فصلنامه علوم محیطی، دوره هجدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹

۱۶۷-۱۸۳

مدل‌سازی احتمال وقوع و بررسی اثر مکانی عوامل مؤثر بر فرسایش گالی با استفاده از رگرسیون درختی تقویت شده

حسین طالبی خیاوی[۱]، حسین شفیع‌زاده مقدم[۲*] و مصطفی کریمیان اقبال[۱]

[۱] گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

[۲] گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۷

طالبی خیاوی، ح.، ح. شفیع‌زاده مقدم و م. کریمیان اقبال. ۱۳۹۹. مدل‌سازی احتمال وقوع و بررسی اثر مکانی عوامل مؤثر بر فرسایش گالی با استفاده از رگرسیون درختی تقویت شده. فصلنامه علوم محیطی. ۱۸۳-۱۶۷.

سابقه و هدف: فرسایش گالی یکی از انواع فرسایش آبی محسوب می‌شود که در طی پیشرفت این نوع فرسایش، زمین‌های کشاورزی به شکل غیرقابل استفاده درمی‌آیند. با در نظر گرفتن شرایط جغرافیایی و محیطی، عوامل متنوعی در ایجاد و گسترش فرسایش گالی تأثیر دارند. در تحقیق حاضر با توجه به گسترش شدید فرسایش گالی در منطقه‌ی جعفرآباد مغان و آسیب رساندن به زمین‌های کشاورزی و مرتعی مرغوب، به مدل‌سازی احتمال وقوع و بررسی عوامل تأثیرگذار در رخداد فرسایش گالی در منطقه پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه که در منطقه جعفرآباد مغان (قره دره) انجام پذیرفت، تأثیر فاکتورهای شیب، جهت شیب، انحنای شیب، ارتفاع، درصد رس خاک افق A، درصد رس افق B، درصد شن افق A، درصد شن افق B، میزان ماده آلی خاک سطحی، فاصله از جاده‌ها و فاصله از رودخانه‌ها با استفاده از مدل رگرسیون درختی تقویت شده مورد بررسی قرار گرفت و همچنین نقشه پیش‌بینی فرسایش گالی منطقه نیز تهیه گردید.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که فاکتورهای فاصله از رودخانه، درصد شن افق A، درصد رس افق A و همچنین میزان ماده آلی خاک سطحی به‌ترتیب با درصد تأثیر ۱۶/۳، ۱۳/۱، ۱۱/۴ و ۱۰/۷، بیشترین مشارکت را در احتمال رخداد فرسایش گالی داشتند. و همچنین کمترین تأثیر مربوط به جهت شیب و ارتفاع به‌ترتیب با ۵/۴ و ۵/۵ درصد مشارکت بوده که می‌تواند به‌دلیل نبود تغییرات ارتفاعی چشمگیر در منطقه باشد. براساس نقشه پیش‌بینی مشخص گردید که ۱۰/۶۳ درصد از مساحت منطقه‌ی مورد مطالعه در طبقه حساسیت بسیار زیاد قرار گرفته است. مقدار AUC برای مدل رگرسیون درختی تقویت شده در این تحقیق ۰/۸۱ محاسبه گردید که نشان دهنده تخمین خوب مدل در پیش‌بینی مناطق حساس به فرسایش گالی است.

* Corresponding Author: *Email Address*. h.shafizadeh@modares.ac.ir
http://doi.org.10.29252/envs.18.3.167

نتیجه‌گیری: نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، نشان از تأثیر بالای ویژگی‌های سطحی زمین در شروع فرسایش گالی را دارد. با توجه به اینکه بیشترین تأثیر در احتمال رخداد فرسایش گالی مربوط به فاصله از رودخانه و ویژگی‌های خاک سطحی می‌باشد، می‌توان با مدیریت آبراهه‌ها و گالی‌های رخ داده و همچنین افزایش دانش کشاورزان منطقه در مورد اهمیت مدیریت خاک و کشاورزی پایدار، میزان حساسیت زمین‌های منطقه به فرسایش گالی را کاهش داد. نتایج به‌دست آمده نشان از مناسب بودن مدل رگرسیون درختی تقویت شده برای انجام تحقیق‌های مشابه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی، اثر مکانی، فرسایش گالی، رگرسیون درختی.

مقدمه

خاک به‌عنوان یک منبع مهم تولید غذا برای انسان از اهمیت خاصی برخوردار است، این درحالی است که امروزه کشورمان با فرسایش شدید خاک روبرو است. ۳۵٪ از کل خشکی‌های جهان در معرض انواع فرسایش قرار دارند (Sayadi, 2006). فرسایش خاک به‌وسیله آب یکی از مهمترین فرآیندهای تخریب سرزمین بویژه در منطقه‌های نیمه خشک بشمار می‌آید. یکی از مهمترین اشکال فرسایش آبی در ایران، فرسایش خندقی است. فرسایش خندقی یکی از انواع فرسایش آبی است که سهمی بین ۱۰ تا ۹۴ درصد در تولید رسوب کل آبخیزها در کشورهای مختلف دارد، افزون بر این، سوابق پژوهشی موجود نشانگر این است که بیشتر مطالعات انجام پذیرفته در زمینه فرسایش آبی در طی چند دهه اخیر، بر فرآیندهای فرسایش شیاری (تمرکز هرزآب‌ها) و بین شیاری (پاشمانی و سطحی) تأکید داشته‌اند (Poesen *et al.*, 2003). فرسایش خندقی در یک منطقه موجب خسارات فراوانی می‌شود و تعادل و پایداری منابع محیط زیستی را تهدید می‌کند. این تهدید افزون بر ایجاد تغییرات در منظر زمین، تخریب زمین‌ها، از بین بردن خاک، عدم امکان فعالیت‌های کشاورزی و بهره‌برداری اقتصادی از عرصه‌های طبیعی، جاری شدن سیل، جابجایی حجم قابل توجهی از رسوبات و پیامدهای ناشی از آن را سبب می‌شود و در نهایت غیر قابل استفاده شدن زمین‌ها را شدت می‌بخشد (Ghodousi and davari, 2005). فرسایش خندقی می‌تواند برای جاده‌ها تهدید بشمار رفته و موجب تشکیل گل و لای در آبراهه‌ها، آبگذرهای جاده‌ای، سدها و آبگیرها شود.

Ahmadi (1999) اظهار داشته است، خندق زمانی ایجاد می‌شود که یک آبراهه طبیعی از وضعیت تعادل خود خارج شود. Refahi (2006)، خندق را آبراهه‌ای به‌نسبت دائمی معرفی کرده‌است که جریان‌های موقت آب در هنگام بارندگی از آن می‌گذرد و مقدار بسیار زیادی رسوب در خود حمل می‌کند. به‌طور کلی وقتی آبراهه‌های حاصل از فرسایش موجود در سطح زمین به اندازه‌ای بزرگ باشد که وسایل کشت و زرع نتواند به‌طور عمودی از آن‌ها عبور کند، خندق نامیده می‌شوند. Ghodousi and Davari (2005) فرسایش خندقی را شکل ویژه‌ای از فرسایش شدید می‌دانند که در اثر افزایش جریان آب در خاک‌های فرسایش‌پذیر ایجاد می‌شوند. ایجاد خندق نتیجه واکنش اکوسیستم‌های تخریب شده نسبت به تغییرات محیط است.

تحقیق‌های دامنه‌داری در مورد دلیل تشکیل و گسترش فرسایش خندقی به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین نوع فرسایش آبی در نقاط مختلف دنیا صورت پذیرفته است و محققان هر کدام به‌نحوی کوشیده‌اند تا دلایل تشکیل و گسترش این نوع فرسایش را جهت مقابله علمی و اصولی با آن روشن کنند. Sayadi (2006) با بررسی عوامل مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی و گسترش آن‌ها در زمین‌های لسی استان گلستان نتیجه‌گیری کرده است که مساحت آبخیز واقع در پیشانی خندق و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از مهمترین عوامل در شکل‌گیری خندق‌ها و ویژگی‌های مورفومتریک آن‌ها هستند. Jafari Garzin and Kavian

(2009) وقوع فرسایش خندقی در حوضه آبخیز سرخ آباد مازندران را با استفاده از سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی و با استفاده از محاسبه سنجه وزنی هر لایه اطلاعاتی بررسی کردند. آن‌ها در این پژوهش عامل‌هایی مانند سنگ‌شناسی، شیب، جهت جغرافیایی، طبقه‌های ارتفاعی، درصد پوشش گیاهی، کاربری زمین‌ها، عمق خاک، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک و فاصله از راه‌ها را به‌عنوان عوامل مؤثر در شکل‌گیری و توسعه خندق مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور آن‌ها لایه‌های اطلاعاتی عامل‌های یاد شده را در ۵ منطقه خندقی حوضه بررسی کردند و با محاسبه سنجه تراکم وزنی عوامل گوناگون، نقش این عوامل را در وقوع فرسایش خندقی ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که از نظر فرسایش خندقی، نزدیک به ۴۸ درصد از سطح حوضه در طبقه بالای نقشه حساسیت قرار دارد. Parkner *et al.* (2007) در مطالعاتی پیرامون گسترش فرسایش خندقی در نیوزلند به این نتیجه رسیدند که فرسایش خندقی به‌طور معمول با زمین‌های کشاورزی در ارتباط است به‌طوری که با از بین رفتن پوشش گیاهی و یا در نتیجه کشت و کار، رواناب افزایش یافته و فرسایش خندقی تشدید می‌شود. این نوع فرسایش در نتیجه به‌هم خوردن تعادل طبیعی و یا تأثیرات انسانی می‌باشد. Agnesi *et al.* (2011) تحقیقی را با عنوان تجزیه و تحلیل چند پارامتری برای ارزیابی فرسایش گالی انجام دادند که در این تحقیق، فاکتورهای تأثیرگذار در فرسایش گالی را لیتولوژی، بافت خاک، کاربری زمین‌ها، زاویه شیب، جهت شیب، انحنای شیب، سنجه قدرت جریان، سنجه رطوبت توپوگرافی و طول‌شیب در نظر گرفتند و نتیجه تجزیه و تحلیل آن‌ها نشان داد که لیتولوژی از نوع رس‌ها و سنگ‌های تبخیری و بعد از آن بافت خاک از نوع ریز تا متوسط و سپس سنجه قدرت جریان بیشترین تأثیر را در فرسایش دارند. Rahmati *et al.* (2016) در تحقیقی با عنوان ارزیابی تأثیر فاکتورهای محیطی - زمینی بر فرسایش گالی در منطقه نیمه‌خشک در ایران (پلدختر کاشان)، دوازده فاکتور شامل لیتولوژی، بافت خاک، کاربری‌زمین‌ها، ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، انحنای شیب، سنجه رطوبت توپوگرافی، فاصله از جاده‌ها و فاصله از رودها را مؤثر بر فرسایش گالی تشخیص داده و بررسی نمودند. در این تحقیق از مدل Conditional Probability [1] استفاده شده و نتایج آنالیزها نشان داده است که مناطقی که از نظر لیتولوژی از رسوبات کواترنری تشکیل شده‌اند بیشتر در معرض فرسایش گالی قرار دارند. در مورد بافت خاک، بافت لومی شنی دارای بیشترین حساسیت به فرسایش بوده و بعد از آن لوم رسی شنی قرار داشته است. نتایج بررسی کاربری زمین‌ها نشان داده است که مناطق کشاورزی بیشترین حساسیت و مناطق جنگلی و مرتع‌های مدیریت شده کمترین حساسیت به فرسایش گالی داشته‌اند. Zabihi *et al.* (2018) در تحقیقی با عنوان مدل‌سازی مکانی فرسایش گالی در استان مازندران، تأثیر فاکتورهای ارتفاع، جهت شیب، درجه شیب، طول شیب، سنجه رطوبت توپوگرافی، انحنای شیب، انحنای پروفیل، تراکم زهکشی، لیتولوژی، کاربری زمین‌ها، فاصله از رودها و فاصله از جاده‌ها را با استفاده از مدل‌های وزن دهی براساس شواهد [1] و نسبت فراوانی [2] بر فرسایش گالی را بررسی نمودند. بعد از تجزیه و تحلیل به این نتیجه رسیدند که از میان فاکتورهای مورد بررسی، دو فاکتور ارتفاع و کاربری زمین‌ها بیشترین تأثیر را در فرسایش گالی این منطقه داشته است.

مطالب بالا بیان‌کننده این واقعیت است که عامل‌های بسیار متنوعی در گسترش فرسایش خندقی مؤثرند و تأثیر این عامل‌ها از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است. بنابراین، گوناگونی و تأثیر متفاوت عامل‌های تأثیرگذار این نوع فرسایش در مناطق مختلف، سبب شده تا تحقیق‌های متفاوتی در منطقه‌های مختلف صورت گیرد. بر این اساس، در تحقیق حاضر با توجه به گسترش شدید فرسایش خندقی در حوضه آبخیز جعفرآباد مغان و آسیب رساندن به زمین‌های کشاورزی و مرتعی مرغوب و همچنین زمین‌های مسکونی روستایی و تأسیسات جاده‌ای، بررسی عوامل مؤثر

بر گسترش فرسایش خندقی این منطقه، بیش از پیش ضروری به‌نظر می‌رسد.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی مکانی دلیل‌های گسترش فرسایش خندقی در منطقه جعفرآباد مغان و تعیین میزان اثرگذاری آن‌ها در گسترش این نوع فرسایش، تهیه نقشه آسیب پذیری و همچنین دادن پیشنهادهای مدیریتی برای کنترل و جلوگیری از گسترش این نوع فرسایش می‌باشد. این هدف‌ها به‌طور خلاصه به شرح زیر می‌باشند.

۱-تبیین و مدل‌سازی مکانی عامل‌های تأثیرگذار بر فرسایش گالی

۲-بررسی اثرهای همزمان (اینتراکشن) [۳] عامل‌های مؤثر بر فرسایش گالی

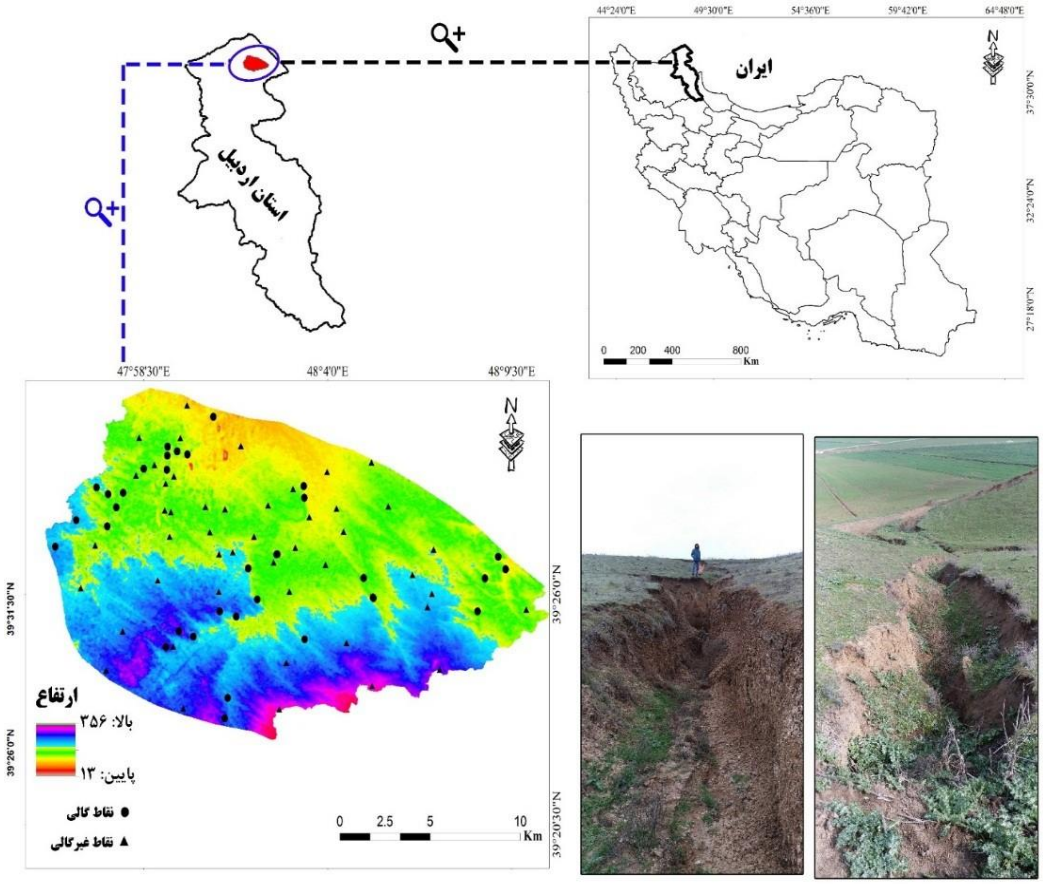
۳-تعیین میزان حساسیت به فرسایش گالی در منطقه

۴-تعیین میزان دقت مدل استفاده شده

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه به بررسی عوامل و مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی حوزه جعفرآباد مغان واقع در شمال استان اردبیل (دشت مغان) پرداخته شد. این حوزه با مساحت ۲۱۱ کیلومترمربع در بین شهرستان پارس‌آباد و بیله‌سوار قرار گرفته است. بیشترین ارتفاع منطقه ۳۶۵ متر و کمترین ارتفاع آن معادل ۱۳ متر از سطح دریا می‌باشد. میانگین سالانه دما ۲۶ درجه سلسیوس و میانگین بارش سالانه ۴۶۳ میلی‌متر می‌باشد. اقلیم منطقه با توجه به سیستم طبقه‌بندی دومارتن در محدوده‌ی آب‌وهوایی نیمه‌خشک واقع شده است. شکل۱ موقعیت جغرافیایی منطقه و نقاط گالی و نقاط نمونه برداری غیر گالی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

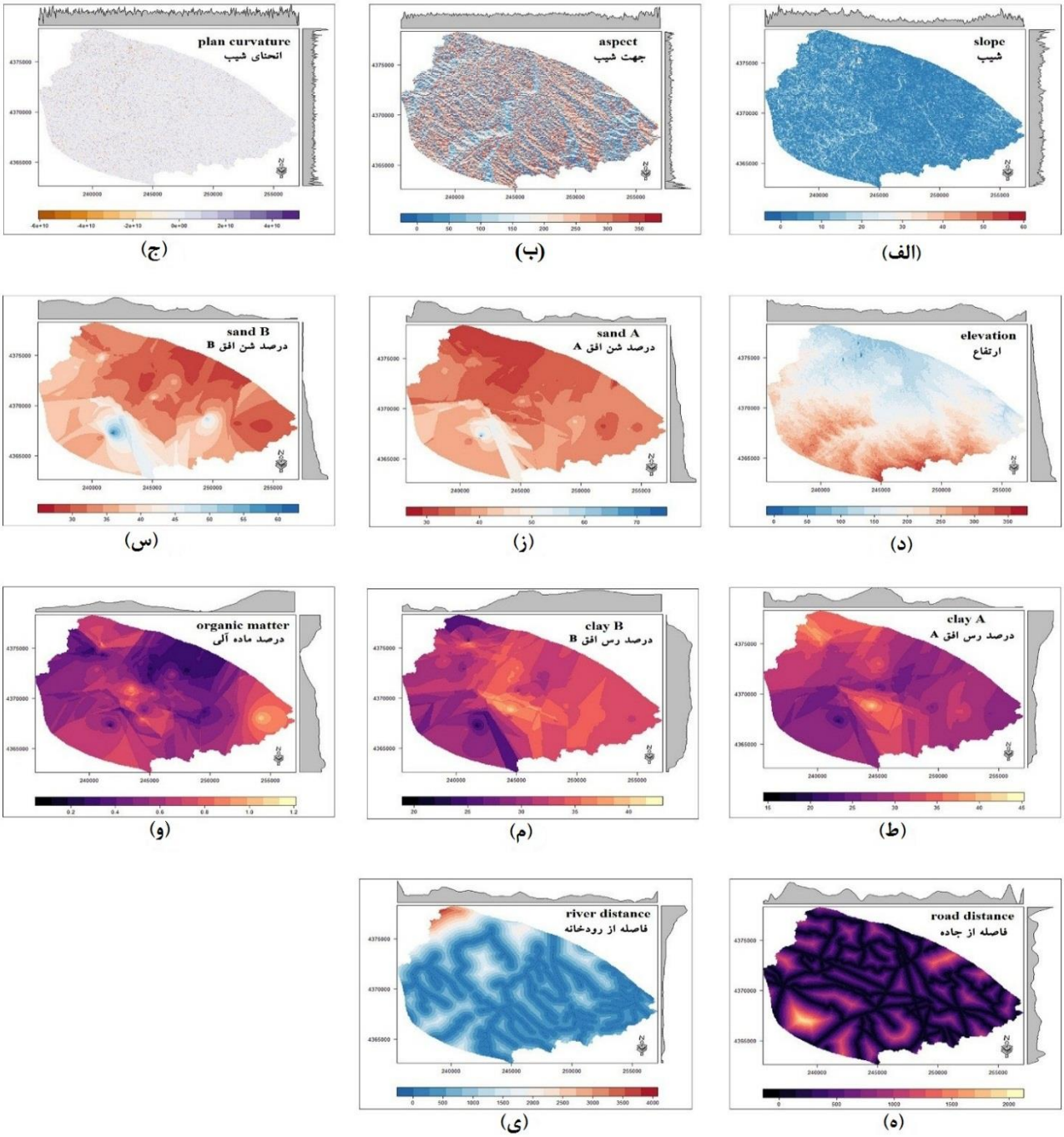
Fig. 1- Study area

فاکتورهای مورد مطالعه برای بررسی فرسایش گالی

فاکتورهای مربوط به توپوگرافی نقش مهمی در ایجاد ویژگی‌های متفاوت هیدرولوژیک مانند میزان تولید رواناب، رطوبت خاک، جریان آب زیرزمینی و پایداری شیب دارد (Moore *et al.*, 1991). از عامل‌های اصلی توپوگرافی که در فرسایش گالی تأثیر دارند می‌توان از ارتفاع، جهت شیب، درجه شیب و انحنای شیب نام برد (Valentin *et al.*, 2005). جهت شیب اثر غیرمستقیمی در آبدوی و فرسایش دارد. میزان فرسایش در شیب‌های یکسان ولی دارای جهت شیب متفاوت، به یک اندازه نیست. اثر عمده‌ی جهت شیب در میزان آبدوی و فرسایش، به‌دلیل اختلاف میکروکلیمای موجود در شیب‌های مختلف است (Ghahroodi, 2003). یکی دیگر از عامل‌های مربوط به شیب، انحنای شیب می‌باشد. انحنای شیب عمود بر شیب است و همگرایی و انحراف جریان در سراسر سطح را تحت تأثیر قرار می‌دهد. انحنای شیب به‌عنوان یک عامل مهم در فرسایش گالی در نظر گرفته می‌شود، این عامل به‌عنوان عامل عمود بر شیب محاسبه می‌گردد و بر همگرایی و انحراف جریان آب در سطح شیب تأثیر می‌گذارد (Gayen *et al.*, 2019). شکل۲-الف، ب، ج به‌ترتیب نقشه‌های مربوط به شیب، جهت شیب و انحنای شیب را نشان می‌دهند. ارتفاع، یکی دیگر از عامل‌های مؤثر در ارزیابی فرسایش گالی است، چرا که بسته به عوامل شروع کننده و پیش برنده، فرسایش گالی ممکن است در ارتفاع‌های مختلف رخ دهد (Zabihi *et al.*, 2018). شکل۲-د نقشه ارتفاع منطقه را نشان می‌دهد.

براساس ارزیابی‌های ژئومورفولوژیکی، آغاز فرسایش گالی مربوط به ویژگی‌های سطحی زمین بویژه ویژگی‌های خاک می‌باشد (Poesen, 1998). بافت خاک به‌عنوان کنترل کننده مکانیسم‌های تولید رواناب، نفوذ و به تبع آن فرآیند فرسایش گالی شناخته می‌شود (Fernandez-Illescas *et al.*, 2001; Gyssels *et al.*, 2002; Vandekerckhove *et al.*, 2003). بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی خاک تحت تأثیر مواد آلی قرار می‌گیرد، از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به پایداری ساختمان خاک، انتشار رس‌ها، دانسیته توده خاک، و ظرفیت نگهداری آب خاک اشاره نمود (Gholchin, 2016). با توجه به این که ویژگی‌های سطحی خاک نقش مهمی در شروع فرآیند فرسایش دارد، در این تحقیق ویژگی‌های خاک سطحی(۰ تا ۳۰ سانتی) از نظر بافت خاک و درصد ماده آلی مورد بررسی قرار گرفت. برای این که تأثیر بافت در شروع فرسایش را دقیقتر بررسی کنیم بافت افق A و افق B را به‌صورت جداگانه نمونه‌برداری کرده و به‌دست آوردیم. شکل۲- د، ز، س، ط، م به ترتیب نقشه‌های درصد شن افقA، درصد شن افقB، درصد رس افقA، درصد رس افقB و درصد ماده آلی خاک سطحی منطقه را نشان می‌دهند. یکی دیگر از فاکتورهای مورد بررسی در این تحقیق، فاصله از جاده‌ها می‌باشد. منابع اصلی رسوب توسط برداشت انتخابی از جنگل‌های بارانی و ساختن جاده‌ها ایجاد می‌شوند (Doughlas and Pieteronto, 2005). جاده‌ها تمرکز رواناب سطحی را تغییر می‌دهند و به حوضه‌های دیگر انتقال می‌دهند (Valentin *et al.*, 2005). شکل۲- ه نقشه فاصله از جاده منطقه را نشان می‌دهد. ازجمله سنجه‌های مهم و تأثیرگذار بر فرسایش گالی که در بسیاری تحقیق‌ها مورد توجه قرار گرفته است، فاصله از رودخانه (آبراهه) می‌باشد (Choi *et al.*, 2008; Conoscenti *et al.*, 2014; Dube *et al.*, 2014). شکل۲-ی نقشه فاصله از رودخانه را نشان می‌دهد.

جمع‌آوری اطلاعات از طریق گزارش‌های مطالعاتی و داده‌ها و تصویرهای ماهواره‌ای مربوط به منطقه انجام پذیرفت. نقشه‌های پایه منطقه مورد مطالعه شامل: توپوگرافی، زمین‌شناسی، کاربری زمین‌ها و پارامترهای زمین محیطی دیگر (انحنای شیب، شیب و جهت شیب، و ارتفاع منطقه)، در محیط نرم افزار (ArcGIS_10) آماده‌سازی و تهیه گردیدند. با توجه به بررسی تصویرهای ماهواره‌ای و گوگل ارث [۴]، مناطقی که احتمال وجود گالی زیاد بوده مشخص و سپس نمونه‌برداری شد. ثبت نقاط گالی‌ها به این صورت بود که ۳۵ گالی با دستگاه GPS ثبت شد و از دو لایه سطحی (A و B) افق خاک، برای هر گالی



شکل ۲- نقشه هر کدام از فاکتورها

Fig. 2- Layers of each of the invoices

با هدف اندازه گیری بافت خاک، از خاک سطحی (صفر تا ۳۰ سانتی) برای اندازه‌گیری میزان مواد آلی نمونه برداری انجام پذیرفت. سپس به نقاط غیر گالی (۶۹ نقطه) که از قبل به‌صورت تصادفی انتخاب و به دستگاه GPS منتقل شده بودند انتقال یافته و از این نقاط نیز به همان صورت نمونه برداری خاک انجام گرفت. نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل شده و برای تعیین مقدار ماده آلی از روش اکسیداسیون تر (والکلی و بلاک) استفاده گردید (Walkley and Black, 1934). اندازه‌گیری بافت

خـاک بـه روش هیـدرومتری بویـوکس انجـام گرفـت (Bouyoucos, 1962).

الگوریتم درخت‌های رگرسیونی تقویت شد

در حوزه یادگیری ماشین و آمار، به‌منظور دست‌یابی به پیش‌بینی‌های با دقت بالاتر، از روش‌های انسمبل [۵] (تجمعی) استفاده می‌گردد. بسته به روش انسمبل، می‌توان این الگوریتم‌ها را به شکل‌های مختلفی تقسیم‌بندی کرد. انسمبل می‌تواند در مرحله ساخت مدل، یا روی نتایج حاصل از هر یک از مدل‌ها اعمال گردد. این روش‌ها می‌توانند برای مواردی که متغیر مستقل به‌صورت پیوسته (رگرسیون)، یا گسسته (طبقه بندی) باشند، استفاده گردند. ایده اصلی رویکرد انسمبل به این موضوع بر می‌گردد که قدرت چند مدل از توانایی تک مدل‌ها بیشتر است و به نتایج بهتری منجر می‌گردد. یکی از انواع مدل‌های توسعه داده شده از طریق انسمبل، مدل BRT [۶] می‌باشد. مدل BRT از ترکیب دو روش CART و Boosting به‌وجود می‌آید (Breiman *et al.*, 1984). هدف BRT افزایش دقت یک مدل تکی [۷] (CART) از طریق برازش متعدد همان مدل و ترکیب نتایج می‌باشد.

در روش کارت (Breiman *et al.*, 1984)، فضای ورودی (متغیرهای پیش‌بینی‌کننده)، به چند زیر بخش ساده‌تر تقسیم می‌شود. سپس به‌منظور پیش بینی هر داده جدید، از میانگین یا فراوانی مقادیر آموزشی در هر زیر بخش که داده مورد نظر (داده‌ای که قرار است برای آن پیش بینی صورت گیرد) به آن تعلق دارد استفاده می‌شود. روش کارت بسیار ساده و تفسیرپذیر بوده، انواع متغیرهای ورودی را می‌پذیرد (متغیرهای گسسته و پیوسته)، نسبت به مقیاس داده‌ها حساس نبوده و حساسیت به داده‌های پرت ندارد، ارتباط بین متغیرها را در نظر گرفته و متغیرهای غیر مرتبط به‌ندرت در ساخت درخت استفاده می‌شوند. در کنار این مزیت‌ها، روش کارت، توانایی پیش‌بینی ضغیف‌تری در مقایسه با مدل‌های پیچیده مانند ماشین بردار پشتیبان داشته و به‌شدت نسبت به تغییرات در فضای ورودی حساس بوده، به‌نحوی که تغییرات کوچک در فضای ورودی می‌تواند به یک درخت به‌طور کامل متفاوت منجر شود. از اینرو، به‌منظور ایجاد مدل‌های با قدرت پیش‌بینی بهتر، درخت تصمیم به‌عنوان ورودی مدل‌های ارتقا یافته مانند BRT محسوب می‌شود. نحوه استفاده از مدل کارت برای ساخت مدل BRT از طریق روش بوستینگ صورت می‌گیرد. بوستینگ روشی برای بهبود نتایج حاصل از اجرای متعدد مدل CART می‌باشد. بوستینگ یک رویکرد عمومی محسوب می‌شود که می‌تواند با دیگر روش‌های رگرسیونی و آماری ترکیب گردد. در این روش، درختان به‌صورت متوالی ساخته می‌شوند که در آن هر درخت براساس اطلاعات به‌دست آمده از درخت قبلی ساخته می‌شود. در واقع بعد از ساخته شدن درخت اول، درخت‌های بعدی روی مقادیر باقیمانده از درخت قبلی ساخته می‌شوند و مقادیر باقیمانده به‌عنوان متغیر پاسخ محسوب می‌شوند. سپس درخت جدید به مدل برازش داده شده قبلی اضافه می‌شود و به این ترتیب با اضافه شدن هر درخت، مدل برازش داده شده بهبود می‌یابد و مقادیر باقیمانده به‌روز می‌گردند. یکی از مزیت‌های روش BRT، استخراج اهمیت متغیرهای مستقل با توجه به میزان مشارکت آن‌ها در پیش‌بینی متغیر وابسته است. همچنین می‌توان منحنی پاسخ هر متغیر را به‌صورت جداگانه ترسیم نمود. در این پژوهش مدل BRT، در محیط R و با استفاده از پکیج gbm پیاده‌سازی شد.

نتایج و بحث

بررسی میزان و نحوه اثرگذاری فاکتورها بر احتمال رخداد فرسایش گالی

فاصله از رودخانه (آبراهه)

انتظار می‌رود هرچه فاصله به رودخانه نزدیکتر باشد احتمال رخداد گالی نیز افزایش یابد و نتایج به‌دست آمده نیز مؤید همین مطلب است به‌طوریکه شکل ۳-a تأثیر مثبت نزدیک بودن به آبراهه‌ها در بالا بودن احتمال رخداد گالی را نشان می‌دهد. دلیل این رخداد می‌تواند وجود اختلاف ارتفاع زمین‌های مجاور با بستر آبراهه باشد. به‌طور

معمول رودخانه پایین‌تر از زمین‌های مجاور می‌باشد که این اختلاف ارتفاع سبب می‌شود که گالی از آن نقاط شروع شده و به سمت عقب پیشروی کند. فرسایش خندقی همچنین ممکن است در یک آبراهه طبیعی رخ دهد و آن هنگامی است که آبراهه کشش آبدوی وارد شده به آن را نداشته باشد، نبود کشش آبراهه ممکن است به‌دلیل افزایش دبی نسبت به ظرفیت آبراهه یا کاهش ظرفیت آبراهه نسبت به ظرفیت پیشین خود باشد (Refahi, 2006). نتیجه مدل مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۳-a به‌خوبی بیان می‌کند که بیشترین احتمال رخداد فرسایش گالی در مجاورت پیوسته آبراهه‌ها بوده و با فاصله گرفتن از آبراهه‌ها احتمال رخداد نیز سیر نزولی به خود گرفته و کمابیش بعد از فاصله ۵۰۰ متری تأثیری بر احتمال وقوع فرسایش گالی ندارد. همچنین، در منطقه مورد مطالعه، ۱۶/۳ درصد احتمال رخداد گالی به‌واسطه عامل نزدیکی به رودخانه‌ها قابل پیش‌بینی است. Zabihi *et al.* (2018) نیز در تحقیقی به این نتیجه رسیدند که بیشتر منطقه‌های حساس به فرسایش گالی در مناطق نزدیک به رودخانه‌ها قرار داشته و نشان دادند که ۶۳ درصد از رخدادهای گالی در ۵۰ متری رودخانه‌ها رخ داده است.

درصد شن

مستقل از تأثیر دیگر فاکتورها، از نظر خاکشناسی انتظار می‌رود که در منطقه‌های با درصد شن پایین، میزان فرسایش کم باشد، زیرا با کاهش درصد شن، میزان درصد سیلت و رس افزایش یافته و این به معنای افزایش چسبندگی خاک می‌باشد. با توجه به شکل‌های ۳-b و ۳-c مشاهده می‌شود که در منطقه‌های با درصد شن کم، احتمال رخداد گالی بسیار پایین است، به‌عبارت دقیقتر، منحنی پاسخ شن نشان می‌دهد که اگر میزان درصد شن در افق A و B ۳۰درصد یا کمتر باشد، بر احتمال رخداد فرسایش گالی تأثیر نمی‌گذارد. این در حالی‌است که با افزایش میزان شن از ۳۰ درصد تا حدود ۳۹ درصد، احتمال رخداد فرسایش گالی افزایش پیدا کرده ولی بعد از آن میزان افزایش درصد شن دیگر تأثیری بر رخداد یا رخ ندادن فرسایش گالی نمی‌گذارد. در منطقه مورد مطالعه، ۱۳/۱ درصد احتمال رخداد گالی به‌واسطه‌ی عامل درصد شن افق A و ۹/۱ درصد نیز به‌واسطه‌ی عامل درصد شن افق B قابل پیش‌بینی است. از نظر خاکشناسی دلیل این اتفاق را می‌توان این چنین تفسیر کرد که وقتی میزان شن کمتر از ۳۰ درصد باشد، میزان رس و سیلت بین ۶۰ تا ۷۰ درصد می‌باشد، پس در این حالت خاک چسبندگی بالایی دارد و در مقابل فرسایش مقاوم است. با توجه به منحنی پاسخ، زمانی که میزان شن به ۳۰ درصد می‌رسد، قدرت چسبندگی خاک کاهش پیدا می‌کند و با افزایش درصد شن به ۴۰ درصد، خاک فرسایش‌پذیر می‌شود. Conforti *et al.* (2010) بیان می‌کند که به‌طور خاص، سطوحی با پوشش گیاهی کم و یا بدون پوشش که از شن و رس پوشیده شده‌اند، بیشترین تمایل به فرسایش گالی را دارند.

درصد رس

از نظر خاکشناسی انتظار داریم با افزایش میزان رس، احتمال فرسایش کاهش پیدا کند، به این دلیل که خاک‌های با بافت ریز به‌دلیل انسجام ذرات خود در مقابل فرسایش مقاومتر هستند. پایداری کلوئیدی خاک برای برآورد یا پیش‌بینی فرسایش خاک مهم است و بنابراین یک پارامتر کلیدی برای حفاظت خاک است، به این ترتیب پراکندگی رس یک فرآیند مهم مرتبط با چندین مشکل محیط زیستی است (Basga, 2018). در رابطه با رفتار مربوط به پراکندگی رس در آب در طراحی‌های استراتژیک برای محدود کردن فرسایش خاک مطالعات متعددی مطرح شده است (Nguyen *et al.*, 2009; Igwe *et al.*, 2009). اهمیت این مسئله بویژه در محیط‌های خشک که در آن خاک‌ها آبیاری می‌شوند و همچنین سیلاب‌های سالانه رخ می‌دهد بیشتر است. همچنین به‌خوبی مشخص شده است که فعالیت‌های انسانی مانند شخم‌های سنگین و آبیاری شدید، به‌شدت سبب پراکندگی خاک‌های رسی

می‌شود (Nguyen *et al.*, 2009). به‌طور کلی تأثیر عامل-های فیزیکوشیمیایی بر پراکندگی رس در خاک‌های ریز بافت نسبت به خاک‌های با بافت درشت بیشتر است (Igwe and Vdeghnuma, 2008; Volkner *et al.*, 2015). پس برای مقاوم بودن خاک‌های با رس زیاد، وجود انسجام، فاکتور مهمی است و نمی‌توان تنها با وجود درصد زیاد رس، خاک مورد بررسی را در مقابل فرسایش مقاوم دانست. همانطور که درمورد درصد شن گفته شد، در این مورد هم Conforti *et al.* (2010) بیان می‌کنند که به‌طور خاص، سطوحی با پوشش گیاهی کم و یا بدون پوشش که از شن و رس پوشیده شده‌اند، بیشترین تمایل به فرسایش گالی را دارند.

در شکل ۳-d تأثیر درصد رس در احتمال رخداد گالی در افق نشان می‌دهد که وقتی میزان رس کمتر از ۳۰ درصد است احتمال رخداد فرسایش گالی منفی است ولی بعد از ۳۰ درصد، احتمال رخداد فرسایش گالی افزایش می‌یابد. همچنین در شکل ۳-e نیز میزان تأثیر درصد رس در افق Bمشاهده می‌شود که کمابیش مشابه شکل مربوط به افق Aاست ولی با نسبت افزایش احتمال کمتر. در منطقه‌ی مورد مطالعه، ۱۱/۴ درصد احتمال رخداد گالی به‌واسطه‌ی عامل درصد رس افق A و ۵/۲ درصد نیز به‌واسطه‌ی عامل درصد رس افق B قابل پیش‌بینی است.

با توجه به این که برخلاف انتظار با افزایش رس احتمال رخداد فرسایش گالی نیز افزایش یافته برای حل این تناقض و یافتن دلیل این اتفاق می‌توان خاک‌ها را از نظر پراکندگی رس بررسی نمود.

درصد ماده آلی

در مورد تأثیر فاکتور کربن آلی خاک بر وقوع فرسایش گالی، انتظار این است که با افزایش میزان کربن آلی، مقاومت خاک افزایش یابد. در اینجا نمودار به‌دست آمده از آنالیز داده‌های مربوط به کربن آلی برخلاف انتظار می‌باشد (شکل۳-f). این نتیجه می‌تواند حاصل از ناچیز بودن میزان درصد کربن آلی در خاک منطقه باشد که می‌توان گفت این میزان کربن آلی در خاک تأثیری بر مقاومت خاک ندارد. Kay and Angres (1999) گزارش داده‌اند که اگر میزان درصد کربن آلی خاک بین ۱/۲ تا ۱/۵ درصد باشد، ثبات خاک به‌سرعت کاهش پیدا می‌کند. Boix *et al.* (2001) نشان دادند که به‌منظور حفظ پایداری خاک، میزان ماده آلی خاک باید حداقل ۳/۵ درصد باشد و اگر ماده آلی کمتر از این آستانه باشد، تأثیری در ثبات و مقاومت خاک ندارد. پس با توجه به شکل ۲-i ماده آلی خاک منطقه مورد مطالعه خیلی کم بوده و و تأثیری روی افزایش مقاومت خاک منطقه نداشته است.

فاصله از جاده

انتظار می‌رود هرچه به جاده‌ها نزدیکتر شویم احتمال رخداد فرسایش گالی افزایش پیدا کند. دلیل اصلی این اتفاق می‌تواند تغییر مسیر روان آب‌ها ویا تمرکز روان آب‌ها توسط جاده‌ها باشد. براساس شکل ۳-g مشاهده می‌شود که با نزدیک شدن به جاده‌ها، احتمال رخداد فرسایش گالی افزایش پیدا می‌کند. منحنی پاسخ فاصله از جاده‌ها نشان می‌دهد که کمابیش بعد از فاصله ۲۰۰متری از آن‌ها، تأثیر جاده‌ها از بین می‌رود (شکل ۳-g). در منطقه‌ی مورد مطالعه، ۸/۳ درصد احتمال رخداد گالی به‌واسطه‌ی عامل فاصله از جاده‌ها قابل پیش‌بینی است. براساس تحقیقی که Zabihi *et al.* (2018) انجام دادند، فاصله از جاده تأثیر زیادی بر فرسایش گالی داشته و کلاس۰ - ۲۰۰ متر بیشترین مقدار نسبت فراوانی را نشان می‌دهد. در راستای یافته‌های Zabihi *et al.* (2018)، رابطه معکوس بین فاصله از جاده و حساسیت به فرسایش گالی در این تحقیق نیزقابل مشاهده است.

درصد شیب

انتظار می‌رود با افزایش شیب، احتمال رخداد گالی افزایش پیدا کند. شکل ۳ – h نشان می‌دهد که در شیب صفر تا ۹ درصد، نوساناتی در احتمال رخداد گالی دیده می‌شود

ولی در کل از شیب ۱۰ درصد به بالا احتمال رخداد گالی بیشتر می‌شود که این افزایش رخداد با افزایش شیب تشدید نمی‌شود. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که منطقه مورد مطالعه، بنابر شکل ۲ - a، کمابیش شیب بالاتر از ۳۰ درصد نداشته و کل منطقه دارای شیب متوسط می‌باشد. در منطقه‌ی مورد مطالعه، ۸ درصد احتمال رخداد گالی به‌واسطه‌ی عامل درصد شیب قابل پیش‌بینی است. Maghsoudi *et al.* (2012) بیان می‌کنند که براساس بررسی‌های به‌عمل آمده در حوضه زواریان، حدود ۱۰۷۰/۲۴ هکتار (۹۸/۵۷ درصد) از خندق‌ها در طبقه شیب صفر تا ۲۰ درصد رخ داده‌اند که بیشترین میزان فراوانی آن با مساحت ۹۲۱/۵۲ هکتار (۸۴/۸۷ درصد) در شیب صفر تا ۱۰ درصد بوده است. Esmaeili and Shokati (2015) در تحقیق خود بیان می‌کنند که بیشترین گالی در شیب بالای ۴۰ درصد رخ داده است.

جهت شیب

جهت شیب می‌تواند به‌طور غیر مستقیم روی فرسایش گالی تأثیر بگذارد، چون جهت شیب روی عوامل آب و هوایی (مدت زمان تابش خورشید، شدت بارش، رطوبت و...) و پوشش گیاهی مؤثر است (Pulice *et al.*, 2009). با توجه به این که شیب‌های جنوبی از نظر میزان تابش دریافتی و درنتیجه میزان رطوبت با شیب‌های شمالی متفاوتند و تابش بیشتری دریافت می‌کنند و به‌دلیل کم شدن رطوبت، پوشش گیاهی کمتری دارند به همین دلیل انتظار می‌رود که شیب‌های جنوبی بیشتر آمادگی فرسایش داشته باشند ولی با توجه به وجود نداشتن پستی و بلندی و تفاوت ارتفاع زیاد در منطقه مورد مطالعه، انتظار می‌رود که جهت شیب، تأثیر زیادی در احتمال رخداد گالی نداشته باشد. همانگونه که در شکل ۳ - i مشخص است، در شیب‌های شمالی و شمال‌شرقی (۰ تا ۶۷/۵)، احتمال رخداد گالی کمابیش صفر است، وقتی به شیب‌های شرقی (۶۷/۵ تا ۱۱۲/۵) می‌رسیم، هرچند ناچیز، احتمال رخداد فرسایش گالی افزایش می‌یابد. این افزایش ناچیز تا اوایل شیب‌های جنوب شرقی (۱۱۲/۵ تا ۱۵۷/۵) هم کشیده می‌شود و تا شیب‌های جنوب‌غربی (۲۰۲/۵ تا ۲۴۷/۵) ثابت می‌ماند و از اوایل شیب‌های غربی (۲۴۷/۵ تا ۲۵۰) کاهش احتمال رخداد فرسایش گالی اتفاق افتاده و این کاهش تا شیب‌های شمالی (۳۳۷/۵ تا ۳۶۰) ثابت باقی می‌ماند. در منطقه‌ی مورد مطالعه، ۵/۴ درصد احتمال رخداد گالی به‌واسطه‌ی عامل جهت شیب قابل پیش‌بینی است. در همین ارتباط Maghsoudi *et al.* (2012) در تحقیق خود بیان می‌کنند که بیشترین فرسایش خندقی در جهت جنوب شرقی و شرق رخ داده است که بیانگر این است که جهت‌های شرقی و جنوب‌شرقی به‌دلیل برخورداری از رطوبت کمتر، استعداد فرسایش خندقی بیشتری دارند. Rahmati *et al.* (2016) بیان می‌کنند که شیب‌های جنوبی و مسطح نسبت به دیگر کلاس‌های جهت شیب تمایل بیشتری به فرسایش دارند.

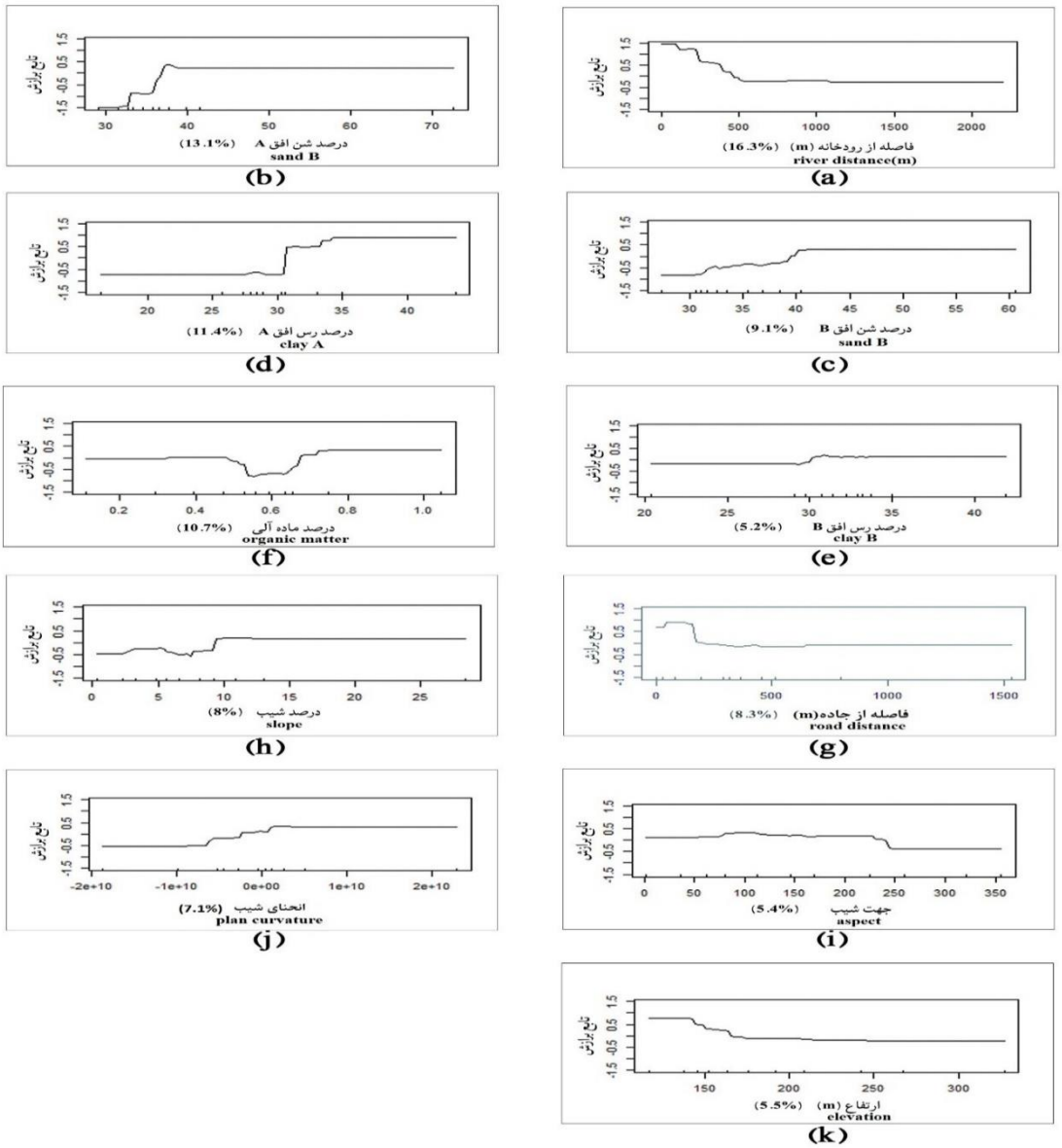
انحنای شیب

انتظار می‌رود در نقاطی که انحنای شیب مقعر دارند احتمال رخداد فرسایش گالی بیشتر باشد. در شکل ۳ - j، اعداد منفی شیب‌های محدب و اعداد مثبت شیب‌های مقعر را نشان می‌دهند. بنابراین می‌توان گفت وقتی زمین به شکل مقعر باشد آب تجمع پیدا کرده و قدرت آب در یک مسیر بیشتر می‌شود، وقتی که سطح زمین محدب می‌شود، آب پخش شده و میزان آب زیاد برای ایجاد فرسایش وجود ندارد. بنابراین در شکل‌های مقعر، آب از اطراف جمع شده و قدرت فرسایندگی بیشتر می‌شود و احتمال شروع گالی را افزایش می‌دهد. در منطقه‌ی مورد مطالعه، ۷/۱ درصد احتمال رخداد گالی به‌واسطه‌ی عامل انحنای شیب قابل پیش‌بینی است. رابطه بین منحنی شیب و فرسایش گالی نشان داد که دامنه‌های مقعر دارای بالاترین فراوانی بوده است (Zabihi *et al.*, 2018).

ارتفاع

باوجود این که اختلاف ارتفاع زیادی در منطقه مورد مطالعه وجود ندارد، اما شکل ۳ - k نشان می‌دهد که احتمال فرسایش گالی در این منطقه در ارتفاع‌های پایین بیشتر از ارتفاع‌های بالا می‌باشد. بیشترین احتمال رخداد فرسایش

گالی تا حدود ارتفاع ۱۵۰ متری بوده و در ارتفاع‌های بالاتر از ۱۵۰ متر، احتمال رخداد فرسایش گالی یک روند کاهشی را نشان می‌دهد. در نتیجه می‌توان گفت که دیگر فاکتورهای وابسته به ارتفاع می‌تواند تأثیر در این عامل و به‌وجود آمدن این منحنی پاسخ داشته باشد. عواملی مانند کشاورزی که به‌طور معمول در ارتفاعات پایین انجام می‌شود و یا جاده‌ها و رودخانه‌ها و دیگر عامل‌ها که در ارتفاعات پایین بیشتر فعال می‌باشند، به‌عبارت دیگر اینجا عامل مؤثر فقط ارتفاع نیست و به احتمال زیاد تغییر کاربری سبب این اتفاق می‌شود که در ارتفاع پایین نسبت به ارتفاعات بالا بیشتر می‌باشد. در منطقه‌ی مورد مطالعه، ۵/۵ درصد احتمال رخداد گالی به‌واسطه‌ی عامل ارتفاع قابل پیش‌بینی است. Rahmati *et al*. (2017) در تحقیق خود نشان دادند که فرسایش‌گالی بیشتر در منطقه‌های کم ارتفاع رخ می‌دهد، به‌عبارت دیگر، ارتفاع کمتر با افزایش رخداد گالی همراه است.



شکل۳- منحنی پاسخ هرکدام از فاکتورها

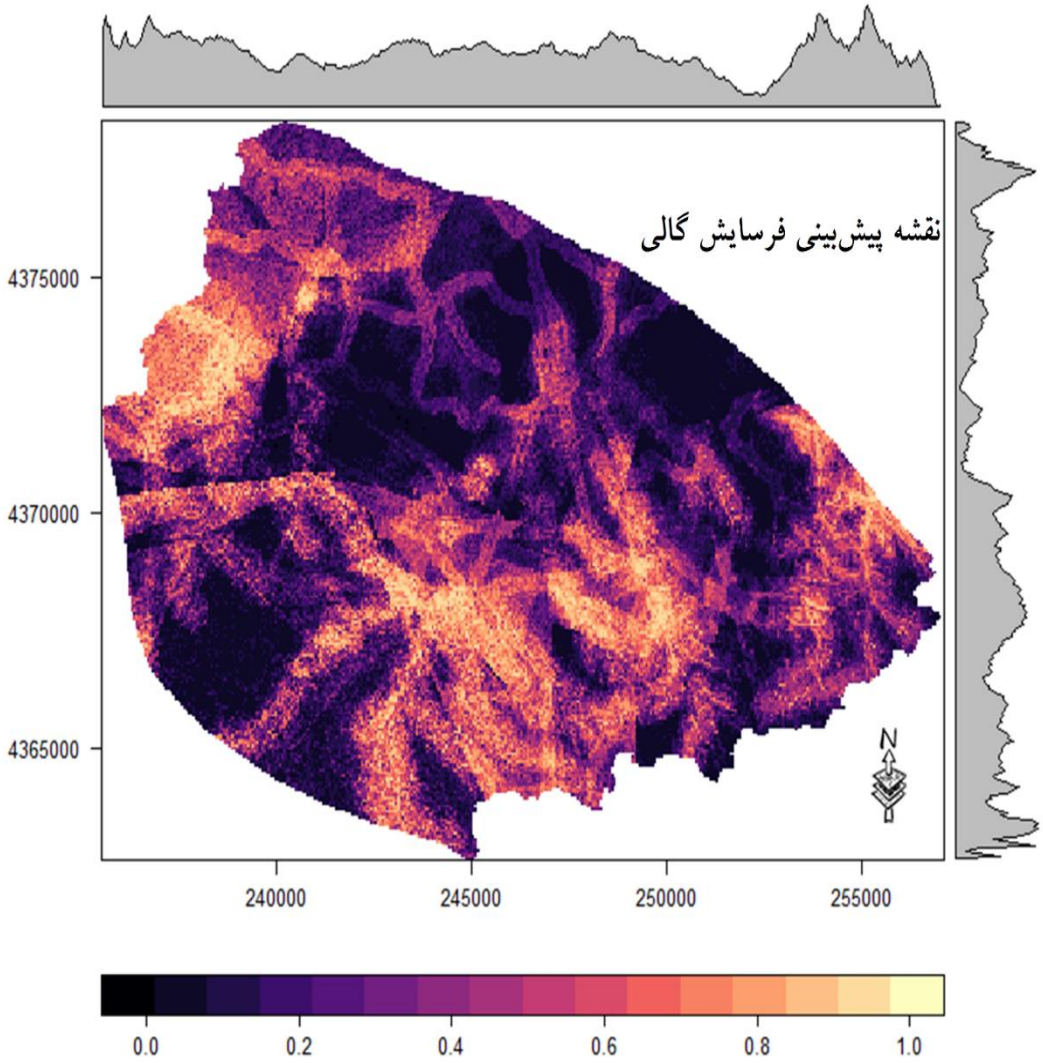
Fig. 3- Response curve of each factor

پیش‌بینی رخداد فرسایش گالی در منطقه (نقشه فرسایش‌پذیری منطقه)

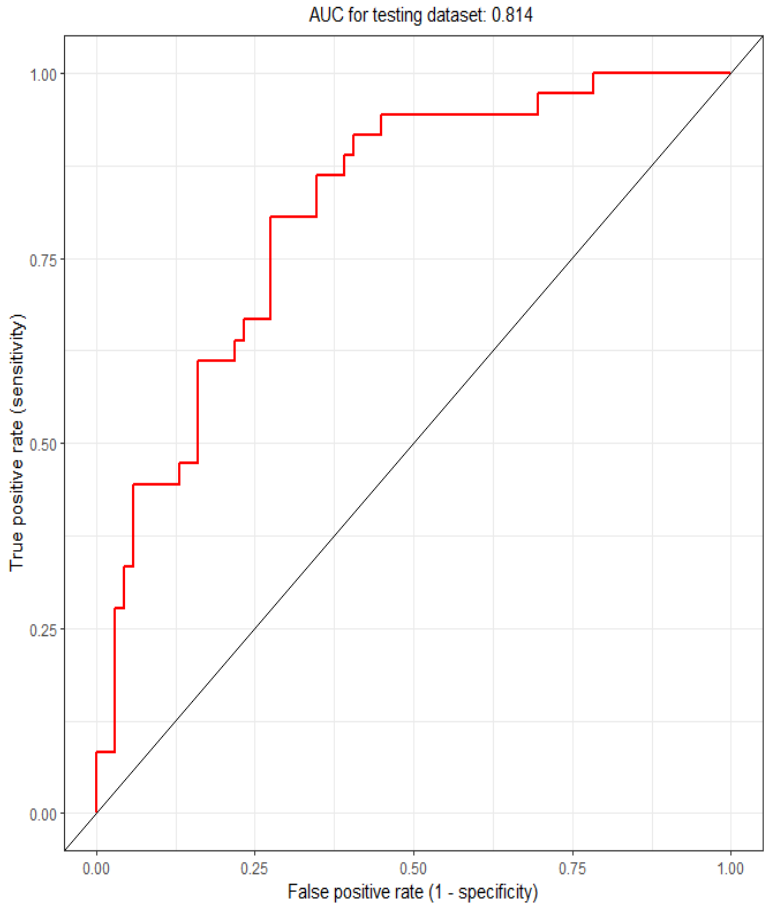
نقشه احتمال رخداد گالی به پنج سطح حساسیت، از خیلی کم تا خیلی زیاد طبقه‌بندی گردید. شکل۴ نقشه پیش‌بینی فرسایش گالی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، پهنه‌های با حساسیت بسیار کم (۰ تا ۰/۲)، کم (۰/۲ تا ۰/۴)، متوسط (۰/۴ تا ۰/۶)، زیاد (۰/۶ تا ۰/۸) و بسیار زیاد (۰/۸ تا ۱) به‌ترتیب ۴۳/۸۳، ۱۸/۳۲، ۱۴/۲۴، ۱۲/۹ و ۱۰/۶۳ درصد از مساحت منطقه‌ی مورد مطالعه را دربرگرفته‌اند.

اعتبارسنجی مدل

نقشه پیش‌بینی فرسایش خندقی که تهیه گردید، با سنجه ROC مورد ارزیابی قرار گرفت. مساحت زیر منحنی ROC که AUC نام دارد، هر چقدر به ۱ نزدیکتر باشد، نشان-دهنده‌ی دقت مدل جهت پیش‌بینی رخداد یا رخ ندادن فرسایش گالی است. مقدار AUC برای مدل رگرسیون درختی تقویت شده در این تحقیق، ۰/۸۱ به‌دست آمد که نشان‌دهنده تخمین خوب مدل در پیش‌بینی منطقه‌های حساس به فرسایش گالی است. شکل۵ نمودار ROC مدل مورد نظر را نشان می‌دهد.



شکل۴- نقشه پیش‌بینی فرسایش گالی در منطقه
Fig. 4- Gully erosion prediction map



شکل ۵- نمودار ROC

Fig. 5- ROC diagram

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر فاکتورهای مختلف محیطی بر احتمال رخداد فرسایش گالی بررسی شد و با استفاده از مدل درخت‌های رگرسیونی تقویت شده میزان مشارکت هر یک از این فاکتورها در رخداد فرسایش گالی مشخص گردید. همچنین با استفاده از فاکتورهای مورد بررسی، نقشه‌ی پیش-بینی فرسایش گالی در منطقه مورد مطالعه به‌دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست آمده درصد تأثیر هر یک از فاکتورها که عبارتند از فاصله از رودخانه، شن افقA، شن افقB، رس افقA، رس افقB، ماده آلی خاک سطحی، فاصله از جاده، درصد شیب، جهت شیب، انحنای شیب و ارتفاع در احتمال رخداد گالی به‌ترتیب ۱۶/۳ درصد، ۱۳/۱ درصد، ۹/۱ درصد، ۱۱/۴ درصد، ۵/۲ درصد، ۱۰/۷ درصد، ۸/۳ درصد، ۸ درصد، ۵/۴ درصد، ۷/۱ درصد و ۵/۵ درصد می‌باشد. بنابراین، تأثیرگذارترین فاکتور بر فرسایش گالی در منطقه، فاصله از رودخانه (آبراهه) با ۱۶/۳ درصد مشارکت می‌باشد. و بعد از آن میزان درصد شن و رس در افق A به‌ترتیب با درصد مشارکت ۱۳/۱ و ۱۱/۴ و ماده آلی با ۱۰/۷ درصد. این نتایج می‌تواند بیانگر اهمیت تأثیر کیفیت خاک سطحی و مدیریت آبراهه‌ها در رخداد فرسایش گالی باشد. با توجه به این که منطقه مورد مطالعه به‌طور عمده کشاورزی بوده و فشار زیادی به خاک سطحی

منطقــه وارد می‌شــود، بــرای جلــوگیری از فرســایش خنــدقی و از دســترس خــارج شــدن خــاک مزرعــه‌هــا، بایــد دانــش زارعــان درمــورد روش‌هــای مــدیریتی خــاک افـزایش داده شـود. همچنـین بـرای کنتـرل و جلـوگیری از افزایش زمین‌هـای تحـت تـأثیر فرسـایش گـالی، اقـدام بــه بازســازی و مــدیریت خنــدق‌های قــدیمی بایــد در اولویت قرار گیرد.

پی‌نوشت‌ها

[1] Weights of evidence
[2] Frequency ratio
[3] Intraction
[4] Google earth
[5] Ensemble
[6] BRT: Boosted regression trees
[7] CART: Classification and regression tree

منابع

Agnesi, V., Angileri, S., Cappadonia, C., Conoscenti, C. and Rotigliano, E., 2011. Multi-parametric GIS analysis to assess gully erosion susceptibility: a test in southern Sicily, Italy. Landform Analysis. 17, 15-20.

Ahmadi, H., 1999. Apllied Geomorphology. University of Tehran Press, Tehran.

Basga, S.D., Tsozue, D., Temga, J.P., Balna, J. and Nguetnkam, J.P., 2018. Land use impact on clay dispersion/flocculation in irrigated and flooded vertisols from Northern Cameroon. International Soil and Water Conservation Research. 6(3), 237-244.

Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A. and Soriano-Soto, M., 2001. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. CATENA. 44(1), 47-67.

Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. Agronomy Journal. 54, 464-465.

Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. Agronomy Journal. 54, 464-465.

Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R. and Stone, C., 1984. Classification and Regression Trees. Chapman and Hall/CRC Press. Boca Raton, FL.

Choi, Y., Park, H. and Sunwoo, C., 2008. Flood and gully erosion problems at the Pasir open pit coal mine, Indonesia: a case study of the hydrology using GIS. Bull. Engineering Geology and the Environment. 67, 251–258.

Conforti, M., Aucelli, P.P.C., Robustelli, G. and Scarciglia, F., 2010. Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy). Natural Hazards. 56(3), 881–898.

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. 204(1), 399–411.

Douglas, I. and Pietroniro, A., 2003. Predicting road erosion rates in selectively logged tropical rain forests. In: de Boer, D., Froehlich, W., Mizuyama, T. (Eds.), Erosion Prediction in Ungauged Basins, Integrating Methods and Techniques. Proceedings of an International Symposium Sapporo, Japan. IAHS Press, Wallingford, UK.

Dube, F., Nhapi, I., Murwira, A., Gumindoga, W., Goldin, J. and Mashauri, D.A., 2014. Potential of weight of evidence modelling for gully erosion hazard assessment in Mbire District–Zimbabwe. Physics and Chemistry of the Earth. 67, 145–152.

Esmaeili, R. and Shokati, R., 2015. Gully erosion susceptibility assessment using logestic regression in Salavat Abad basin of kurdistan province. Geographic studies of arid regions. 20, 91-104.

Fernandez-Illescas, C.P., Porporato, A., Laio, F. and Rodriguez-Iturbe, I., 2001. The ecohydrological role of soil texture in a water-limited ecosystem. Water Resources Research. 37(12), 2863–2872.

Gayen, A., Pourghasemi, H.R., Saha, S., Keesstra, S. and Bai, S., 2019. Gully erosion susceptibility assessment and management of hazard-prone areas in India using different machine learning algorithms. Science of The Total Environment. 668, 124-138.

Ghahroodi, M., 2003. Danger zoning model due to the expansion of gully erosion. In Koloche Bijar watershed with GIS and RS. Ministry of Energy research project.

Ghodousi, J. and Davari, M., 2005. The effect of soil physical chemical properties on gully erosion and morphology of gully. 3rd Erosion and Sediment National conference. 28th August, Tehran.

Gholchin, A., 2016. Soil Organic Matter. Jahad Daneshghahi, Zanjan, Iran.

Gyssels, G., Poesen, J., Nachtergaele, J. and Govers, G., 2002. The impact of sowing density of small grains on rill and ephemeral gully erosion in concentrated flow zones. Soil & Tillage Research. 64(3), 189–201.

Igwe, C.A., Zarei, M. and Stahr, K., 2013. Stability of aggregates of some weathered soils in south-eastern Nigeria in relation to their geochemical properties. Journal of Earth System Science. 122(5), 1283-1294.

Jafari Garzin, B. and Kavian, A., 2009. Estimation of Gully Erosion in Sorkh Abad watershed of Mazandaran using RS and GIS. Iran watershed management science and Engineering. 3, 55-58.

Kay, BD. and Angers, DA., 1999. Soil Structure. In ME Sumner (ed) Handbook of Soil Science. CRC Press, Boca Raton, USA.

Maghsoudi, M., Shadfar, S. and Abbasi. M., 2012. Susceptibility mapping of gully erosion in Zavarian watershed. Quantitative Geomorphology Studies. 2, 35-52.

Moore, I.D., Grayson, R.B. and Ladson, A.R., 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrological Processes. 5, 3–30.

Nguyen, N.M., Dultz, S., Kasbohm, J. and Le, D., 2009. Clay dispersion and its relation to surface charge in a paddy soil of the Red River Delta. Vietnam. Journal of Plant Nutrition & Soil Science. 172, 477–486.

Parkner, T., Page, M., Marden, M. and Marutani, T., 2007. Gully system Under Undisturbed indigenous forest East Coast Region New Zealand. Geomorphology. 84, 241-253.

Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G. and Valentin, C., 2003. Gully Erosion and environment change: importance and research needs. Catena. 50, 91-133.

Poesen, J., Vandaele, K. and Wesemael, B., 1998. Gully erosion: importance and model implications. In: Boardman, J., Favis-Mortlock, D. (Eds.), Modelling Soil Erosion by Water. Springer, Berlin, Germany.

Pulice, I., Scarciglia, F., Leonardi, L., Robustelli, G., Conforti, M., Cuscino, M., Lupiano, V. and Critelli, S., 2009. Studiomultidisciplinare di forme e processi denudazionali nell'area di Vrica (Calabria orientale). Bollettinodella Societa Geografica Italiana. 87(I–II), 399–414.

Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R. and Feizizadeh, B., 2017. Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. Geomorphology. 298, 118–137.

Refahi, H., 2006. Water Erosion and coservation. 2298. University of Tehran Press. Tehran, Iran.

Sayadi, M., 2006. Investigation the Effect of some factors Affecting the Development of Gully Erosion in the Loess formation (case study of Emam Kakhi watershed in Golestan Province). M.Sc. Thesis. Gorgan University of Agricultural science and Natural Resources. Gorgan, Iran.

Valentin, C., Poesen, J. and Li, Y., 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. Catena, 63, 132-153.

Vandekerckhove, L., Poesen, J. and Govers, G., 2003. Medium-term gully headcut retreat rates in Southeast Spain determined from aerial photographs and ground measurements. Catena. 50(2), 329–352.

Voelkner, A., Holthusen, D. and Horn, R., 2015. Influence of anaerobic digestate amendment on the

physicochemical properties of differently textured soils using homogenized residues. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 178(2), 261–269.
Walkley, A. and Black, l.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organci matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science. 37, 29-38.

Zabihi, M., Mirchooli, F., Motevalli, A., Khaledi Darvishan, A., Pourghasemi, H.R., Zakeri, M.A. and Sadighi, F., 2018. Spatial modelling of gully erosion in Mazandaran Province, northern Iran. CATENA. 161, 1–13.

Environmental Sciences Vol.18/No.3/Autumn 2020

167-183

Modeling the probability of gully occurrence and investigating the spatial effects of its drivers using the boosted tree regression

Hossein Talebi Khiavi [1], Hossein Shafizadeh Moghadam[2*] and Mostafa Karimian Eghbal

[1] Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

[2] Department of Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2019.05.19 Accepted: 2019.06.17

Talebi Khiavi, H., Shafizadeh Moghadam, H. and Karimian Eghbal, M., 2020. Modeling the probability of gully occurrence and investigating the spatial effects of its drivers using the boosted tree regression. Environmental Sciences. 18(3): 167-183.

Introduction: Gully erosion is a subtype of water erosion that makes agricultural lands impracticable during its development. Given the geographical and environmental conditions, various factors contribute to the development and expansion of gully erosion. In this study, due to the extensive expansion of gully erosion in Jafarabad Moghan, and damaging the agricultural lands and rangelands, the probability of gully occurrence and the spatial effects of its drivers has been investigated.

Material and methods: In this study, using a boosted regression tree model, the effect of the following factors on the gully occurrence were investigated: slope, aspect, plan curvature, altitude, clay content of horizon A, clay content of horizon B, sand content of horizon A, sand content of horizon B, surface organic matter, distance from roads, and distance from rivers. Then, the susceptibility map of the gully erosion was created.

Results and discussion: The results showed that the distance from river, the sand content of horizon A, the clay content of horizon A, and the surface organic matter with 16.3%, 13.1%, 11.4% and 10.7%, respectively, were the most important influential factors on gully occurrence. On the other hand, aspect (4.5%) and elevation (5.5%) were the least important ones, which could be due to the lack of significant elevation shift in the region. Based on the susceptibility map, 10.63% of the study area was classified as very sensitive to the gully erosion. The AUC value for the boosted tree regression model was 0.81, which indicated a good model performance in the prediction of areas sensitive to gully erosion.

Conclusion: The results of this study showed the critical influence of surface soil properties on the gully erosion. Considering the fact that the greatest effect on the probability of gully erosion was related to distance from the river and surface soil properties, it is possible to manage the lands susceptible to gully erosion by effective management of streams and existing gullies, and also by training the farmers and increasing their knowledge regarding gully erosion, land management, and sustainable agriculture. The results indicated the suitability of the boosted regression trees for similar studies.

Keywords: Modeling, Spatial effect, Gully erosion, Regression trees.

* Corresponding Author: *Email Address*. h.shafizadeh@modares.ac.ir
http://doi.org.10.29252/envs.18.3.167