند. جاده سازی به خصوص در مناطق کوهستانی باعث افزایش احتمال وقوع انواع ناپایداری های دامنه ای می شود چون تعادل طبیعی دامنه های مشرف به مسیر راه ها را بر هم زده، باعث تغییر شکل زمین شده و در حوزه فعالیت انسان ها خطراتی را بوجود می آورد (عزیزی، ۱۳۹۰: ۱۲). همه ساله وقوع انواع ناپایداری های دامنه ای در جاده ها خسارات جانی و مالی فراوانی را بوجود می آورند. اما با این حال برای ایجاد ارتباط بین مناطق مختلف، احداث جاده ها، اتوبان ها و آزادراه ها امری ضروری و غیر قابل اجتناب است (اعتضادی آملی و همکاران، ۱۳۹۴: ۲). به همین منظور قبل از احداث جاده ها باید مطالعات، بررسی ها، ارزیابی ها و برنامه ریزی های لازم جهت جلوگیری از احداث جاده ها در مناطق با خطر بالا و بسیار بالای وقوع انواع ناپایداری ها صورت پذیرد، و در جاده های احداث شده قبلی نیز باید مطالعاتی جهت پهنه بندی ناپایداری ها، برآورد احتمال وقوع در دامنه های مستعد از نظر عوامل موثر بر وقوع، و کمی سازی خطر وقوع انجام گیرد تا بر اساس آن، راه حل ها و تمهیداتی جهت جلوگیری هر چه بیشتر از به وجود آمدن خسارات مالی و جانی اندیشیده و اعمال شوند. از آن جایی که این اتوبان پس از تکمیل، تبدیل به یکی از پر تردد ترین جاده های کشور خواهد شد و با عبور از قسمت میانی رشته کوه البرز، نواحی مرکزی ایران را به شمال کشور ارتباط خواهد داد، لذا مطالعه ناپایداری های احتمالی دامنه های مشرف بر اتوبان به دلیل توپوگرافی کوهستانی منطقه، از اهمیت حیاتی برخوردار است.

در کل این نوع مطالعات در جاده های مختلف کشور با روش های متفاوت صورت گرفته اند که به عنوان نمونه می توان به موارد زیر اشاره کرد:

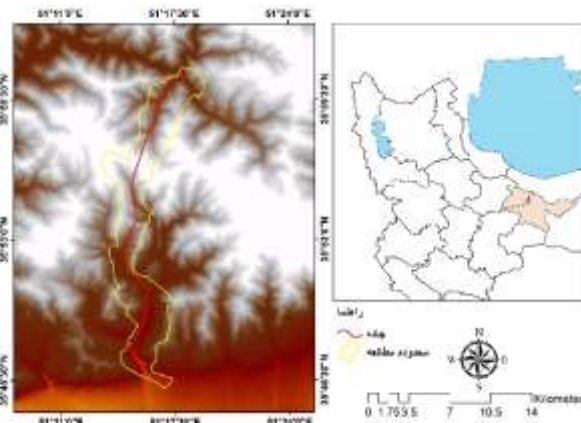
مختاری (۱۳۸۳) به ارزیابی ژئومورفولوژیکی بخشی از مسیر راه تبریز مرند در گردنه پیام در شمال غرب ایران پرداخته است. وی نتیجه گیری کرده که قرارگیری نهشته های نفوذپذیر روی ساختارهای نفوذناپذیر خطر وقوع حرکات توده ای در دامنه های مشرف بر جاده را افزایش داده است. لذا، ساخت و ساز و انجام عملیات خاکی باید با احتیاط صورت گیرد. متشرعی و همکاران (۱۳۹۱)، خطر وقوع لغزش در جاده تهران - چالوس و بزرگراه در دست احداث را پهنه بندی کردند. طبق نتایج بدست آمده، از ۶۶ کیلومتر کل طول جاده ۱۶ درصد دارای خطر بسیار زیاد و ۴۲ درصد دارای خطر زیاد برای وقوع زمین لغزش می باشد. همچنین از ۱۷ کیلومتر طول بزرگراه در حال ساخت، ۱۲ درصد دارای خطر خیلی زیاد و ۳۳ درصد دارای خطر زیاد برای وقوع زمین لغزش می باشد. جعفرلو و همکاران (۱۳۹۲) در مقاله ای تحت عنوان "پهنه بندی خطر ناپایداری دامنه ها در محدوده جاده چالوس (حد فاصل کرج- گچسار) با کمک GIS" از روش آماری کریجینگ استفاده نمودند. بازدید های صحرائی نشان داد که نقشه پهنه بندی تهیه شده، تا حد مطلوبی مناطق مستعد خطر ناپایداری را متمایز کرده است. روستایی و همکاران (۱۳۹۴) روش رگرسیون لجستیک را در پهنه بندی خطر وقوع ناپایداری های دامنه ای در جاده های کوهستانی تنگه دره دیز بکار بردند. طبق نتایج، از میان عوامل بررسی شده، عامل شیب، فاصله از گسل و طبقات ارتفاعی مهم ترین عوامل مؤثر در وقوع ناپایداری های دامنه ای در حوضه می باشند.

این روش در جاده های کوهستانی کشورهای دیگر نیز مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله Das و همکاران (2009) به ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از رگرسیون لجستیک و مقایسه آن با سیستم طبقه بندی توده سنگ در قسمتی از یک جاده در هیمالیای شمالی پرداخته اند. آن ها از عکس های هوایی و تصاویر ماهواره ای و بازدید های صحرائی جهت تعیین موقعیت نقاط زمین لغزش استفاده کرده و سپس اطلاعات را وارد نرم افزار Arc GIS نموده اند. عملکرد مدل رگرسیون لجستیک توسط منحنی ROC ارزیابی شده است. اعتبار سنجی میدانی نتایج توسط سیستم طبقه بندی احتمال پایداری دامنه (SSPC) حاکی از ارتباط ۷۲٪ بین طبقات حساسیت بالا و بسیار بالا نسبت به وقوع زمین لغزش است. Sahoo و همکاران (۲۰۰۹) نیز به ارزیابی نیمه کمی حساسیت وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و سیستم طبقه بندی توده سنگ در قسمتی از جاده اصلی اوتاراخاند هیمالیا در هند پرداخته اند. آن ها از این مدل برای تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش و همچنین از سیستم طبقه بندی SSPC جهت ارزیابی پایداری دامنه استفاده کرده اند. سپس از نتیجه ارزیابی پایداری دامنه برای اعتبار سنجی نقشه حساسیت نهایی کل منطقه استفاده شده است. ارزیابی دقت نیز با تجزیه و تحلیل منحنی ROC صورت گرفته است. بر اساس نتایج حاصله، شیب، تراکم زهکشی و فاصله از جاده دارای بیشترین اهمیت در ناپایداری دامنه ای هستند. در نهایت با استفاده از نقشه پیش بینی نهایی، منطقه مورد مطالعه از لحاظ حساسیت زمین لغزش به چهار طبقه تقسیم بندی شده است.

هدف از این پژوهش، ارزیابی کمی احتمال وقوع حرکات دامنه ای در حد فاصل تهران - سولقان از اتوبان در حال احداث تهران - شمال می باشد. این منطقه به دلیل دست کاری های گسترده صورت گرفته و نیز شرایط طبیعی، از نظر وقوع حرکات دامنه ای بسیار مستعد می باشد. پژوهش حاضر با استفاده از روش رگرسیون خطی به پهنه بندی زمین لغزش پرداخته است. رگرسیون چند متغیره یک روش آماری است که با استفاده از آن می توان وزن عوامل مؤثر بر ناپایداری های دامنه ای را تعیین و با استفاده از آن احتمال وقوع آن ها را پیش بینی نمود (Nandy et al, 2001:156; Dewitte et al, 2010:158). هدف از این مطالعه شناسایی ناپایداری های دامنه ای در دامنه های مشرف بر اتوبان در حال احداث، کمی سازی وقوع ناپایداری های دامنه ای بر روی قسمت های مختلف اتوبان و میزان برآورد توزیع احتمال وقوع ناپایداری هایی است که می تواند خسارات اقتصادی زیادی به بار آورد و جان مسافران را به خطر اندازد.

### معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مختصات جغرافیایی  $39^{\circ} 51'$  تا  $58^{\circ} 51'$  طول شرقی و  $36^{\circ} 07'$  تا  $36^{\circ} 17'$  عرض شمالی در قسمت شمال و شمال غرب استان تهران واقع شده است (شکل ۱). در این منطقه به بررسی اتوبان در حال احداث تهران - شمال در حد فاصل تهران تا سولقان به طول ۱۲ کیلومتر و مساحت  $348.579$  کیلومتر مربع پرداخته شده است.



شکل ۱: نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

### داده و روش ها

جهت بررسی پتانسیل وقوع حرکات دامنه ای ۱۴ فاکتور طبقات ارتفاعی، شیب، جهت شیب، زمین شناسی، کاربری اراضی، بارش، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، پوشش گیاهی، اقلیم، LS (طول شیب)، SPI (شاخص قدرت آبراهه ای) و TWI (شاخص رطوبت کلی) به عنوان فاکتورهای مؤثر در وقوع ناپایداری های دامنه ای منطقه تشخیص داده شدند که مراحل تهیه آن ها به طور خلاصه عبارتند از: تهیه نقشه عوامل مؤثر در وقوع حرکات دامنه ای منطقه به صورت لایه های مجزا در محیط GIS و انتقال به نرم افزار ادریسی که شامل: ۱: تهیه لایه های مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، رودخانه، گسل از طریق نقشه توپوگرافی  $1/25000$  و ایجاد نقشه های فاصله از پارامترهای رودخانه و گسل، ۲: ایجاد نقشه های شیب و جهت شیب از DEM (مدل رقومی ارتفاعی)، ۳: تهیه نقشه کاربری اراضی و شاخص پوشش گیاهی منطقه بر اساس طبقه بندی نظارت شده تصویر ماهواره ای لندست ۸ سنجنده OLI، ۴: تهیه نقشه زمین شناسی، ۵: تهیه لایه بارش و اقلیم بر اساس اطلاعات گرفته شده از سازمان هواشناسی کل کشور، ۶: تهیه لایه های LS (طول شیب)، SPI (شاخص قدرت آبراهه ای) و TWI (شاخص رطوبت کلی) از روی لایه DEM (مدل رقومی ارتفاعی)، ۷: تبدیل داده های پراکنش حرکات دامنه ای منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره ای لندست و نیز گوگل ارث، ۸: انطباق لایه های اطلاعاتی با نقشه سیاهه ناپایداری های منطقه و محاسبه تراکم آن ها در واحد سطح، ۹: انجام مدل رگرسیون لجستیک با استفاده از نرم افزار ادریسی.

مدل رگرسیون لجستیک، یکی از روش‌های آماری پیش‌بینی کننده برای متغیرهای وابسته‌ای است که حالت صفر و یک با وقوع وعدم وقوع (مانند ناپایداری‌ها) ارتباط دارند. در این روش رابطه رگرسیونی متغیرها خطی نبوده بلکه به صورت منحنی S شکل یا لجستیک است. در این مدل برآوردها و تخمین‌ها در دامنه‌ای از صفر تا یک قرار می‌گیرند که اعداد نزدیک به صفر نشان‌دهنده احتمال وقوع کمتر و اعداد نزدیک به یک نشان‌دهنده احتمال وقوع بیشتر هستند. در رگرسیون لجستیک متغیر وابسته با استفاده از رابطه (۱): (متولی، ۱۳۸۸: ۷۶) بیان می‌شود:

$$Y = \text{Logit}(p) = \ln(p/1-p) = C_0 + C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_nx_n \quad \text{رابطه ۱}$$

لوجیت (Logit): یا لگاریتم شانس در واقع مقدار لگاریتم طبیعی احتمال است،  $p$ : احتمال متغیر وابسته ( $y$ ) است،  $p/1 - p$ : نسبت شانس یا احتمال،  $C_0$ : مقدار ثابت می‌باشد، ( $C_1 \dots C_n$ ): ضرایبی هستند که مشارکت عوامل مستقل ( $X_1, X_2 \dots X_n$ ) را برای متغیر  $y$  نشان می‌دهند، ( $X_1 \dots X_n$ ): متغیرهای مستقل هستند. برای انجام روش فوق، نرم‌افزار ادریسی مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه، پس از وارد کردن داده‌ها به مدل آماری رگرسیون لجستیک، ضرایب مدل با استفاده از پارامترهای مؤثر در نرم‌افزار ادریسی استخراج شدند. جهت ارزیابی دقت نتایج بدست آمده از آزمون‌های کی دو (Chi Square)، پی آر دو [Pseudo R Square (PR ۲)] و شاخص راک (ROC) استفاده گردید.

آزمون کی دو، یک تست معتبر و معمولی برای رگرسیون لجستیک است که از اختلاف بین  $-2\ln(L)$  برای مدل بهترین برازش و  $-2\ln(L_0)$  برای فرضیه صفر بدست می‌آید. چنانچه این آماره در سطح ۹۵ درصد معنی دار باشد ( $\text{Chi Square} > 14.1$ ) فرضیه صفر ( $H_0$ ) رد می‌شود (متولی: ۱۳۸۸).

مقدار  $PR^2$  نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$PR^2 = 1 - \frac{\ln(L)}{\ln(L_0)} \quad \text{رابطه ۲}$$

مقدار  $PR^2$  نشان می‌دهد که چگونه مدل لوجیت، مجموعه داده‌ها را برازش می‌دهد (Menard 1995:48). بنابراین  $PR^2$  مساوی با ۱ نشان‌دهنده برازش کامل مدل است، و صفر نشان‌دهنده عدم رابطه متغیرهای مستقل با متغیر وابسته می‌باشد. چنانچه مقدار  $PR^2$  بزرگ‌تر از ۰/۲ باشد نشان‌دهنده برازش نسبتاً خوب مدل است (Ayalew & Yamagishi, 2005:28).

شاخص ROC بر این مساله توجه دارد که مدل تا چه اندازه می‌تواند متغیر وابسته را به خوبی پیش‌بینی کند. نرم‌افزار ادریسی از معیار ROC برای مقایسه یک نقشه بولین (وجود یا عدم وجود ناپایداری‌ها) با نقشه احتمال به کار می‌رود. مقدار ROC از ۰/۵ تا ۱ متغیر است که ۱ نشان‌دهنده تطابق کامل و ۰/۵ نشان‌دهنده تطابق اتفاقی است (متولی، ۱۳۸۸: ۷۹).

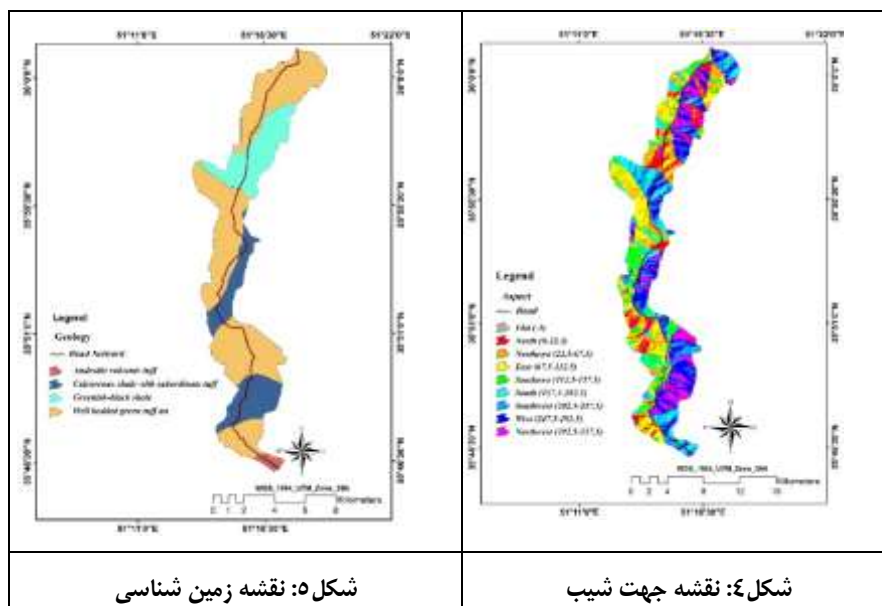
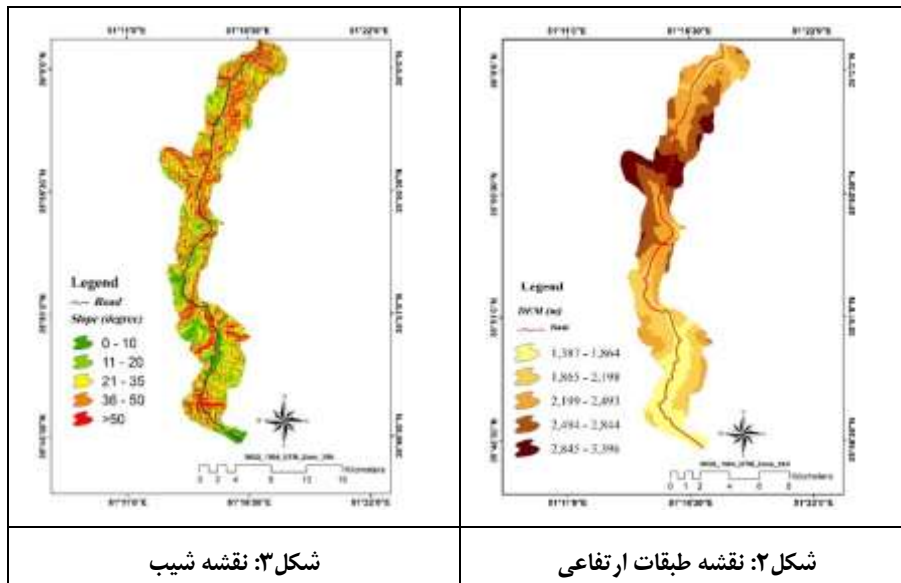
در نهایت، ارزیابی نقشه پهنه‌بندی خطر ناپایداری‌های دامنه‌ای توسط شاخص SCAI صورت گرفت. شاخص SCAI در واقع نسبت درصد مساحت هر یک از کلاس‌های پهنه‌بندی خطر ناپایداری‌ها به درصد ناپایداری‌های اتفاق افتاده در هر کلاس است. روش مذکور دقت را به صورت کیفی ارائه می‌کند و بیانگر صحت یا سقم نقشه پهنه‌بندی خطر ناپایداری‌های دامنه‌ای با توجه به مقدار SCAI است (منظور از صحت یعنی کاهش مقدار SCAI از کلاس خطر کم به سمت کلاس خطر زیاد است).

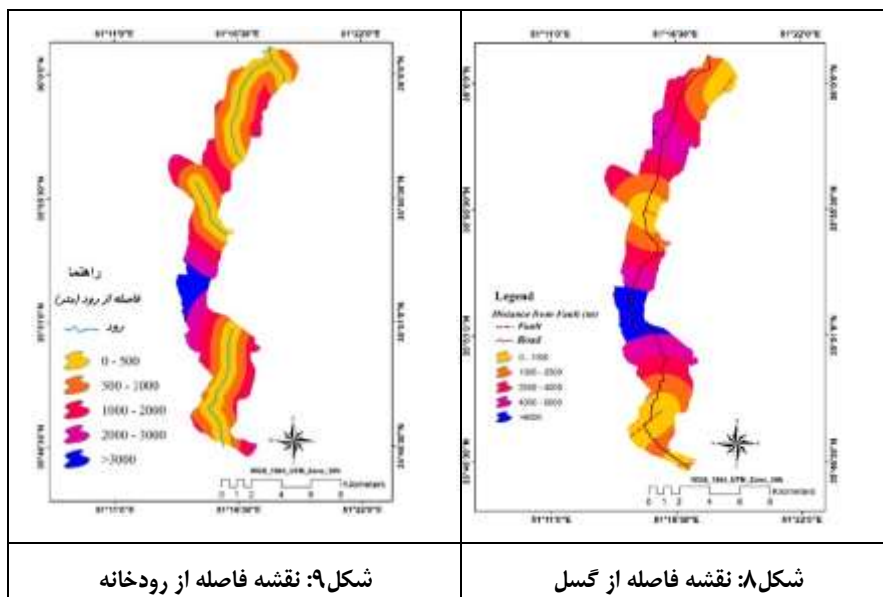
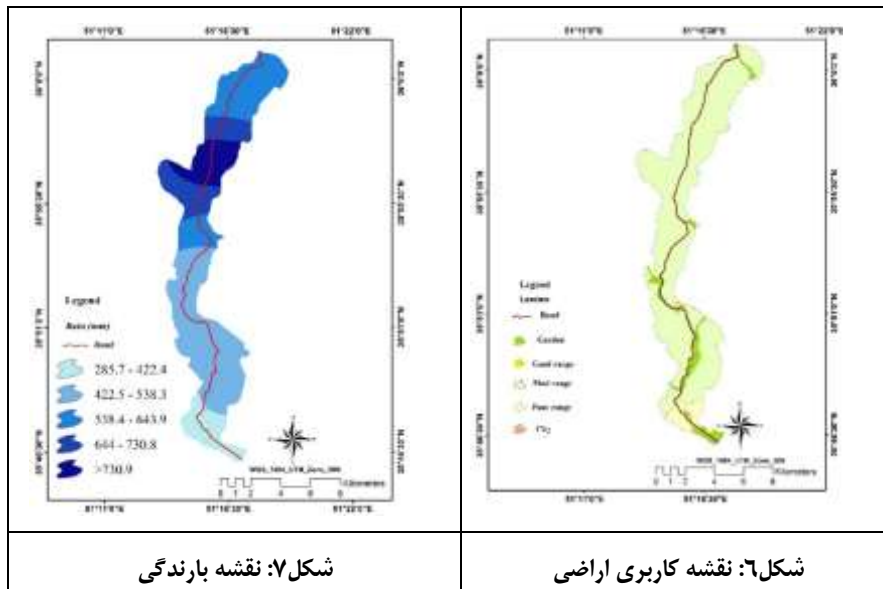
## بحث و بررسی

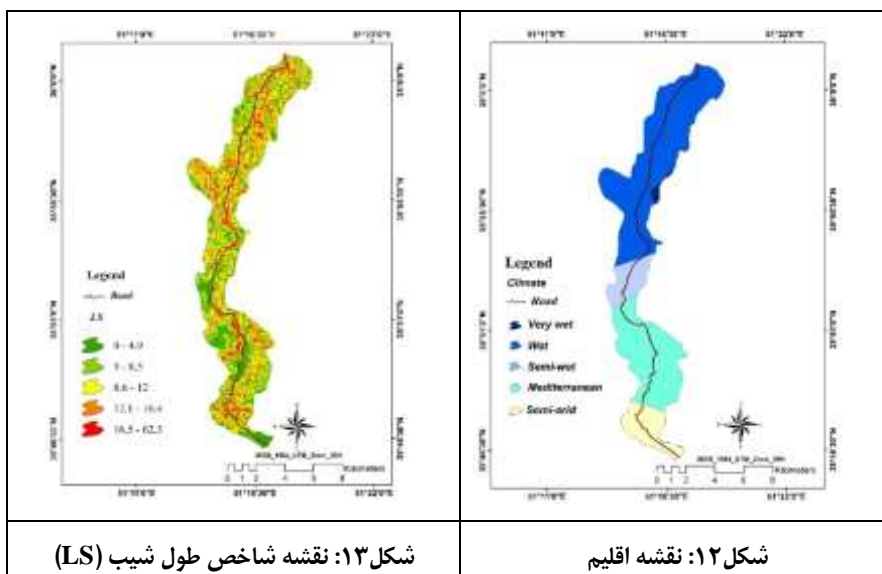
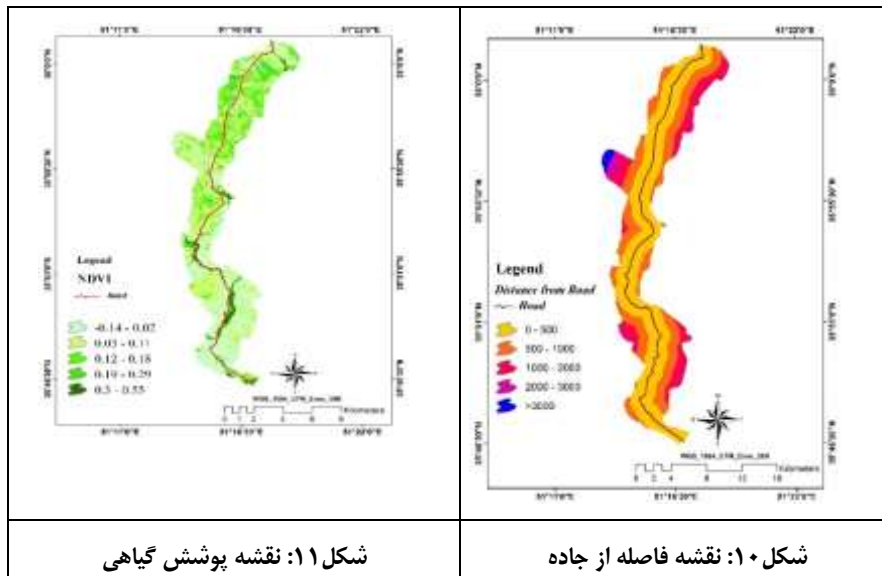
نقشه‌های مربوط به ۱۴ فاکتور مؤثر و همچنین اعمال مدل در شکل‌های ۲ تا ۱۵ ارائه شده است. بر اساس نقشه طبقات ارتفاعی (شکل ۲) حوضه مطالعاتی بین طبقات ارتفاعی حداقل ۱۳۷۸ و حداکثر ۳۳۹۶ متر واقع شده و به پنج طبقه ارتفاعی تقسیم شده است. در حالت کلی ارتفاع حوضه از جنوب به شمال افزایش یافته اما بیشترین ارتفاع در بخش میانی قرار دارد. با توجه به شکل ۳، منطقه مورد مطالعه از نظر شیب به پنج طبقه تقسیم شده که شیب‌های ۰ تا بالاتر از ۵۰ درجه را شامل می‌شود. با توجه به این نقشه، دامنه‌ها در بخش‌های میانی تا شمالی‌ترین قسمت حوضه دارای شیب‌های تند و بسیار تند (۳۶ تا بالاتر از ۵۰ درجه) هستند. در قسمت جنوبی نیز دامنه‌هایی با شیب تند و بسیار تند به چشم می‌خورند و تنها در قسمتی از جنوب حوضه دامنه‌ها دارای شیب کم تا متوسط (۰ تا ۲۱



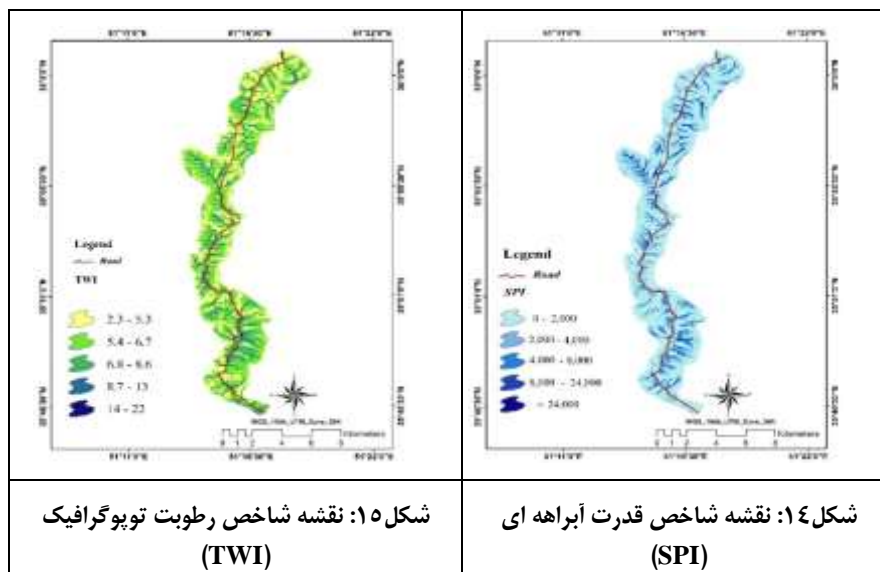
درجه) می باشند. از تحلیل این نقشه می توان نتیجه گرفت که در بیشتر بخش های حوضه دامنه های مشرف بر جاده دارای شیب های متوسط تا بسیار تند هستند که می تواند به عنوان یکی از عوامل موثر در وقوع ناپایداری های دامنه ای نقش داشته باشد. بر اساس شکل ۴، با توجه به این که مسیر جاده شمالی جنوبی می باشد لذا جهت شیب دامنه های شرقی جاده عمدتاً بسمت غرب بوده و دامنه های غربی عمدتاً رو به شرق هستند. از نظر زمین شناسی (شکل ۵) بخش اعظم منطقه متشکل از توف های سبز کرج هستند و بخش های کمی از آن توسط شیل های سبز - سیاه (جنوب و مرکز حوضه) و شیل های آهکی (نیمه شمالی حوضه) پوشیده شده اند. در جنوبی ترین بخش حوضه منطقه کوچکی را سنگ های آندزیتی تشکیل می دهند. با توجه به نقشه کاربری اراضی (شکل ۶) مشاهده می کنیم که در حوضه سولقان اکثر زمین ها را مراتع با میزان پوشش متفاوت (مراتع خوب، متوسط و ضعیف) می پوشانند اما بخش اعظم این حوضه از نوع مراتع متوسط می باشد. در این حوضه باغات تنها در کنار رودخانه ها مشاهده می شوند. در نقشه تهیه شده (شکل ۱۲) اقلیم منطقه به پنج طبقه نیمه خشک، مدیترانه ای، نیمه مرطوب، مرطوب و خیلی مرطوب تقسیم شده است. اقلیم حوضه از جنوب به شمال از نیمه خشک تا مرطوب و بسیار مرطوب تغییر می کند و میزان بارندگی از جنوب به شمال حوضه به طور چشمگیری افزایش یافته است که البته بیشترین بارش، سازگار با بالاترین ارتفاعات منطقه است (شکل ۷). به همین ترتیب پوشش گیاهی حوضه (شکل ۱۱) که به پنج طبقه تقسیم شده با حرکت از جنوب به شمال و افزایش رطوبت و میزان بارندگی متراکم تر شده است. پس می توان نتیجه گرفت که میزان پوشش گیاهی یا نوع اقلیم و میزان بارندگی رابطه مستقیمی با هم دارند. در شکل ۸ گسل های منطقه نشان داده شده اند و فاصله از گسل ها در پنج طبقه از ۰ تا بالاتر از ۶۰۰۰ متر تقسیم بندی شده است. ۴ گسل در محدوده این حوضه وجود دارند که دو گسل در جنوبی ترین بخش حوضه، یک گسل در شمالی ترین بخش، و یک مورد نیز در بخش میانی قرار دارند. چنانکه مشاهده می شود در جنوب و شمال حوضه احتمال بالا و بسیار بالای وقوع ناپایداری ها در کمترین فاصله از گسل ها یعنی طبقه اول (۰ تا ۱۰۰۰ متر) قرار گرفته است. با توجه به شکل ۹ در حوضه مورد مطالعه جریان سه رودخانه که از محدوده حوضه مورد مطالعه عبور می کنند را در بخش های شمالی، میانی و جنوبی مشاهده می کنیم که فاصله ها از رودخانه در پنج طبقه و از ۰ تا بالاتر از ۳۰۰۰ متر تقسیم بندی شده اند. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود فاصله از جاده در پنج طبقه و از ۰ تا بالاتر از ۳۰۰۰ متر تقسیم بندی شده است. در شکل ۱۳ مشاهده می کنیم که عامل طول شیب در قسمت شمالی حوضه و نیز بخش جنوبی حوضه که رودخانه های بزرگتری جریان دارند و جریانات بیشتری از بالادست دامنه ها وجود دارند بیشتر است. با مراجعه به نقشه شیب حوضه (شکل ۳) مشاهده می کنیم که شاخص طول شیب در جاهایی که شیب حوضه بیشتر است اعداد بزرگتری را نشان می دهد. در شکل ۱۴ شاخص قدرت آبراهه ای به پنج طبقه تقسیم شده و مشاهده می شود که قدرت فرساینده گی جریان آب در محل سیستم زهکشی و آبراهه ها به بیشترین حد خود رسیده و در سایر بخش ها، کمتر است. در شکل ۱۵ به وضوح قابل مشاهده است که شاخص رطوبت توپوگرافیک در قسمت هایی از دره ها و فرورفتگی ها که بیشترین مقدار را نشان می دهند، معرف سطوح اشباع شده هستند که تولید رواناب کرده اند. این پارامتر انطباق خوبی با شاخص قدرت آبراهه ای نشان می دهد.







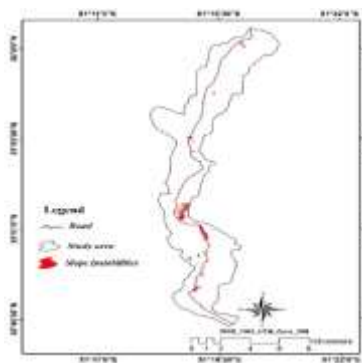




پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی مختلف، در ناحیه مورد مطالعه، نقشه سیاهه ناپایداری ها به صورت پهنه های ناپایداری براساس تصاویر گوگل ارث و نقاط کنترل زمینی تهیه شد، مساحت ناپایداری های دامنه ای رخ داده در حوضه سولقان برابر با ۹۱/۵۳ هکتار معادل ۱/۱۶ درصد از مساحت کل منطقه می باشد. شکل ۱۶ پراکنش ناپایداری های دامنه ای حوضه مذکور را نشان می دهد.

بر اساس نقشه پراکنش ناپایداری های دامنه ای (شکل ۱۶) بیشترین ناپایداری های حوضه در ارتفاعات ۱۸۶۵ تا ۲۴۹۳ متر اتفاق افتاده اند. از مقایسه نقشه پراکنش ناپایداری های دامنه ای (شکل ۱۶) منطقه با نقشه جهت شیب (شکل ۴) مشخص می شود که اکثر ناپایداری های با احتمال وقوع بالا و بسیار بالا جهات شیب غرب و قسمت های کمتری، جهات شمال غرب و جنوب غرب دارند. همچنین، احتمال وقوع ناپایداری های متوسط تا بسیار بالا در منطقه مورد مطالعه در سنگ های توفی بالاتر است چرا که در اثر دگرسانی، سست شده و کانی های موجود در آن ها به کانی های رسی تبدیل می شوند و در نتیجه، احتمال لغزش و ریزش در آن ها بیشتر است. در مقایسه با نقشه کاربری اراضی (شکل ۶) ناپایداری های با احتمال وقوع متوسط تا خیلی بالا در مراتع متوسط رخ می دهند. با توجه به نقشه فاصله از رودخانه (شکل ۹) وقوع ناپایداری ها در کمترین فاصله از رودخانه ای که در شمال حوضه جریان دارد اتفاق افتاده است و در جنوب حوضه نیز ناپایداری ها تا فاصله ۱۰۰۰ متری از رودخانه وجود دارند. همچنین نقشه فاصله از جاده (شکل ۱۰) نشان می دهد که وقوع ناپایداری ها در کمترین فاصله از اتوبان در حال احداث یعنی تا ۵۰۰ متری جاده اتفاق افتاده اند.

ضرایب مدل محاسبه شده برای پارامترهای مؤثر به روش رگرسیون لجستیک در جدول (۱) ارائه شده اند. ارزیابی دقت نتایج حاصله در جدول (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۶: نقشه پراکنش ناپایداری های دامنه ای محدوده اتوبان تهران-سولقان

مقدار شاخص کی دو برای محدوده سولقان ۶۱۱/۰۵۱۹ تعیین گردید و با توجه به این که مقادیر حاصله بسیار بیشتر از مقدار آستانه تعیین شده است بنابراین فرض صفر بودن تمام ضرایب رد می‌گردد. مقدار شاخص  $PR^2$  برای محدوده سولقان برابر با ۰/۴۲۱۱ است که بزرگ‌تر از آستانه ۰/۲ می‌باشد، و لذا این مدل برازش قابل قبولی را نشان می‌دهد. مقدار شاخص راک ۰/۹۶۷۸ برای محدوده سولقان نیز نشان‌دهنده همبستگی بسیار بالای بین متغیر مستقل و وابسته است.

جدول ۱: ضرایب حاصل از مدل رگرسیون لجستیک برای محدوده مورد مطالعه

متغیرهای مستقل	ضرایب حاصل از مدل	متغیرهای مستقل	ضرایب حاصل از مدل
$X_0$ عدد ثابت	-۹/۷۶۸۷	$X_8$ فاصله از رودخانه	۰/۱۷۸۵
$X_1$ طبقات ارتفاعی	-۰/۵۹۵۱	$X_9$ فاصله از جاده	۰/۷۶۲۷
$X_2$ شیب	-۰/۱۳۹۸	$X_{10}$ پوشش گیاهی	-۰/۱۶۸۲
$X_3$ جهت شیب	-۰/۹۰۸۶	$X_{11}$ اقلیم	۰/۷۳۲۵
$X_4$ زمین شناسی	۰/۲۲۰۰	$X_{12}$ طول شیب	۰/۵۹۶۹
$X_5$ کاربری اراضی	۰/۵۸۰۵	$X_{13}$ شاخص قدرت آبراهه ای	-۰/۳۸۸۷
$X_6$ بارش	-۱/۳۴۹۷	$X_{14}$ شاخص رطوبت کلی	-۰/۰۹۷۴
$X_7$ فاصله از گسل	۰/۷۹۷۴		

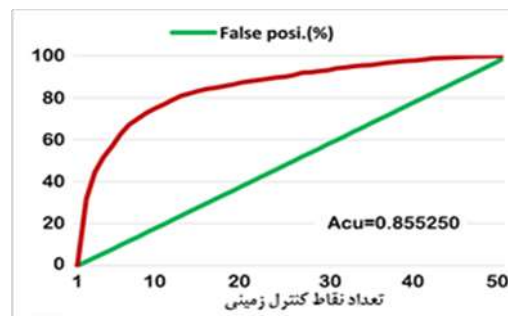
جدول ۲: شاخص‌های آماری حاصله برای ارزیابی مدل

شاخص	مقدار سولقان
Pseudo R square	۰/۴۲۱۱
Chi Square	۶۱۱/۰۵۱۹
Goodness of Fit	۱۸۳۶۲/۳۱۸۹

نتایج تحلیل منحنی ROC برای مدل رگرسیون لجستیک (شکل ۱۷) نشان داد که نقشه حساسیت ناپایداری تهیه شده در منطقه مورد مطالعه با سطح زیر منحنی ۰/۸۵۵۲۵۰ دارای قدرت پیش‌بینی خیلی خوب می‌باشد. در تعیین تعداد پارامترهای مستقل در وقوع ناپایداری های هیچ استاندارد وجود ندارد. نتیجه مدل برای منطقه مورد مطالعه در رابطه (۳) نشان داده شده است.

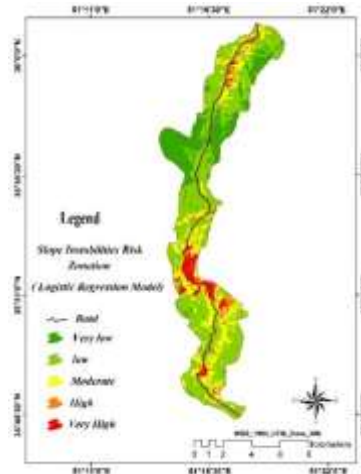
رابطه ۳:

$$\text{Logit (Slope instabilities)} = -9.7687 - 0.5951 \times X_1 - 0.1398 \times X_2 + 0.7627 \times X_3 + 0.2200 \times X_4 + 0.5805 \times X_5 - 1.3497 \times X_6 + 0.7974 \times X_7 + 0.1785 \times X_8 - 0.9086 \times X_9 - 0.1682 \times X_{10} + 0.7325 \times X_{11} + 0.5969 \times X_{12} - 0.3887 \times X_{13} - 0.0974 \times X_{14}$$



شکل ۱۷: نمودار ROC و سطح زیر منحنی مربوط به دقت نقشه حساسیت پهنه‌بندی ناپایداری‌ها به روش رگرسیون لجستیک در منطقه سولقان

پس از مشخص شدن ارزیابی دقت مدل رگرسیون لجستیک با استفاده از شاخص‌های ذکر شده، با اعمال فرمول‌های فوق نقشه پهنه‌بندی حساسیت ناپایداری های دامنه ای منطقه مورد مطالعه تهیه گردید که نتایج حاصل از آن‌ها در شکل ۱۸ نشان داده شده است. در مدل حاضر، در محدوده سولقان عامل فاصله از گسل با بیشترین ضریب  $0/7974$  بهترین متغیر پیش‌بینی کننده احتمال وقوع ناپایداری های دامنه ای در منطقه است و پس از آن به ترتیب شاخص های فاصله از جاده با ضریب  $0/7627$  و اقلیم با ضریب  $0/7325$  بیشترین ضرایب را به خود اختصاص داده‌اند. پس از انجام پهنه‌بندی ناپایداری‌ها، درصد پهنه‌های ناپایداری های دامنه ای در هر کلاس محاسبه شد. نتیجه نشان داد که در محدوده سولقان مناطق با پتانسیل وقوع بسیار بالا بیشترین درصد از میزان مساحت کل منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. جدول (۳) درصد پهنه‌های ناپایداری در هر کلاس در منطقه موردنظر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸: نقشه پهنه‌بندی حساسیت ناپایداری های دامنه ای محدوده اتوبان تهران-سولقان

جدول ۳: مساحت پهنه های ناپایداری ها به درصد برای هر کلاس در محدوده سولقان

کلاس	مساحت (درصد) برای محدوده سولقان
بسیار پایین	۰/۳۰
پایین	۱۳/۴۴
متوسط	۱۱/۲۸
بالا	۱۳/۹۱
بسیار بالا	۶۱/۰۷

جدول ۴: ارزیابی نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر ناپایداری های دامنه ای توسط شاخص SCAI

شاخص SCAI	درصد ناپایداری های سولقان	درصد مساحت سولقان	کلاس حساسیت
۶۳/۶۲	۰/۳۰	۱۸/۷۹	بسیار پایین
۳۵/۳	۱۳/۴۴	۴۵/۰۷	پایین
۱/۶۷	۱۱/۲۸	۱۸/۸۴	متوسط
۰/۲۶	۱۳/۹۱	۳/۷۳	بالا
۰/۰۷	۶۱/۰۷	۴/۵۷	بسیار بالا
-	۱۰۰	۱۰۰	جمع کل

### نتیجه گیری

در این پژوهش پهنه‌بندی پتانسیل ناپایداری های دامنه ای برای دامنه های مشرف به اتوبان در حال احداث تهران- سولقان با نام محدوده سولقان مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت انجام این کار از مجموعه‌ای از عوامل طبیعی و انسانی و ناپایداری های دامنه ای رخ داده در منطقه و مدل رگرسیون لجستیک استفاده شده است. با توجه به نتایج جدول (۱)، مشخص می‌گردد که در محدوده سولقان عوامل زمین شناسی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، اقلیم و LS با دارا بودن ضرایب مثبت، همبستگی بیشتر و سایر عوامل با دارا بودن ضرایب منفی، همبستگی کمتری را نشان می‌دهند. درواقع ضرایب منفی نشان‌دهنده عدم همبستگی نیستند بلکه به معنای همبستگی ضعیف‌تر نسبت به سایر عوامل هستند. بر این اساس در محدوده سولقان اهمیت عوامل فاصله از گسل، فاصله از جاده و اقلیم به ترتیب بیشتر از سایر عوامل می‌باشند. بر اساس نقشه های تهیه شده در محدوده سولقان بخش‌های میانی و جنوبی اطراف جاده و قسمت کوچکی در شمال منطقه از نظر وقوع ناپایداری ها بیشترین پتانسیل را دارند. با توجه به اطلاعات جدول شماره (۴)، در محدوده سولقان ۲۷/۱۴ درصد از اراضی به‌عنوان مناطق با پتانسیل وقوع ناپایداری های متوسط به بالا هستند که ۸۶/۲۶ درصد ناپایداری ها در آن به وقوع پیوسته اند، همچنین ۴/۵۷ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه در محدوده با پتانسیل خیلی زیاد قرار گرفته که ۶۱ درصد ناپایداری ها در آن به وقوع پیوسته است. بالا بودن مقدار شاخص ROC و نزدیک بودن آن به عدد یک نشان می‌دهد که ناپایداری ها در منطقه مورد مطالعه، رابطه قوی با مقادیر احتمال حاصل از مدل رگرسیون لجستیک دارند و ارزیابی نقشه پهنه بندی خطر ناپایداری ها با شاخص SCAI نشان داد که همبستگی بالایی بین نقشه خطر تهیه شده با نقاط ناپایداری های موجود که در بازدهای میدانی نیز نقاط تایید شده اند وجود دارد. این وضعیت منطبق بر کاهش SCAI به ویژه در کلاس‌های خطر زیاد و خیلی زیاد است و نشان‌دهنده همبستگی بالای نقشه خطر تهیه شده با نقاط ناپایداری ها و بازدهای میدانی در این منطقه می‌باشد. درنهایت می‌توان گفت مدل آماری رگرسیون لجستیک مدلی مناسب جهت پهنه بندی احتمال وقوع ناپایداری ها در منطقه مورد مطالعه در کنار خطوط ارتباطی به شمار می‌رود. به عنوان نتیجه‌گیری نهایی تحقیق می‌توان گفت علاوه بر عوامل طبیعی، عوامل انسانی خصوصاً جاده‌سازی غیراصولی می‌تواند نقش مهمی در وقوع ناپایداری های دامنه های مشرف بر جاده داشته باشد، برای کاهش نسبی خطرات و افزایش میزان پایداری دامنه‌ها لازم است تا حد ممکن از تغییر اکوسیستم و کاربری اراضی موجود اجتناب نمود، و همچنین هرگونه سیاست‌گذاری به منظور احداث سازه‌ها متناسب با شرایط ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی منطقه صورت پذیرد.



## منابع

- اعتضادی آملی، سینا، کیاپور، مسعود، تقوایی، محمد، (۱۳۹۴)، بررسی و مطالعه ایجاد زمین لغزش و تاثیر آن بر عملکرد جاده ای و روش موثر تثبیت آن با نرم افزار Geo-slop (مطالعه موردی کیلومتر ۳۰ محور ساری به کیاسر)، مجموعه مقالات اولین کنفرانس بین المللی مهندسی و علوم کاربردی، امارات- دبی، صص ۸-۱.
- جعفرلو، مرتضی، (۱۳۸۴)، پهنه بندی خطر ناپایداری دامنه ها در محدوده جاده چالوس (حداقل کرج-گچسار)، پایان نامه کارشناسی ارشد، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، دانشگاه تربیت مدرس، صص ۱۲۰-۱.
- روستایی، شهرام، مختاری، داود، خدایی، فاطمه، (۱۳۹۴)، پهنه بندی خطر وقوع ناپایداری های دامنه ای در جاده های کوهستانی تنگه دره دیز با استفاده از روش رگرسیون لجستیک، مجله مخاطرات محیط طبیعی، شماره ۶، صص ۱۰۳-۹۴.
- عزیزی، علیرضا، (۱۳۹۰)، پهنه بندی خطر زمین لغزش در مسیر فاسیان - پنو، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، صص ۱۴۷-۱.
- منتشرعی، آرش، قمی، جعفر، افتخاری، اکرم، پوزش، بهروز، شاهماری، مهدی، (۱۳۹۱)، پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش بر روی جاده تهران- چالوس و بزرگراه در دست احداث، فصلنامه زمین شناسی کاربردی، شماره ۲، صص ۱۵۸-۱۴۷.
- متولی، صدر الدین، اسماعیلی، رضا، حسین زاده، محمد مهدی، (۱۳۸۸)، تعیین حساسیت وقوع زمین لغزش با استفاده از رگرسیون لجستیک در حوضه آبریز واز (استان مازندران)، فصلنامه جغرافیای طبیعی، شماره ۵، صص ۸۳-۷۳.
- مختاری، داود، (۱۳۸۳)، ارزیابی ژئومورفولوژیکی بخشی از مسیر راه تبریز-مرند در گردنه پیام در شمال غرب ایران، فصلنامه مدرس علوم انسانی، شماره ۴، صص ۸۷-۱.
- Ayalew, I, Yamagishi, H, (2005), The application of GIS-based Logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yaahiko Mountains, central Japan, *Geomorphology*, v. 65, p. 15-31.
- Das, I, Sahoo, S, Westen, C, Stein, A, Hack, R., (2009), 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*, v. 114, p. 627-637.
- Dewitte, O, Chung, C, Cornet, Y, Daoudi, M, Demoulin, A, (2010), Combining spatial data in landslide reactivation susceptibility mapping: A likelihood ratio-based approach in W Belgium, *Geomorphology*, v. 122, p. 153-166.
- IAEG commission on landslides, (1990), Suggested nomenclature for landslides *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, v. 41, pp. 13-16.
- Menard, S, (1995), Applied logistic regression analysis, Sage university paper series on quantitative applications in social sciences, v. 106, p. 94-98.
- Nandy, G, Andrew, M, Richard, A, and Stephana, G, (2009), Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modeling and topographic attribute, Payette River, Idaho, *Geomorphology*, v. 37, p. 149-165.
- Pareta, K, Kumar, J, Pareta, U, (2012), Landslide hazard zonation using quantitative methods in GIS, *International Journal of Geospatial Engineering and Technology*, V.1, p. 1-9.
- Sahoo, S, 2009, A semi-quantative landslide susceptibility assessment using logistic regression model and rock mass classification system in a part of Uttarakhand Himalaya, India, Master degree thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enscheda, The Netherlands, and Indian Institute of Remote Sensing, National Remote Sensing Center (NRSC), Department of Space, Dehradun, India.