

مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

سال پنجم، شماره بیستم، تابستان ۱۳۹۴

دریافت مقاله: ۹۳/۱۱/۲۹ تأیید نهایی: ۹۴/۳/۶

صص ۹۱-۱۰۴

ارزیابی حساسیت‌پذیری فرسایش آبکندی با استفاده از رگرسیون لجستیک، در حوضه صلوات آباد استان کردستان

رضا اسماعیلی*، استادیار گروه جغرافیا - دانشگاه مازندران
روناک شوکتی، کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی - دانشگاه مازندران

چکیده

توزیع فضایی فرسایش آبکندی و تحلیل حساسیت‌پذیری آن نقش مهمی در برنامه‌ریزی محیطی ایفا می‌کند. از این رو، در این مقاله، روش آماری رگرسیون لجستیک برای تحلیل حساسیت‌پذیری فرسایش آبکندی در منطقه صلوات‌آباد استان کردستان مورد استفاده قرار گرفت. متغیرهای لیتولوژی، کاربری و پوشش اراضی و توپوگرافی مشتمل بر شیب، جهت دامنه، شکل دامنه، فاکتور طول دامنه، شاخص قدرت رود و شاخص رطوبت توپوگرافی، جهت آنالیز مورد استفاده قرار گرفتند. لایه فرسایش آبکندی به صورت پلیگونی ترسیم و سپس به لایه نقطه‌ای تبدیل گردید. از داده‌های نقطه‌ای به صورت تصادفی نمونه‌گیری شد. ۷۰ درصد نمونه‌ها به صورت آموزشی بوده و برای تهیه مدل مورد استفاده قرار گرفتند. ۳۰ درصد نمونه‌ها هم جهت اعتبارسنجی مدل به‌کاربرده شدند. ضرایب هریک از متغیرهای مستقل در نرم‌افزار SPSS تعیین گردیدند. با اعمال هر یک از ضرایب در لایه‌های اطلاعاتی، نقشه نهایی فرسایش آبکندی، در پنج طبقه حساسیت حاصل گردید. اعتبارسنجی داده‌ها با استفاده از آمارهای مختلف کای اسکور و ترسیم منحنی ROC مورد ارزیابی قرار گرفت. مساحت زیرمنحنی AUC معادل ۰/۷۹ محاسبه گردید که نشان‌دهنده تطبیق خوب مدل، جهت پیش‌بینی نقاط حساس به فرسایش آبکندی در منطقه است.

واژگان کلیدی: فرسایش آبکندی، رگرسیون لجستیک، صلوات‌آباد، کردستان.

۱- مقدمه

فرسایش آب‌کندی (گالی)^۱ یکی از مهم‌ترین اشکال فرسایش آبی در مناطق مختلف جهان است. طبق نظر پوسن^۲، آب‌کندها کانال‌هایی هستند که مساحت مقطع عرضی آن‌ها بیش از ۹۲۹ سانتی‌متر مربع باشد، البته این اصطلاح برای اولین بار توسط هیوج^۳ در سال ۱۹۷۷ به‌کاربرده شد (پوسن^۴، ۲۰۰۳ : ۹۴). کمتر از این، آستانه شیار نام دارد. این نوع فرسایش آبی می‌تواند موجب کاهش شدید حاصلخیزی خاک و تولید بار رسوبی فراوان گردد. رسوب‌گذاری در مسیر سازه‌های انسانی و تخریب آن‌ها از جمله اثرات این نوع فرسایش است.

برای برنامه‌ریزی کنترل فرسایش و ارزیابی تغییرات محیطی، توجه به توزیع فضایی فرسایش آب‌کندی مهم است. از این نظر تحلیل حساسیت‌پذیری فرسایش آب‌کندی و پیش‌بینی وقوع فضایی آن ضرورت پیدا می‌کند. حساسیت‌پذیری^۵ احتمال وقوع فضایی یک پدیده‌است که براساس روابط، بین پراکندگی حوادث (گالی، زمین لغزش و...) در گذشته و مجموعه عوامل مؤثر در تشکیل آن‌ها تعریف می‌شود (لوکا^۶ و همکاران ۲۰۱۱ : ۲۹۷).

تحقیقات گسترده‌ای در سطح جهان و ایران در ارتباط با فرسایش آب‌کندی انجام شده‌است. بیشتر این تحقیقات در زمینه شناسایی عوامل مؤثر در وقوع آب‌کندها، مورفومتری آب‌کندها و مقدار و حجم فرسایش خاک تمرکز یافته و مطالعات در ارتباط با توزیع فضایی فرسایش آب‌کندی و پیش‌بینی میزان حساسیت‌پذیری آن محدود بوده‌است. در اینجا به برخی از کارهای انجام‌شده در ایران و جهان اشاره می‌شود. جعفری گرزین و کاویان (۱۳۸۸) وقوع فرسایش خندقی را در حوضه سرخ‌آباد مازندران با روش شاخص وزنی تحلیل نمودند. راهی و همکاران (۱۳۹۰) اعتباریابی مدل‌های مختلف را در ارزیابی حساسیت‌پذیری فرسایش خندقی در استان بوشهر مورد ارزیابی قرار دادند. مقصودی و همکاران (۱۳۹۰) با روش شاخص همپوشانی، حساسیت اراضی به فرسایش خندقی را در منطقه زاریان قم مورد بررسی قرار دادند. فرج زاده و همکاران (۱۳۹۱) حساسیت به فرسایش خندقی را با روش رگرسیون چندمتغیره در منطقه کیاسر استان مازندران مورد ارزیابی قرار دادند. انتظاری و همکاران (۱۳۹۲) با روش تحلیل سلسله مراتبی، فرسایش خندقی را در حوضه آبریز دیره استان کرمانشاه مطالعه نمودند. وان والگم^۷ و همکاران (۲۰۰۸)، لوکا و همکاران (۲۰۱۱)، کونسکنتی^۸ و همکاران (۲۰۱۳ و ۲۰۱۴)، دوایت^۹ و همکاران (۲۰۱۵) حساسیت‌پذیری فرسایش آب‌کندی را با روش رگرسیون لجستیک مورد تحلیل و ارزیابی قرار دادند. در ایران، از رگرسیون لجستیک در تحقیقات ژئومورفولوژی خصوصاً زمین‌لغزش، استفاده شده‌است؛ اما تاکنون در پهنه‌بندی حساسیت به فرسایش آب‌کندی مورد استفاده قرار نگرفته‌است.

روش‌های مختلفی برای بررسی حساسیت‌پذیری پدیده‌های ژئومورفیک مانند زمین‌لغزش، فرسایش آب‌کندی و غیره وجود دارد. یکی از این روش‌های مطالعه به صورت تحلیل‌های آماری است. براساس روابط آماری بین متغیرهای کنترل‌کننده محیطی و توزیع فضایی فرسایش آب‌کندی، می‌توان مقادیر احتمالاتی را محاسبه و نقشه حساسیت‌پذیری این نوع فرسایش را تهیه نمود.

1 Gully erosion

2 Posen

3 Hauge

4 Poesen

5 susceptibility

6 Luca

7 Vanwallegem

8 Conoscenti

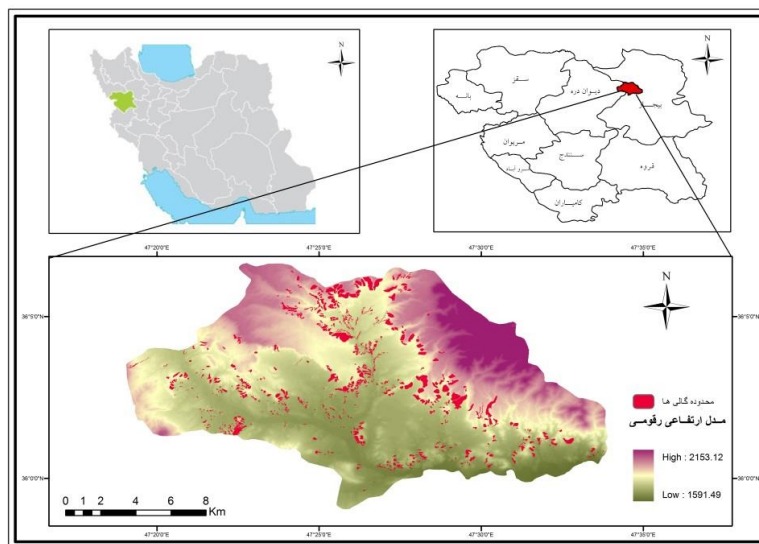
9 Dewitte

در این مقاله از روش رگرسیون لجستیک به عنوان یک روش آماری چند متغیره استفاده شده است. مهم‌ترین مزایای این تکنیک عبارت‌اند از:

- ۱- در این تکنیک متغیر وابسته به صورت دوتایی است (یعنی وجود یا عدم وجود یک مشخصه یا پدیده) که با استفاده از آن می‌توان مقادیر پیش‌بینی شده را به صورت احتمالاتی تفسیر کرد.
 - ۲- متغیرهای مورد استفاده در این تکنیک می‌توانند به صورت پیوسته یا گسسته (طبقه‌بندی شده) و یا ترکیبی از هر دو نوع باشند (لی، ۲۰۰۵).
 - ۳- نرمال بودن توزیع داده‌ها لازم نیست.
- باتوجه به مزایای رگرسیون لجستیک و اهمیت فرسایش آبکندی در کشور، تاکنون مطالعات کمی در زمینه توزیع فضایی و حساسیت‌پذیری این نوع فرسایش صورت گرفته است؛ از این‌رو، هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی توانایی رگرسیون لجستیک برای پیش‌بینی حساسیت‌پذیری فرسایش آبکندی است.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق بخشی از استان کردستان است که با مساحت ۱۸۶/۲ کیلومترمربع در محدوده‌ی ۳۰° ۱۸' ۴۷" تا ۳۴° ۳۰' ۴۷" طول شرقی و ۳۵° ۵۹' ۳۰" تا ۳۶° ۶' ۳۰" عرض شمالی در شمال غرب شهرستان بیجار واقع شده است (شکل ۱). این منطقه یکی از زیر حوضه‌های رودخانه قزل‌اوزن است. محدوده مورد مطالعه طبق تقسیم‌بندی بربریان (۱۹۸۱)، در محل برخورد زون‌های سنندج- سیرجان و ایران مرکزی جای گرفته است. حداکثر و حداقل ارتفاع منطقه به ترتیب ۲۱۵۳ و ۱۶۰۰ متر از سطح دریای آزاد می‌باشد. متوسط بارش منطقه مورد مطالعه بین ۲۸۰-۳۲۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. میانگین دمای سالانه منطقه بیجار ۱۱/۳ درجه سانتی‌گراد بوده و اقلیم منطقه نیز بر اساس روش آمبرژه سرد و خشک می‌باشد. گسترده‌ترین واحد سنگ‌شناسی در منطقه مارن ماسه‌ای سبز با میان لایه آهک کرم (سازند قم) است که ۵۲/۴ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهد. بیشترین کاربری اراضی به زمین‌هایی زیر کشت دیم (۵۱/۸ درصد) و سپس به مراتع فقیر (۴۶/۷ درصد) تعلق دارد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

۳- مواد و روش‌ها

تحلیل حساسیت‌پذیری فرسایش آب‌کندی در چهار مرحله اصلی انجام شد.

- ۱- جمع‌آوری داده‌ها و ایجاد پایگاه داده فضایی با عوامل مرتبط
- ۲- تعیین روابط بین فرسایش آب‌کندی و عوامل مؤثر بر آن با استفاده از رگرسیون لجستیک
- ۳- تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش آب‌کندی در محیط GIS
- ۴- اعتبارسنجی نتایج

در مرحله اول: عوامل مؤثر در ایجاد و گسترش فرسایش آب‌کندی در قالب سه پارامتر اصلی لیتولوژی، توپوگرافی و کاربری و پوشش زمین مورد بررسی قرار گرفتند. به علت تفاوت ناچیز مقدار بارش در منطقه، از لایه بارش در مدل‌سازی استفاده نشد. لایه لیتولوژی منطقه از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی (شیت‌های یاسوکند، تکاب و بیجار) کشور تهیه و استخراج گردید. لایه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث (سال ۲۰۱۴) تهیه شد. با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور و داده‌های ارتفاعی ماهواره اسپات، مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه با استفاده از نرم‌افزار ARC GIS بدست آمد. از DEM حاصله ویژگی‌های اولیه (لایه‌های شیب، جهت دامنه و شکل دامنه) و ثانویه توپوگرافی (فاکتور طول دامنه^۱ شاخص قدرت رود^۱ و شاخص رطوبت توپوگرافی^۱) محاسبه و استخراج گردید (جدول ۱). لایه پراکندگی فضایی فرسایش آب‌کندی با مشاهدات میدانی (شکل ۲) و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث به صورت پلیگونی ترسیم گردید (شکل ۱).

مرحله دوم: لایه پلیگونی فرسایش آب‌کندی به لایه نقطه‌ای تبدیل گردید. از این تبدیل ۹۸۰۰۰ نقطه بدست آمد. ۷۰ درصد نقاط (۶۸۶۰۰ نقطه) به عنوان لایه آموزشی و ۳۰ درصد نقاط (۲۹۴۰۰ نقطه) جهت اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. انتخاب این نقاط به صورت تصادفی و در نرم‌افزار ARC GIS انجام شد. به تعداد ۷۰ درصد نقاط آموزشی که دارای فرسایش آب‌کندی بودند، نقاط فاقد فرسایش آب‌کندی نیز به صورت تصادفی انتخاب گردید. از ترکیب دو لایه فوق، ۱۳۷۲۰۰ نقطه حاصل شد که ۵۰ درصد آن‌ها دارای فرسایش آب‌کندی (کد ۱) و ۵۰ درصد دیگر فاقد فرسایش آب‌کندی (کد ۰) بوده اند. از قطع دادن لایه مذکور با لایه‌های مختلف اطلاعاتی شامل لیتولوژی، کاربری و پوشش زمین، شیب، جهت دامنه، شکل دامنه، طول دامنه (LSF)، شاخص قدرت رود (SPI) و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، وقوع یا عدم وقوع فرسایش آب‌کندی در طبقات مختلف لایه‌ها مشخص گردید.

† Length-slope factor (LSF)

† Stream power index (SPI)

† Topographic wetness index (TWI)

شکل ۲: نمونه‌ای از فرسایش آبکندی در منطقه مورد مطالعه



جدول ۱: ویژگی‌های اولیه و ثانویه توپوگرافی و روش تهیه آن‌ها

توصیف	متغیر توپوگرافی	تقسیم‌بندی کلی
تهیه شده از نقشه توپوگرافی ۲۵۰۰۰ : ۱ سازمان نقشه‌برداری کشور و داده‌های ارتفاعی ماهواره اسپات	مدل ارتفاعی رقومی (DEM)	ویژگی‌های اولیه توپوگرافی
طبقه‌بندی شیب دامنه به درصد از DEM منطقه	شیب	
آزیموت دامنه نسبت به شمال در ۹ طبقه مستخرج از DEM منطقه	جهت دامنه	
طبقه‌بندی دامنه‌ها به سه گروه مستقیم، مقعر و محدب، مستخرج از DEM منطقه	شکل دامنه	ویژگی‌های ثانویه توپوگرافی*
$LSF = \left(\frac{fa \times cellsize}{22.13}\right)^{0.4} \times \left(\frac{\sin \sigma}{0.0896}\right)^{1.3}$	طول دامنه (LSF)	
$SPI = AS \times \tan \sigma$	شاخص قدرت رود (SPI)	
$TWI = \ln\left(\frac{AS}{\tan \sigma}\right)$	شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)	
* روابط ویژگی‌های ثانویه براساس فرمول‌های ارائه‌شده توسط مور و همکاران (۱۹۹۱) و به نقل از کانفورتی (۲۰۱۱) می‌باشد. در این روابط fa: جریان تجمعی است و بر اساس مدل ارتفاعی رقومی منطقه در GIS تهیه شد و σ : شیب بر حسب درجه می‌باشد.		

مرحله سوم: مدل رگرسیون لجستیک

رگرسیون لجستیک یک تکنیک آماری است که شامل یک یا چند متغیر مستقل برای پیش‌بینی احتمال یک متغیر دوتایی یا طبقه‌بندی شده (چندتایی) می‌باشد (هوسمر و لمشو، ۲۰۰۰). به بیان دیگر، رگرسیون لجستیک یک روش آماری چندمتغیره است که هدف آن یافتن بهترین مدل پردازش داده‌ها، جهت تشریح روابط بین متغیر وابسته (وجود یا عدم وجود آب‌کند) و متغیرهای مستقل می‌باشد (لی، ۲۰۰۵). با استفاده از رابطه زیر رگرسیون لجستیک قابل محاسبه است:

$$y = \frac{EXP(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n)}{1 + EXP(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که EXP : عدد نپرین (۲/۷۱۸) ، b_0 تا b_n ضرایب ثابت رگرسیون لجستیک و x_1 تا x_n متغیرهای مستقل تأثیرگذار هستند. ضرایب مدل با استفاده از نرم‌افزار SPSS محاسبه شدند. داده‌های متغیر وابسته به صورت کد دوتایی ۰ و ۱ (عدم وقوع و وقوع) مشخص شدند. متغیرهای مستقل نیز با توجه به تراکم فرسایش آب‌کندی در هر طبقه کدبندی شدند. بدین ترتیب که طبقات بدون آب‌کنند یا تراکم ناچیز با کد ۰ و سایر طبقات با افزایش تراکم آب‌کنند، کدهای بالاتر را دریافت نموده و جهت آنالیز وارد نرم‌افزار شدند.

قبل از محاسبات رگرسیون لجستیک، لازم است از ماهیت رابطه خطی بین متغیرها که در اصطلاح هم خطی^۳ نامیده می‌شود، مطلع شویم زیرا مدل رگرسیون لجستیک نسبت به هم خطی حساس است. در صورتی که چند متغیر مستقل با هم رابطه خطی داشته باشند، هم خطی چندگانه^۴ نام دارد (ازدمیر و التورال، ۲۰۱۳ : ۱۸۸). در این تحقیق برای تشخیص هم خطی چندگانه از شاخص‌های TOL^۵ و VIF^۶ استفاده گردید. مقدار TOL کوچک‌تر از ۰/۱ و مقدار VIF بزرگ‌تر از ۱۰، نشان‌دهنده هم خطی چندگانه شدید بین متغیرهای مستقل است (ازدمیر و التورال، ۲۰۱۳ : ۱۸۸). سپس محاسبات رگرسیون لجستیک با روش پیش‌رونده و چند مرحله‌ای انجام گردید. ضرایب آخرین مرحله (هشتم) به عنوان ضرایب مدل در نظر گرفته شدند. آماره والد^۷ برای آزمون معنی‌داری ضرایب رگرسیون لجستیک متغیرهای مستقل مورد استفاده قرار گرفت.

مرحله سوم : پس از محاسبه ضرایب رگرسیون لجستیک، مقادیر ضرایب در لایه‌های اطلاعاتی اعمال گردید و بر اساس آن نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش آب‌کندی در نرم‌افزار ARC GIS تهیه و طبقه‌بندی شد.
مرحله چهارم : پس از تهیه نقشه حساسیت‌پذیری، ۳۰ درصد نقاط (۲۹۴۰۰) مربوط به اعتبارسنجی مدل که دارای کد ۱ بوده‌اند، به همراه همین تعداد نقطه که فاقد این نوع فرسایش بوده و با کد ۰ مشخص شدند، به صورت یک لایه ترکیب شدند. لایه مذکور بر روی نقشه حاصله، قطع داده شدند و نتایج آن‌ها در نرم‌افزار SPSS با شاخص^۸ ROC مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت.

۴- بحث و نتایج

لایه‌های مختلف اطلاعاتی که به عنوان متغیر مستقل در وقوع فرسایش آب‌کندی منطقه نقش دارند در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. مقادیر TOL و VIF این متغیرها به ترتیب بزرگ‌تر از ۰/۱ و کمتر از ۱۰ بوده‌است که نشان‌دهنده عدم وجود هم خطی چندگانه می‌باشد و در انجام رگرسیون لجستیک مشکلی ندارند (جدول ۲).

۱Collinearity

۲Multicollinearity

۳Tolerance

۴Variance inflation factor

۵Wald

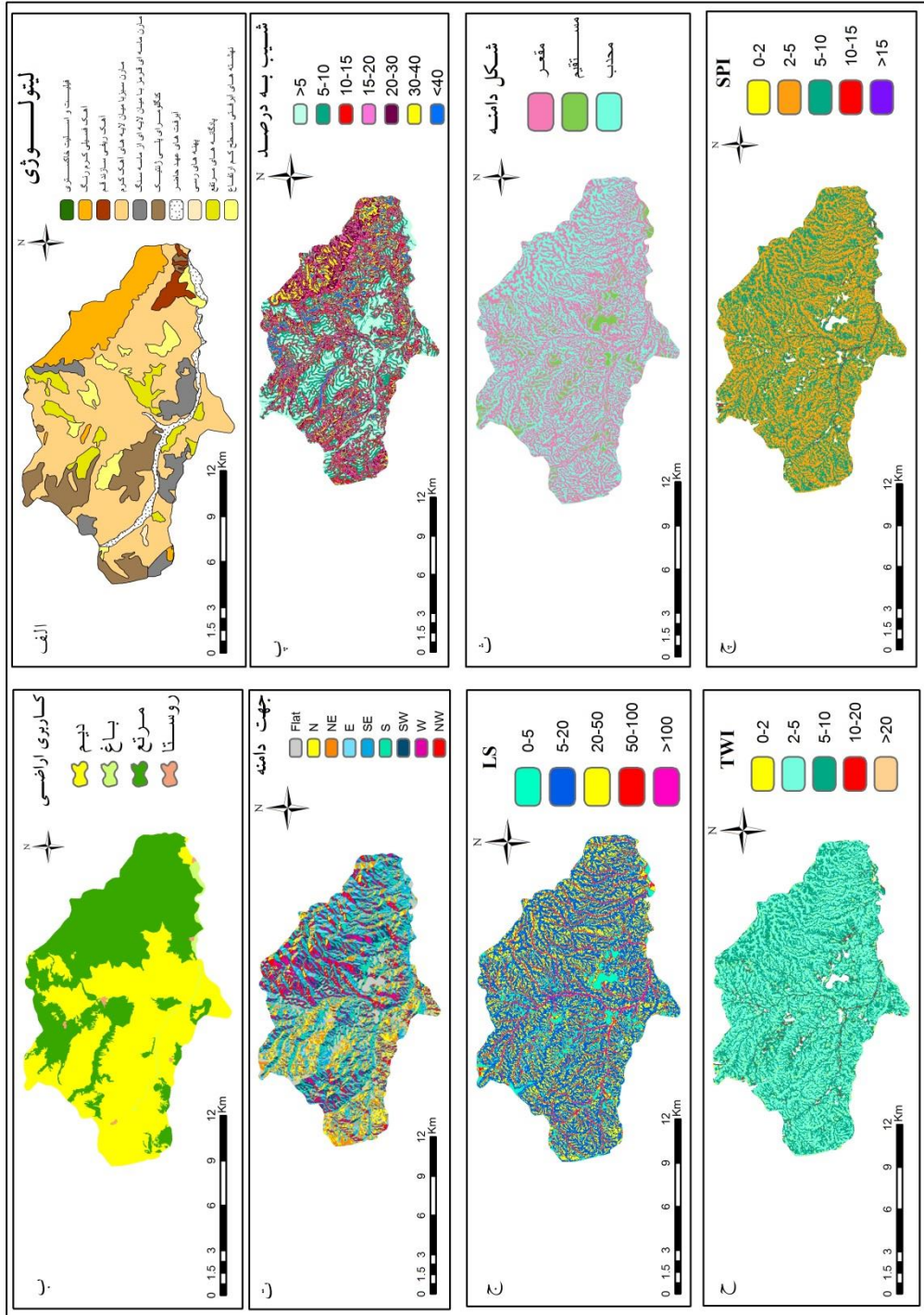
۶Receiver operating characteristic

جدول ۲: شاخص‌های تشخیص هم‌خطی چندگانه متغیرهای مستقل در تحقیق حاضر

متغیرها	TOL	VIF
لیتولوژی	۰/۹۵۵	۱/۰۴۷
کاربری زمین	۰/۹۲۰	۱/۰۸۷
شیب	۰/۹۷۹	۱/۰۲۲
جهت دامنه	۰/۸۶۸	۱/۱۵۲
شکل دامنه	۰/۷۶۶	۱/۳۰۵
SPI	۰/۸۷۹	۱/۱۳۷
TWI	۰/۷۵۶	۱/۳۰۴
LSF	۰/۷۹۸	۱/۲۵۲

طبقات متغیرهای مستقل مشارکت‌کننده در مدل رگرسیون لجستیک در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، لیتولوژی مارن‌های سبز با میان لایه‌های آهکی (سازند قم) بیش‌ترین تراکم فرسایش آب‌کندی را در منطقه مورد مطالعه داشته‌است. در انواع کاربری‌ها، مراتع فقیر بیش‌ترین تراکم آب‌کندها را داشته‌اند. در لایه شیب، بیش‌ترین تراکم آب‌کندها در شیب بیش از ۴۰ درصد و طبقه ۱۵-۱۰ مشاهده شده‌است. دامنه‌های جنوبی و جنوب غربی نیز بیش‌ترین تراکم آب‌کندها را نسبت به سایر جهات داشته‌اند. تراکم آب‌کندها در طبقات بالای LSF و SPI هم بیش‌تر از سایر طبقات بوده‌است.

با انجام رگرسیون لجستیک ضرایب B، هر یک از این کلاس‌های متغیر، مستقل محاسبه گردید (جدول ۴). ضرایبی که از نظر آماره‌ی والد، سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ داشتند، در مدل نهایی مورد استفاده قرار گرفتند و سایر طبقات مانند جهت دامنه (۱) و (۲) TWI که سطح معنی‌داری بزرگ‌تر از ۰/۰۵ داشته‌اند از مدل حذف شدند.



شکل ۳: لایه های اطلاعاتی مورد استفاده در حساسیت پذیری فرسایش آبکندی در منطقه مورد مطالعه

جدول ۳: توصیف طبقات متغیرهای مستقل شرکت کننده در رگرسیون لجستیک

توصیف	متغیرهای مستقل*
سنگ آهک فسیلی کرم و آبرفت‌های عهد حاضر در مسیل رودها	لیتولوژی (۱)
مارن ماسه‌ای قرمز رنگ با میان لایه ماسه‌سنگ و کنگلومرای پلی ژنتیک	لیتولوژی (۲)
مارن سبز با میان لایه آهک کرم (سازند قم)	لیتولوژی (۳)
اراضی دیم	کاربری اراضی (۱)
مراغ فقیر	کاربری اراضی (۲)
شیب ۱۰-۵ و ۴۰-۲۰ درصد	شیب (۱)
شیب ۱۵-۱۰ و بیش از ۴۰ درصد	شیب (۲)
شمال	جهت دامنه (۱)
شمال غربی، شمال شرقی، شرق، جنوب شرقی و جنوب	جهت‌دامنه (۲)
جنوب غربی و غرب	جهت دامنه (۳)
مقعر و محدب	شکل دامنه
طبقه بیش از ۵۰	فاکتور طول دامنه (۱) LSF
طبقه ۲۰-۵۰	فاکتور طول دامنه (۲) LSF
طبقه ۱۰-۰	شاخص قدرت رود (۱) SPI
طبقه ۱۵-۱۰	شاخص قدرت رود (۲) SPI
طبقه ۲-۰	شاخص رطوبت توپوگرافی (۱) TWI
طبقه ۱۰-۲	شاخص رطوبت توپوگرافی (۲) TWI

* متغیرهای مستقل براساس میزان تراکم آب‌کندها تفکیک شده‌اند؛ به عنوان مثال، در متغیر لیتولوژی (۱) تراکم آب‌کندها در لیتولوژی‌های توصیف شده مشابه است و برای همین در یک گروه قرار گرفته‌اند. برای سایر متغیرها هم از همین روش استفاده شده است.

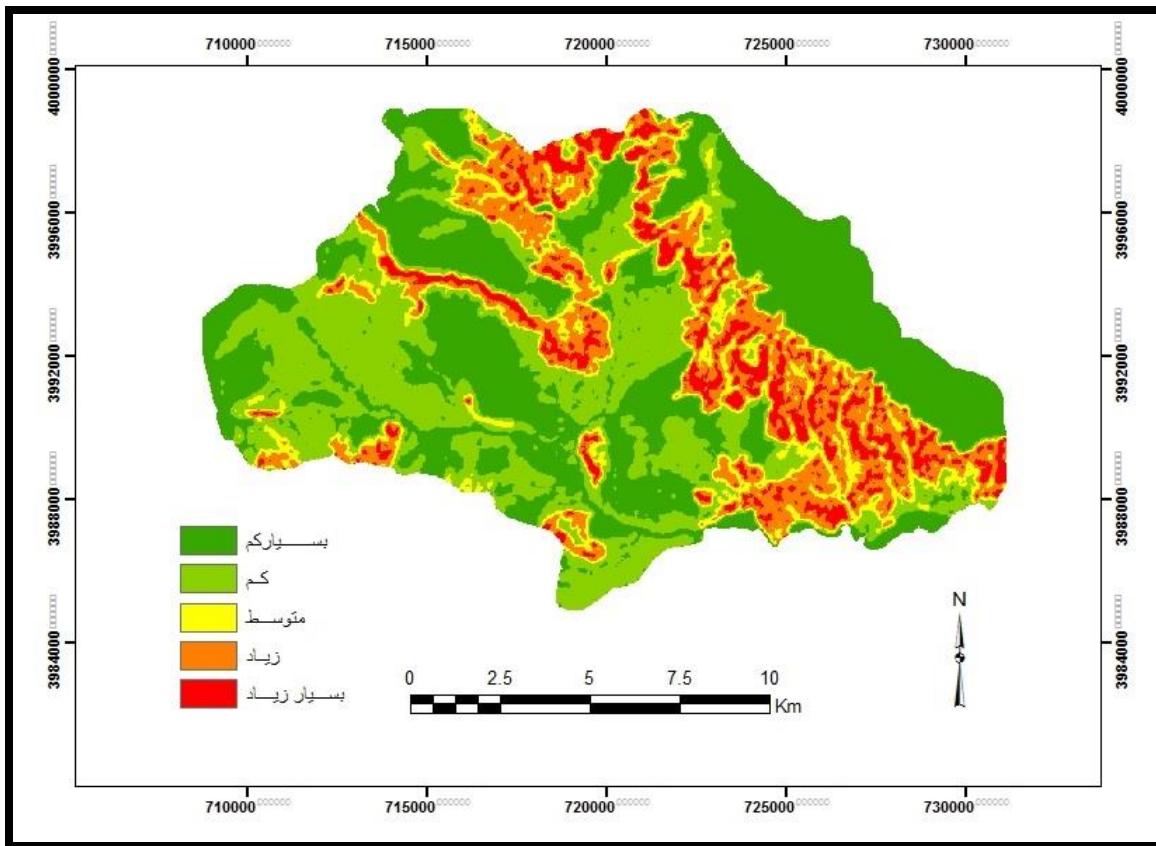
با توجه به ضرایب، متغیرهای کاربری و پوششی اراضی، لیتولوژی، طول دامنه، شیب و جهت دامنه بیشترین تاثیر را در مدل نهایی داشته‌اند. پس از اعمال ضرایب حاصله در لایه‌های مختلف، نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش آب‌کندی به دست آمد این نقشه به پنج سطح حساسیت از خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه‌بندی گردید (شکل ۴). پهنه‌های با حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۳۷/۷، ۲۹/۵، ۹/۹، ۱۵/۴ و ۷/۵ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه را دربر گرفته‌اند.

جدول ۴: ضرایب رگرسیون لجستیک جهت تهیه نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش آب‌کندی

متغیرها	B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
شیب			۱۱۵۶/۰۸۴	۲	..	
شیب (۱)	۰/۱۷	۰/۰۲	۷۱/۰۷	۱	..	۱/۱۸۶
شیب (۲)	۰/۶۱۴	۰/۰۲۲	۷۷۱/۱۳۳	۱	..	۱/۸۴۷
کاربری اراضی			۸۵۸۱/۳۹۳	۲	..	

کاربری اراضی (۱)	۴/۶۱۴	-/۴۴۹	۱۰۵/۴۳۵	۱	..	۱۰۰/۸۵۵
کاربری اراضی (۲)	۵/۸۶	-/۴۴۹	۱۷۰/۱۳۳	۱	..	۳۵۰/۸۶
لیتولوژی			۸۴۴۷/۴۰۶	۳	..	
لیتولوژی (۱)	۳/۳۳۶	-/۰۵۴	۴۵۴۱/۶۷۴	۱	..	۳۸/۸۹۲
لیتولوژی (۲)	۲/۸۹۲	-/۰۴۸	۳۶۶۴/۴۶۰	۱	..	۱۸/۰۲۶
لیتولوژی (۳)	۳/۶۹۹	-/۰۴۵	۶۶۵۶/۰۳۵	۱	..	۴۰/۳۹۴
شکل دامنه	۰/۴۹۵	-/۰۴۳	۱۳۳/۲۵۹	۱	..	۱/۶۴۱
جهت دامنه			۳۱۲/۱۴۸	۳	..	
جهت دامنه (۱)	۰/۰۰۲	-/۰۰۵	-/۰۰۱	۱	-/۰۹۷۳	۱/۰۰۲
جهت دامنه (۲)	۰/۱۶۹	-/۰۴۶	۱۳/۶۵	۱	..	۱/۱۸۴
جهت دامنه (۳)	۰/۳۷۲	-/۰۴۷	۶۳/۳۱۶	۱	..	۱/۴۵۱
SPI			۵۸۹/۲۵	۲	..	
SPI(1)	-/۰۳۰۲	-/۰۱۴	۴۶۲/۳۹۲	۱	..	-/۰۷۴۰
SPI(2)	-/۰۲۰۱	-/۰۹۷	۱۵۲/۴۹۳	۱	..	-/۰۳۰۱
TWI			۱۱۱/۹۴۲	۲	..	
TWI(1)	-/۰۷۱۳	-/۰۹۱	۶۰/۸۲۴	۱	..	-/۰۴۹۰
TWI(2)	-/۰۱۲	-/۰۷۳	۲/۷۲۸	۱	-/۰۹۹	-/۰۸۸۷
LS			۲۰۳۱/۱۴۳	۲	..	
LS(1)	۰/۷۲۹	-/۰۴۲	۳۰۱/۷۶۴	۱	..	۲/۰۷۲
LS(2)	۱/۳۰۸	-/۰۴۳	۹۲۶/۰۸۴	۱	..	۳/۷۰۱
ثابت	-/۰۳۰۱	-/۰۴۵۷	۵۰۸/۰۱۱	۱

B : ضرایب معادله، S.E: خطای استاندارد، Wald : آماره والد، df : درجه آزادی، Sig. : سطح معنی داری،
Exp(B) : عدد نپرین (۲/۷۱۸) به توان ضریب B



شکل ۴: نقشه حساسیت پذیری فرسایش آبکندی در منطقه مورد مطالعه

۵- اعتبارسنجی مدل

نتایج ارزیابی صحت مدل در نرم‌افزار SPSS نشان می‌دهد که فاکتور 2LL- در آخرین تکرار رگرسیون برابر ۱۴۸۳۴۱ و ضرایب R^2 کوکس و اسنل^۱ و R^2 ناگلکرک، به ترتیب ۰/۲۶۲ و ۰/۳۴۹ نشان‌دهنده تطابق مناسب مدل با داده‌های مشاهده‌ای فرسایش آبکندی در منطقه است. صحت پیش‌بینی مدل برای مناطق فاقد فرسایش آبکندی ۶۸/۱ درصد و برای مناطق دارای فرسایش آبکندی ۷۹ درصد و در مجموع ۷۳/۶ درصد محاسبه گردید (جدول ۵).

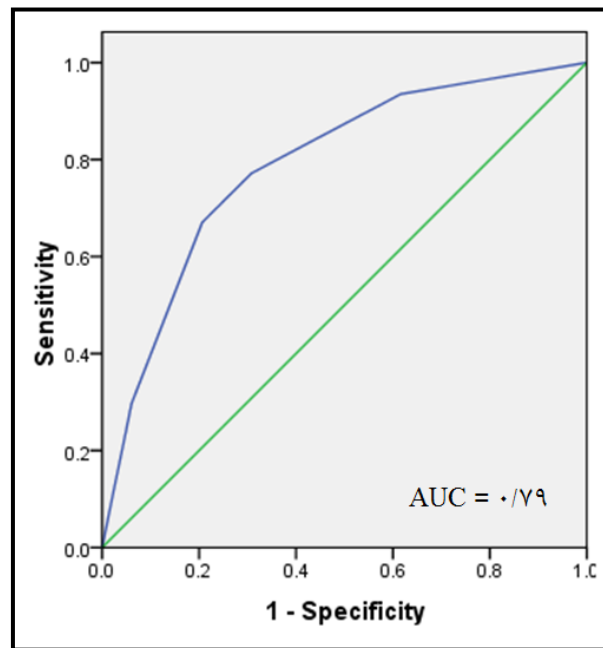
جدول ۵: خلاصه طبقه‌بندی فرسایش آبکندی مشاهده شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک

پیش‌بینی شده		مشاهده شده	
درصد صحیح	وجود	عدم وجود	
۶۸/۱	۲۱۸۲۰	۴۶۵۲۶	پیکسل‌های عدم وجود فرسایش آبکندی
۷۹	۵۴۲۲۴	۱۴۳۸۱	پیکسل‌های وجود فرسایش آبکندی
۷۳/۶			مجموع

1 - Cox and Sne

2 Nagelkerke

نقشه حساسیت‌پذیری فرسایش آب‌کندی که با استفاده از تکنیک رگرسیون لجستیک تهیه گردید، با شاخص ROC مورد ارزیابی قرار گرفت. تطبیق مدل با مکان فرسایش آب‌کندی نیز مورد مقایسه قرار گرفت. مساحت زیرمنحنی ROC که AUC نام دارد، در صورتی که کمتر از ۰/۵ باشد نشان‌دهنده‌ی عدم صحت مدل است و از ۰/۵ تا ۱ نشان‌دهنده صحت مدل، جهت پیش‌بینی وجود یا عدم وجود فرسایش است. مقدار AUC برای مدل لجستیک در این تحقیق ۰/۷۹ محاسبه گردید که نشان‌دهنده تخمین خوب مدل در پیش‌بینی مناطق حساس به فرسایش آب‌کندی است.



شکل ۵: منحنی ROC مدل لجستیک در مطالعه حاضر

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق متغیرهای لیتولوژی، کاربری اراضی و توپوگرافی (اولیه و ثانویه) با استفاده از رگرسیون لجستیک برای پیش‌بینی فرسایش آب‌کندی مدل‌سازی شده و نقشه حساسیت‌پذیری تهیه گردید. ارزیابی داده‌های آموزشی و داده‌های اعتبارسنجی، تطابق خوب مدل را برای پهنه‌بندی حساسیت‌پذیری فرسایش آب‌کندی نشان می‌دهد. در تحقیقاتی مشابه، لوکا و همکاران (۲۰۱۱)، رگرسیون لجستیک را به عنوان بهترین مدل در پیش‌بینی فرسایش آب‌کندی در جنوب ایتالیا (منطقه کالابری) معرفی نمودند. کونسکنتی و همکاران (۲۰۱۳ و ۲۰۱۴)، حساسیت‌پذیری فرسایش آب‌کندی را با استفاده از متغیرهای لیتولوژی، کاربری اراضی، توپوگرافی و فاصله از جاده بررسی نموده و پیش‌بینی انجام‌شده توسط رگرسیون لجستیک را عالی ارزیابی نمودند.

از مجموع متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق، ضرایب SPI و TWI به صورت منفی بوده و تأثیر کمتری را در مدل نهایی نشان می‌دهند که دلیل این مسأله را می‌توان به کیفیت مدل ارتفاعی رقومی نسبت داد. با توجه به تناسب این مدل برای ارزیابی حساسیت‌پذیری فرسایش آب‌کندی، به‌کارگیری آن برای سایر مناطق جهت تحلیل کارایی مدل پیشنهاد می‌گردد.

۷- منابع

۱. انتظاری، مژگان؛ ملکی، امجد؛ مرادی، خدیجه؛ الفتی، سمیه؛ (۱۳۹۲). «پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوضه آبریز دیره با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی AHP»، فصلنامه مدرس علوم انسانی (برنامه‌ریزی و آمایش فضا)، سال هفدهم، شماره ۴ (پیاپی ۸۲)، صص ۸۶-۶۳.
۲. جعفری‌گزرین، بهنوش؛ کاویان، عطاالله؛ (۱۳۸۸). «ارزیابی وقوع فرسایش خندقی در حوزه آبخیز سرخ‌آباد مازندران با استفاده از سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی»، مجله علمی پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، شماره ۱۷، صص ۵۵-۵۸.
۳. راهی، غلامرضا؛ نظری سامانی، علی‌اکبر؛ قدوسی، جمال؛ (۱۳۹۰). «اعتباریابی مدل پیش‌بینی حساسیت اراضی به فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز مناطق خشک (مطالعه موردی: استان بوشهر)»، مرتع و آبخیزداری (منابع طبیعی ایران)، دوره ۶۴، شماره ۳، صص ۲۸۱-۲۹۴.
۴. فرج‌زاده، من، منوچهر؛ افضل‌ی، عباسعلی؛ خلیلی، یاسر؛ قلیچی، عبادالله؛ (۱۳۹۱). «ارزیابی میزان حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل رگرسیون چندمتغیره (مطالعه موردی: جنوب شرق استان مازندران؛ کیاسر)»، پژوهش‌های فرسایش محیطی، سال دوم، شماره ۶، صص ۴۲-۵۷.
۵. مقصودی، مهران؛ شادفر، صمد؛ عباسی، محمد؛ (۱۳۹۰). «پهنه‌بندی حساسیت اراضی به فرسایش خندقی در حوضه زواریان استان قم»، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۲، صص ۵۲-۳۵.
6. Conforti, M. and Pietro, P.C., (2011), Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy), *Natural Hazards*, vol. 56, pp. 881-898.
7. Conoscenti, C., Agnesi, V., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E. and Märker, M., (2013), A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling: a test in Sicily, Italy, *Environmental Earth Sciences*, Vol. 70, No. 3, pp. 1179-1195.
8. Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V. and Märker, M., (2014), Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy), *Geomorphology*, No. 204, 399-411.
9. Dewitte, O., Daoudi, M., Bosco, C., Eeckhaut M.V.D., (2015), Predicting the susceptibility to gully initiation in data-poor regions, *Geomorphology*, No. 228, pp. 101-115.
10. Hosmer, D.W. and Lemeshow, S., (2000), *Applied logistic regression*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. P. 156-164.
11. Lee, S., (2005), Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *Int. J. Remote Sens.* Vol. 26, No.7, pp. 1477-1491.
12. Lucà, F., Conforti, M., and Robustelli, G., (2011), Comparison of GIS-based gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy, *Geomorphology*, No. 134, pp. 297-308.
13. Ozdemir, A., Altural, T., (2013), A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey, *Journal of Asian Earth Sciences*, No. 64, pp. 180-197.
14. Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G. and Valentin, C., (2003), Gully erosion and environmental change: importance and research needs, *Catena*, No. 50, pp. 91-133.

-
15. Vanwalleghem, T., Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Govers, G. and Deckers, J., (2008), Spatial analysis of factors controlling the presence of closed depressions and gullies under forest: Application of rare event logistic regression, *Geomorphology*, No. 95, pp. 504–517.