نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۹، ص. ۱۹۳-۱۷۹

Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 1, March-April 2020, p. 179-193

برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی و درختی

یاسر استواری[۱]- سید علی اکبر موسوی[۲*]- حسن مظفری[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۴

چکیده

برای انجام فعالیت‌های حفاظتی در برابر فرسایش خاک دانستن میزان حد قابل تحمل هدررفت خاک بسیار ضروری است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف تعیین میزان حد قابل تحمل هدررفت خاک به روش ضخامت و بر اساس معادله پرکاربرد اسکیدمور و توسعه توابع انتقالی رگرسیونی در برآورد این ویژگی در حوضه بالادست سد درودزن انجام شد. برای این منظور تعداد ۶۰ نیم‌رخ خاک با دستگاه بیل مکانیکی حفر و علاوه بر اندازه‌گیری عمق خاک، برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی (۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) نیز در آزمایشگاه و صحرا اندازه‌گیری شد. از روش رگرسیونی خطی چندگانه و رگرسیون درختی برای توسعه توابع انتقالی استفاده شد. نتایج نشان داد مقدار حد قابل تحمل هدررفت خاک با استفاده از روش اسکیدمور با میانگین ۱/۰۴ تن در هکتار در سال از حداقل ۰/۲۹ تا حداکثر ۲/۲۵ تن در هکتار در سال متغیر بود. ماده آلی خاک با داشتن بیشترین ضریب استاندارد شده (Beta=۰/۶۴) و بیش‌ترین همبستگی (۰/۷۷-) با حد قابل تحمل هدررفت خاک مهم‌ترین ویژگی در برآورد این شاخص خاک بود. بر اساس آماره‌های ارزیابی، روش رگرسیون درختی با میانگین برآوردی حد قابل تحمل هدررفت خاک ۱/۰۸ تن در هکتار در سال و داشتن ضریب تعیین بالاتر در هر دو مجموعه داده واسنجی (R^2=۰/۹۶) و اعتبارسنجی (R^2=۰/۷۸) و مقدار خطای کمتر در داده واسنجی (۰/۲۶ تن در هکتار در سال=RMSE) و اعتبارسنجی (۰/۱۳ تن در هکتار در سال =RMSE) کارآیی بیش‌تری در مقایسه با روش رگرسیونی چندگانه چندگانه با میانگین برآوردی حد قابل تحمل ۱/۱۳ تن در هکتار در سال داشت.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی، خاک‌های آهکی، رگرسیون چندگانه، روش اسکیدمور، فرسایش‌پذیری خاک

مقدمه

فرسایش خاک[۴] از مسائل بسیار مهم و خطری جدی برای امنیت غذایی و در نتیجه حیات بشر به‌شمار می‌رود (۱۹، ۲۱ و ۲۵). اهمیت پدیده فرسایش زمانی مشخص می‌شود که مقدار فرسایش خاک با مقدار حد قابل تحمل آن مقایسه شود. حد قابل تحمل فرسایش خاک[۵] (T-value) شاخصی برای قضاوت در مورد پتانسیل خطر فرسایش خاک و کاهش تولید محصولات کشاورزی است. در واقع حد قابل تحمل هدررفت خاک میزان پتانسیل خطر فرسایش خاک، کاهش بهره‌وری و تولید از دست رفته و معیار نهایی از مهار فرسایش خاک و تخریب اراضی است (۲۳ و ۳۲). از نظر ریاضی، استمی و اسمیت (۲۷) حد قابل تحمل هدررفت خاک (T) را میزانی از تغییر خاک سطحی بدون کاهش میزان تولید محصول در نظر گرفتند. در حال حاضر روش‌های مبتنی بر ضخامت خاک بر اساس قابلیت آن‌ها در برآورد میزان حد قابل تحمل هدررفت خاک بیش‌تر استفاده می شود. در تابع ریاضی مبتنی بر ضخامت خاک توسعه یافته توسط اسکیدمور[۶] (۲۶)، حد قابل تحمل هدررفت خاک بر اساس عمق فعلی خاک، کم‌ترین و بیش‌ترین عمق مناسب خاک برای رشد پایدار محصولات زراعی و حد بالای مقدار فرسایش قابل تحمل در تطابق با محیط برآورد می‌شود (۸).

اخیراً تعیین حد قابل تحمل هدررفت خاک مورد توجه پژوهشگران در دنیا قرار گرفته است. به عنوان نمونه، روزانف (۲۲) با در نظر گرفتن نفوذپذیری خاک، اندازه خاک‌دانه‌ها و ماده‌آلی روشی را در برآورد مقاومت خاک به فرسایش ارائه کرد. این روش به‌طور موفقیت‌آمیزی در استپ‌های جنگلی شمال روسیه به‌کار گرفته شد. ژینگوو و همکاران (۳۳) دو عامل ضخامت خاک و فرسایش‌پذیری خاک را به‌عنوان معنی‌دارترین عامل‌های مؤثر بر حد قابل تحمل هدررفت خاک معرفی نمودند. چاندل و هادا (۵) به ارزیابی حد قابل

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب پژوهشگر پسادکتری، دانشیار و دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: aamousavi@gmail.com
DOI: 10.22067/jsw.v34i1.82129

4- Soil erosion
5- Tolerable soil erosion
6- Skidmore

www.SID.ir

Archive of SID

تحمل هدررفت خاک در هندوستان پرداختند. در این پژوهش، دو روش میزان تشکیل خاک و روش ضخامت برای تعیین حد قابل تحمل هدررفت خاک استفاده شدند. نتایج نشان داد که روش ضخامت خاک از کارآیی مناسبی برای تعیین حد قابل تحمل هدررفت خاک برخوردار است. دوآن و همکاران (۷) معادله اسکیدمور (۲۶) را با نگرش مبتنی بر حفاظت از تولید خاک در منطقه رودخانه سرخ چین اصلاح کردند. آنان سه عامل حداقل حد قابل تحمل تولید خاک، پتانسیل تولید کنونی و حد بهینه تولید خاک را به معادله اسکیدمور (۲۶) اضافه کردند. در زمینه حد قابل تحمل هدررفت خاک در ایران مطالعات محدودی انجام شده است. از جمله گوهردوست و همکاران (۱۰) با به‌کارگیری سامانه اطلاعات جغرافیایی و معادله اسکیدمور (۲۶) حد قابل تحمل هدررفت خاک در حوضه آبخیز چهل-چای استان گلستان را بررسی و گزارش کردند بیش‌ترین مساحت منطقه (حدود ۴۳/۷ درصد) دارای حد قابل تحمل ۵/۳۷ تن در هکتار در سال و مساحتی حدود ۰/۵ درصد از منطقه دارای حد قابل تحمل ۲/۲۲ تن در هکتار در سال است. غفاری و همکاران (۸) نیز بر اساس روش‌های مبتنی بر عمق و کیفیت خاک به ارزیابی حد قابل تحمل فرسایش خاک در حوضه آبخیز حاجی قوشان استان گلستان پرداختند و گزارش کردند مقدار حد قابل تحمل فرسایش خاک به‌دست آمده با روش مبتنی بر عمق (۹/۲ تن در هکتار در سال) و کیفیت خاک (۱۰/۲ تن در هکتار در سال) بسیار به‌هم نزدیک می‌باشد.

از آنجائی‌که تعیین حد قابل تحمل خاک با استفاده از روش ضخامت خاک و معادله اسکیدمور (معادله ۱) نیازمند صرف وقت، هزینه و انرژی زیاد برای ایجاد نیم‌رخ خاک و تعیین پارامترهای مدل اسکیدمور (معادله ۱) است، لذا پژوهشگران سعی در برآورد حد قابل تحمل خاک با استفاده از توابع انتقالی و ویژگی‌های زودیافت خاک به کمک روش‌های رگرسیونی دارند. رگرسیون خطی چندگانه به دلیل محاسبات ساده یکی از متداول‌ترین روش‌ها در توسعه توابع انتقالی خاک است. هدف این روش بررسی و مدل‌سازی رابطه‌ی بین متغیرهاست که در آن متغیر وابسته به شکل تابعی ریاضی از متغیر(های) مستقل تعریف می‌شود (۱۰).

یکی دیگر از پرکاربردترین روش‌های رگرسیونی در علوم محیطی روش رگرسیون درختی است. این روش یکی از روش‌های داده‌کاوی بر مبنای آشکار کردن ساختار داده‌ها است که مزایای ارزشمندی مانند سادگی در نتایج، عدم نیاز به نرمال بودن توزیع داده‌ها و تفسیر راحت نتایج را به همراه دارد. روش رگرسیون درختی، نقطه بهینه جداسازی متغیرهای مستقل را تعیین و آن‌ها را به گروه‌هایی که تا حد ممکن از نظر متغیر همگن باشد تفکیک می‌کند. تاکنون از روش رگرسیون خطی چندگانه و درختی در برآورد حد قابل تحمل خاک استفاده نشده است هرچند این روش‌ها در برآورد سایر ویژگی‌های خاک بکار گرفته شده‌اند. مکنزی و جکوییر (۲۱) و دهقانی‌بانیانی و همکاران (۶) روش‌های رگرسیون درختی و رگرسیون خطی چندگانه را در تخمین هدایت آبی اشباع ارزیابی و مقایسه کردند. نتایج آنان نشان داد که روش رگرسیون درختی تخمین‌های واقعی و دقیق‌تری ارائه می‌کند. استواری و همکاران (۱۶) و استواری و همکاران (۱۷) از این دو روش به‌ترتیب برای برآورد فرسایش‌پذیری خاک و ظرفیت تبادل کاتیونی استفاده کردند.

شهرستان مرودشت در نزدیکی مرکز استان فارس یکی از مناطق بسیار مهم در زمینه تأمین محصولات راهبردی کشاورزی مانند گندم، ذرت و چغندرقند در سطح کشور است. در این شهرستان سد مخزنی دودزن در منطقه کامفیروز بر روی رودخانه کر احداث شده که تأمین‌کننده ۲۸ درصد آب شرب شهر شیراز و ۷۰ درصد آب شرب شهرستان مرودشت و هزاران هکتار از اراضی کشاورزی پایین‌دست است. با توجه به این‌که در جنوب ایران (از جمله در مرودشت و حوضه آبخیز دودزن)، تاکنون مطالعه‌ای برای تعیین حد قابل تحمل هدررفت خاک به‌عنوان اولین گام در مطالعات فرسایش خاک انجام نشده است، لذا هدف از این پژوهش ۱) تعیین حد قابل تحمل هدررفت خاک در بخش کامفیروز شهرستان مرودشت که منطقه‌ای بسیار مهم از نظر کشاورزی و تولید برنج و زیر حوضه اصلی متصل به دریاچه سد دودزن است؛ و ۲) توسعه توابع انتقالی برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک و به کمک روش رگرسیونی خطی چندگانه و رگرسیون درختی است.

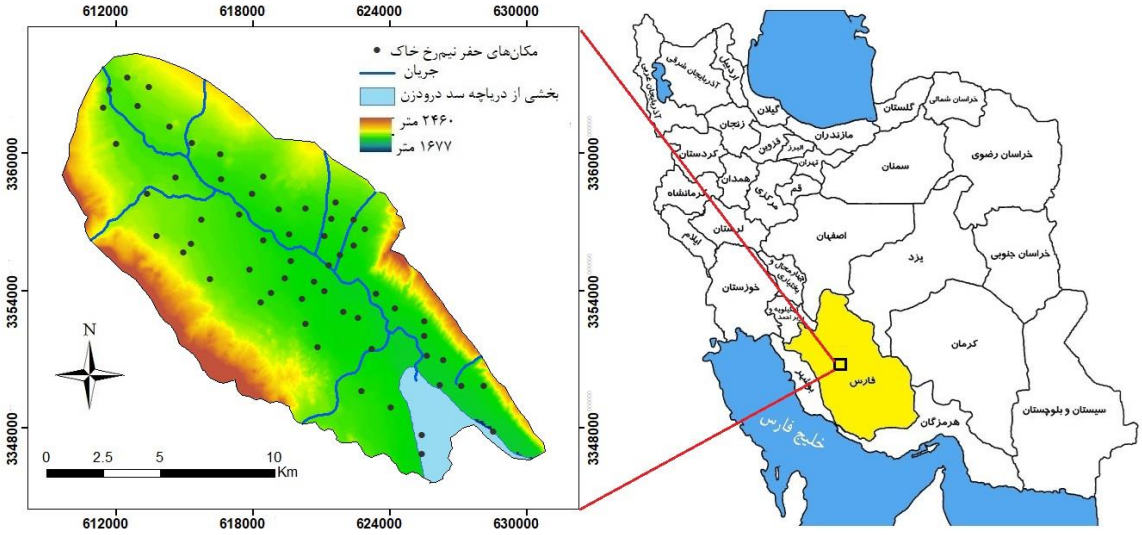
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز کامفیروز با مساحت ۴۲۲ کیلومتر مربع در منطقه نیمه‌خشک و با میانگین بارش سالانه ۴۴۳ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۴ درجه سانتی‌گراد از زیر حوضه‌های سد دودزن و یکی از بخش‌های پنج‌گانه شهرستان مرودشت در استان فارس بین عرض های جغرافیایی ″۳۰ ′۲۰ °۵۲ و ″۰۱ ′۱۰ °۵۲ و طول‌های جغرافیایی ″۰۳ ′۱۴ °۳۰ تا ″۲۴ ′۱۵ °۳۰ قرار دارد (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه قسمت مسطح حوضه با مساحت ۱۲۰/۵ کیلومتر مربع با داشتن خاک حاصل‌خیز تحت کشاورزی بوده و به دریاچه سد دودزن متصل است (شکل ۱). به‌دلیل فعالیت‌های کشاورزی (از جمله کشت های جو و گندم دیم در اراضی شیبدار مجاور) در منطقه مورد مطالعه و کشت محصول برنج، سالانه مقدار زیادی از خاک فرسوده شده و حجم زیادی از رسوبات به‌طور مستقیم و پس از پیمودن مسیر بسیار کوتاهی وارد دریاچه سد دودزن می‌شوند. سد مخزنی دودزن با هسته رسی و با حجم ذخیره ۹۹۳ میلیون متر مکعب بر روی رودخانه کر احداث شده که علاوه بر نیاز کشاورزی و صنعت، بخش اعظم آب شرب مورد نیاز شهرستان‌های شیراز و مرودشت را نیز تأمین می‌کند.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز درودزن در استان فارس و ایران و مکان نیم‌رخ‌های حفر شده در منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Location of Doroudzan watershed in Fars province and Iran and locations of profiles in the studied area

تعیین حد قابل تحمل فرسایش خاک به روش ضخامت خاک

در پژوهش حاضر، تعداد ۶۰ نیم‌رخ خاک با استفاده از بیل مکانیکی و کارگر حفر شد (شکل ۲). در روش مبتنی بر ضخامت خاک (۲۶)، حد قابل تحمل هدررفت خاک بر اساس عمق فعلی خاک، کم‌ترین و بیش‌ترین عمق مناسب خاک برای رشد پایدار محصولات زراعی و حد بالای مقدار فرسایش قابل تحمل در تطابق با محیط تعیین می‌شود. معادله اسکیدمور (۲۵) بر اساس عمق خاک به شرح زیر است:

$$T_{(x,y,t)} = (T_1 + T_2)/2 - (T_2 - T_1)/2 \cos\left[\frac{\pi(Z - Z_1)}{Z_2 - Z_1}\right] \qquad (۱)$$

که در آن $T_{(x,y,t)}$ حد قابل تحمل هدررفت خاک در مکان x، y و زمان t، T_1 حد پایین هدررفت (فرسایش قابل تحمل خاک)، T_2 حد بالای هدررفت (فرسایش قابل تحمل خاک)، Z ضخامت فعلی خاک، Z_1 و Z_2 به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین عمق مناسب خاک برای رشد پایدار محصولات زراعی هستند. T_1 حد پایین مقدار قابل تحمل فرسایش خاک است که در طول دوره‌ی پایه بهره‌وری برابر با میزان تشکیل خاک است. در واقع T_1 مقدار خاک هدررفته معادل با میزان تشکیل خاک است. $T_{(x,y,t)}$ برابر با T_1 زمانی است که عمق خاک در حداقل قابل تحمل خود است و سبب کاهش تولید نمی‌شود (۲۵). T_2 حد بالای مقدار فرسایش قابل تحمل در تطابق با محیط است که در مدت زمان طولانی بهره‌وری را کاهش نمی‌دهد. $T_{(x,y,t)}$ برابر با T_2 زمانی است که خاک به حد کافی عمیق باشد. مقادیر بر اساس مقادیر پیشنهادی اسکیدمور (۲۶) و با مشورت کارشناس خبره کشاورزی و با در نظر داشتن نوع محصول غالب منطقه تعیین شد.

شکل ۲- حفر نیم‌رخ‌های خاک با استفاده از بیل مکانیکی و اندازه‌گیری عمق نیم‌رخ‌های خاک

Figure 2- Drilling of soil profiles using mechanical excavator and measurement of soil profiles depth

www.SID.ir

Archive of SID

پس از حفر نیم‌رخ‌ها با استفاده از بیل مکانیکی مؤلفه عمق فعلی خاک (Z) با استفاده از متر دستی اندازه‌گیری شد. عمق فعلی خاک از سطح زمین تا لایه محدودکننده مانند سنگ بستر و یا لایه‌های عمدتاً حاوی قلوه‌سنگ در نظر گرفته شد. در منطقه سد درودزن برنج و گندم محصولات عمده بوده و بخش وسیعی از منطقه تحت کشت این دو گیاه است، لذا برای تعیین مقادیر Z_1 و Z_2 حداقل و حداکثر عمق خاک مناسب برای این گیاهان در نظر گرفته شد. مقدار Z_1 بر اساس مقدار پیشنهادی خواجه‌پور (۱۱) و نیز مشورت با کارشناسان کشاورزی در منطقه از ۰/۲۵ تا ۰/۵ متر در نظر گرفته شد. مقدار Z_2 با توجه به حداکثر عمق نیم‌رخ خاک و مقدار پیشنهادی اسکیدمور (۲۶) و مشاوره با کارشناسان کشاورزی ۲ متر در نظر گرفته شد. برای مؤلفه‌های T_1 و T_2 نیز از مقادیر پیشنهادی اسکیدمور (۲۶) به‌ترتیب برابر ۰/۲ و ۲ میلی‌متر استفاده شد. هرچند بایستی توجه نمود که عوامل مؤثر بر فرسایش و تشکیل خاک پویا هستند و درگذر زمان و با تغییر شرایط تغییر می‌کنند بنابراین مقادیر حد قابل تحمل نیز می توانند بسته به شرایط تا حدودی دچار تغییر شوند که این موضوع نیز بایستی در پژوهش‌ها و به‌ویژه در تصمیم‌گیری‌ها مد نظر قرار گیرد.

علاوه بر اندازه‌گیری‌های صحرایی، از افق سطحی خاک (۰ تا ۳۰ سانتی‌متری) نمونه‌برداری انجام و برخی از ویژگی‌های خاک در آزمایشگاه به‌شرح زیر اندازه‌گیری شد: چگالی ظاهری خاک به روش کلوخه، بافت خاک به روش هیدرومتری (۲)، واکنش نمونه‌های خاک به وسیله pH متر، قابلیت هدایت الکتریکی به وسیله هدایت‌سنج الکتریکی، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با اسیدکلریدریک ۲ نرمال و درصدکربن آلی خاک به روش اکسایش خشک (۲) تعیین شد. میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها (MWD) در حالت مرطوب با سری الک‌های با قطر سوراخ‌های ۱، ۰/۵، ۰/۱۵ و ۰/۰۵ میلی‌متر در زمان ۲ دقیقه تعیین شد. نفوذپذیری خاک بر اساس سرعت نهایی نفوذ آب در خاک با استفاده از روش استوانه دوگانه در فصل خشک سال (برای کاهش اثر رطوبت پیشین بر سرعت نفوذ) اندازه‌گیری شد.

توسعه توابع انتقالی برای برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک

قبل از تهیه توابع، آمار توصیفی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده نمونه‌های خاک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای این منظور، نرمال بودن داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد با استفاده از آزمون کولموگروف–اسمیرنوف بررسی شد. در این مطالعه داده‌هایی که خارج از دامنه $\pm 2\partial$ (انحراف معیار) بودند به‌عنوان داده‌های پرت در نظر گرفته شدند (لازم به ذکر است بر اساس منحنی توزیع نرمال زمانی که داده‌ای خارج از دامنه میانگین به‌اضافه و منهای دو برابر انحراف معیار باشد داده مورد نظر پرت به حساب می‌آید) (۳).

برای تهیه مدل‌های رگرسیونی برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک اطلاعات حاصل از ۶۰ نیم‌رخ خاک به دو قسمت تقسیم شد. یک قسمت با داشتن داده‌های ۴۲ نیم‌رخ (۷۰ درصد نیم‌رخ‌ها) برای واسنجی[1] مدل‌ها و دیگری با داده‌های ۱۸ نیم‌رخ خاک (۳۰ درصد نیم‌رخ‌ها) برای اعتبارسنجی[2] مدل‌های رگرسیونی استفاده شد.

از آنجائی‌که اگر بین متغیرهای مستقل در رگرسیون چندگانه رابطه خطی وجود داشته باشد به دلیل هم‌راستایی برآورد متغیرها بر مبنای مدل رگرسیون گمراه‌کننده است، لذا در ابتدا هم‌راستایی بین متغیرها با استفاده از شاخص تورم واریانس[3] بررسی شد:

$$VIF = \frac{1}{1-R^2} \qquad (۲)$$

که در آن VIF عامل تورم واریانس و R^2 ضریب تعیین[4] است. مقادیر VIF بیش از پنج نشان‌دهنده وجود مسئله هم‌راستایی بین متغیرهای مستقل است (۲۹). در نهایت با استفاده از روش رگرسیون چندگانه گام به گام به جلو[5] مدل رگرسیونی به شکل رابطه (۳) تهیه شد.

که در آن X1 تا X_n متغیرهای ورودی (مستقل)، a_0 عرض از مبدأ خط و a_1 تا a_n ضرایب رگرسیونی متغیرهای مستقل متناظر می باشند. در این مطالعه متغیر وابسته حد قابل تحمل هدررفت خاک و متغیرهای مستقل ویژگی‌های خاک بودند.

از همان ویژگی‌های زودیافت به کارگرفته شده در روش رگرسیون چندگانه به عنوان ورودی در روش رگرسیون درختی در برآورد حد قابل تحمل هدررفت استفاده شد. در روش رگرسیون درختی ابتدا متغیرهای مستقل (پیوسته و کیفی) به نرم‌افزار معرفی می‌شوند. سپس نرم‌افزار متغیرهای مؤثر را انتخاب و آن‌ها را بر اساس اولویت به طور متوالی به دو گره تقسیم می‌کند. بر اساس این منطق، یک ساختار شبیه درخت ایجاد می‌شود. بنابراین، در نخستین گره، ویژگی دیریافت مد نظر به کمک متغیری که بیشترین سهم را در توجیه تغییرات آن دارد به دو گره فرزندی که در واقع میانگین کلی از متغیر دیریافت است تقسیم می‌شود (۱۶ و ۱۷). برای ایجاد رگرسیون درختی از مدول رگرسیون درختی استاندارد نرم‌افزار STATISTICA 8.0 و با شرایط زیر استفاده شد: برای جلوگیری از بزرگ شدن بیش

1- Calibration
2- Validation
3- Variance Inflation Factor
4- Coefficient of Determination
5- Forward Stepwise Regression

www.SID.ir

Archive of SID

از اندازه درخت رگرسیون، حداقل اندازه‌ی نمونه در هر گره ۲۸ و حداکثر تعداد گره ۳۰ تا و شرط شکستن گره‌ها بر مبنای واریانس گذاشته شد.

تجزیه و تحلیل‌های آماری شامل مقایسه میانگین‌های دو مجموعه داده واسنجی و اعتبارسنجی با آزمون t، نرمال بودن داده‌ها با آزمون کلموگروف-اسمیرنوف، همبستگی داده‌ها و ایجاد مدل‌های رگرسیونی چندگانه و درختی با استفاده از نرم‌افزار STATISTICA 8.0 انجام شد.

ارزیابی و کارآیی مدل‌های برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک

چنانچه گفته شد از داده‌های ۱۸ نیم‌رخ خاک برای ارزیابی کارآیی مدل‌های رگرسیونی در برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک استفاده شد. برای ارزیابی کارآیی مدل‌ها از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، میانگین خطا[1] (ME) و ریشه میانگین مربعات خطا[2] (RMSE) استفاده شد (۱):

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}\left(O_i-\overline{O_i}\right)\left(P_i-\overline{P_i}\right)\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i-\overline{O_i}\right)^2\sum_{i=1}^{n}\left(P_i-\overline{P_i}\right)^2} \quad (۳)$$

$$ME = \sum\left(\frac{\left(P_i-O_i\right)}{n}\right) \quad (۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(P_i-O_i\right)^2}{n}\right)} \quad (۵)$$

که در آن‌ها P_i و O_i به ترتیب مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده حد قابل تحمل هدررفت خاک و n تعداد داده‌ها می‌باشند. آماره RMSE بیان‌گر میزان خطا است و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد کارآیی مدل بیشتر است. آماره ME بیان‌گر وجود اریبی است و هر اندازه به صفر نزدیک‌تر باشد پیش‌بینی از اریبی کم‌تری برخوردار است (۳).

نتایج و بحث

عمده نمونه‌های خاک به چهار کلاس بافت خاک شامل کلاس های لوم، لوم‌رسی، سیلتی رسی لومی و رسی سیلتی تعلق دارند (شکل ۳). جدول ۱ خلاصه آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک در دو مجموعه داده واسنجی و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. نتایج آزمون t نشان داد که میانگین ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده در دو مجموعه واسنجی و اعتبارسنجی تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. سیلت با میانگین ۴۵/۲۲ درصد بیش‌ترین مقدار اجزای بافت خاک را به خود اختصاص داد. میزان کربنات‌کلسیم معادل با میانگین ۴۲/۸۷ درصد از حداقل ۱۵/۲۵ درصد تا ۶۵/۵۰ درصد متغیر بود که این میزان کربنات کلسیم در منطقه مورد مطالعه مشابه با خاک‌های آهکی سایر مناطق ایران است.

میانگین، حداقل و حداکثر ماده آلی خاک به‌ترتیب ۲/۹۳، ۱/۵۷ و ۵/۰۶ درصد است که با نتایج ارائه شده توسط استواری و همکاران (۱۷) در منطقه سیمکان استان فارس و نزدیک به منطقه مورد مطالعه با اقلیم مشابه هم‌خوانی دارد. دامنه مقدار عامل فرسایش‌پذیری خاک با میانگین ۰/۰۳۸ تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر[3] از حداقل ۰/۰۲۹ تا حداکثر ۰/۰۴۴ تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر متغیر است که این مقادیر با پژوهش‌های انجام شده هم‌خوانی دارد. واعظی و همکاران (۳۱) نیز میانگین عامل فرسایش‌پذیری خاک‌های منطقه هشترود را ۰/۰۳۵ تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر گزارش کردند. در مطالعه استواری و همکاران (۱۷) در خاک‌های آهکی منطقه سیمکان استان فارس مقدار فرسایش‌پذیری حاصل از کرت‌های استاندارد با میانگین ۰/۰۳۰ تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر از حداقل ۰/۰۱۵ تا حدکثر ۰/۰۴۴ تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر متغیر بود.

برآورد مقدار حد قابل تحمل هدررفت خاک به روش اسکیدمور

در جدول ۲ خلاصه آماری پارامترهای مدل اسکیدمور (۲۶) در برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک ارائه شده است. عمق فعلی خاک در بخش‌های بالادست حوضه آبخیز سد درودزن از حداقل ۰/۴۰ متر در حواشی و دشت‌های دامنه‌ای تا حداکثر ۱/۸۰ متر در مرکز دشت متغیر بود. حداقل و حداکثر پارامتر Z_1 (کم‌ترین عمق مناسب خاک برای رشد پایدار محصولات زراعی در منطقه مورد مطالعه) بر اساس عمق فعلی خاک به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۵۰ متر نظر گرفته شد.

حداکثر مقدار پارامتر Z_2 (بیش‌ترین عمق مناسب خاک برای رشد پایدار محصولات زراعی) در این منطقه ۲ متر (که در بیش‌تر پژوهش‌های خاکشناسی توصیه شده است) در نظر گرفته شد و مقادیر پیشنهادی اسکیدمور (۲۶) برای حداقل و حداکثر پارامترهای T_1 و T_2 در نظر گرفته شد. مقدار حد قابل تحمل هدررفت خاک با میانگین ۱/۰۴ تن در هکتار در سال از ۰/۲۹ تا ۲/۲۵ تن در هکتار در سال

1- Mean Error
2- Root Mean Square Error

3- t ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}

www.SID.ir

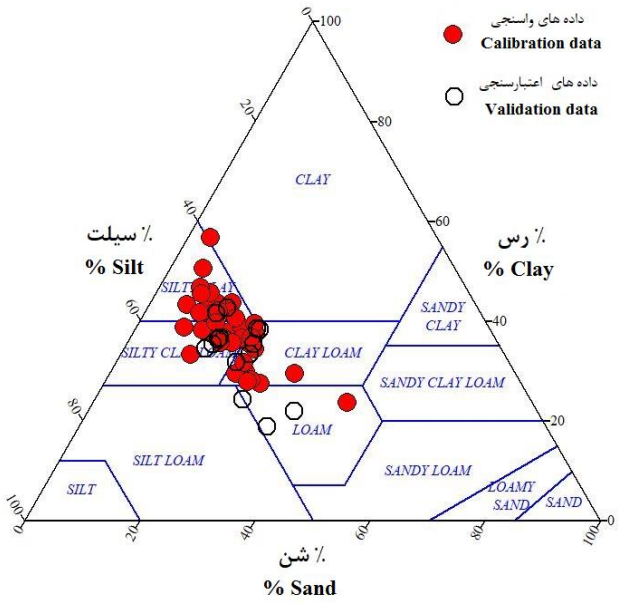
Archive of SID

متغیر است. در مطالعه گوهردوست و همکاران (۱۱) در حوضه آبخیز چهل چای استان گلستان متوسط حد قابل تحمل هدررفت خاک ۵/۶۵ تن در هکتار در سال گزارش شده که با مقدار به‌دست آمده در این مطالعه تفاوت دارد که می‌تواند به‌دلیل شرایط آب و هوایی متفاوت و نیز تفاوت در زمین‌شناسی منطقه، توپوگرافی و نوع خاک باشد. در پژوهش حاضر میزان بارندگی دریافتی بسیار کمتر از شمال ایران بوده و خاک‌ها نیز مقادیر زیادی کربنات کلسیم معادل در مقایسه با خاک‌های شمال ایران دارند که می‌تواند فعالیت‌های

خاکسازی و در نتیجه حد قابل تحمل خاک را تحت تأثیر قرار دهد. ژینگوو و همکاران (۳۳) نیز مقدار حد قابل تحمل هدررفت خاک برای خاک‌های سیاه مناطق پرباران شمال چین را از ۶۸ تا ۳۵۸ تن بر کیلومتر مربع (با میانگین ۱۴۱ تن در کیلومتر مربع) گزارش کردند. آنان دو عامل ضخامت خاک و حساسیت به فرسایش را به‌عنوان مهمترین عوامل مؤثر بر حد قابل تحمل هدررفت خاک معرفی کردند. کوزنتساو و عبدالخانووا (۱۲) رابطه‌ی اسکیدمور (۲۶) را در برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک‌های چرنوزم اصلاح و مقدار حداکثر ۱۰ تن در هکتار در سال را برای خاک‌های غیرفرسوده گزارش نمودند. آنان همچنین بیان کردند حد قابل تحمل هدررفت خاک بر اساس نوع خاک، درجه فرسایش‌پذیری و الگوی گیاهی متغیر است. غفاری و همکاران (۹) نیز میانگین حد قابل تحمل هدررفت خاک به روش عمق خاک را برای حوضه آبخیز حاجی قوشان استان گلستان ۱۰/۲ تن در هکتار در سال تعیین کردند.

تهیه مدل رگرسیونی برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک

در جدول ۳ همبستگی ویژگی‌های مختلف خاک با یکدیگر و حد قابل تحمل هدررفت خاک حاصل از روش اسکیدمور (۲۶) نشان داده شده است. اجزای رس و شن خاک به‌ترتیب همبستگی منفی و مثبت معنی‌دار با فرسایش‌پذیری خاک داشتند (جدول ۳). بر خلاف مطالعه حاضر، در مطالعه کارلوس و همکاران (۴) با افزایش درصد شن خاک مقدار فرسایش‌پذیری کاهش یافت ($p<۰/۰۵$, $r=-۰/۳۸$). آنان همچنین بین مقدار درصد رس و فرسایش‌پذیری همبستگی بسیار ضعیف و غیرمعنی‌داری ($r=۰/۰۳$) گزارش کردند. کارلوس و همکاران (۴) هم‌چنین گزارش کردند اجزای رس به‌دلیل اندازه کوچک و نیز نیروی چسبندگی بین ذرات در برابر فرسایش، حساسیت کم‌تر و مقاومت بیش‌تری در برابر جدا شدن توسط عامل فرسایش‌دهنده دارند. در بین اجزای بافت خاک، سیلت ($p>۰/۰۵$, $r=۰/۰۴$) رابطه معنی‌داری با میزان فرسایش‌پذیری خاک و نیز حد قابل تحمل فرسایش خاک نداشت. فرسایش‌پذیری بیش‌ترین همبستگی ($r=-۰/۶۵$) را با نفوذ آب در خاک داشت. یو و همکاران (۳۴)، واعظی و همکاران (۳۱)، استواری و همکاران (۱۷) نیز همبستگی منفی معنی دار نفوذ آب در خاک با فرسایش‌پذیری را گزارش کردند.



شکل ۳- توزیع اندازه ذرات نمونه‌های خاک حوضه آبخیز درودزن در استان فارس

دایره‌های تو خالی داده‌های واسنجی و دایره‌های توپر داده‌های اعتبارسنجی هستند.

Figure 3- Particles size distribution of soil samples in Doroudzan watershed in Fars province

Hallow circles are calibration data and solid circles are validation data.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- خلاصه آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های حوضه آبخیز درودزن در استان فارس

Table 1- Summary statistic of physical and chemical properties of Doroudzan watershed soils in Fars province

ویژگی‌های خاک Soil properties	واحد Unit	داده‌های واسنجی (n=45) Calibration data (n=45)				داده‌های اعتبارسنجی (n=15) Validation data (n=15)			
		حداقل Min.	حداکثر Max.	میانگین Mean	انحراف معیار SD	حداقل Min.	حداکثر Max.	میانگین Mean	انحراف معیار SD
پ‌هاش (pH)	-	6.65	7.91	7.39	0.27	7.05	7.86	7.38	0.220
قابلیت هدایت الکتریکی (EC)	dS m^{-1}	0.60	4.02	1.62	3.47	0.350	6.07	2.16	1.67
کربنات کلسیم معادل (CCE)	%	15.2	65.5	42.7 [a]	7.8	23.2	66.5	40.5 [a]	9.51
میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD)	mm	0.68	2.45	1.33 [a]	0.57	0.800	1.98	1.26 [a]	0.400
نفوذپذیری (PE)	cm h^{-1}	0.80	3.80	1.70 [a]	0.50	0.35	3.30	1.57 [a]	0.820
جرم مخصوص ظاهری (BD)	g cm^{-3}	1.47	2.22	1.79 [a]	0.19	1.34	2.02	1.42 [a]	0.200
ماده آلی (OM)	%	1.50	4.21	3.02 [a]	0.88	1.70	4.22	2.84 [a]	0.620
رس (Clay)	%	23.7	56.8	38.5 [a]	6.30	18.9	42.8	37.3 [a]	7.50
سیلت (Silt)	%	32.2	54.6	45.4 [a]	3.80	40.1	51.4	46.1 [a]	3.50
شن (Sand)	%	13.3	44.1	18.3 [a]	7.50	12.2	35.4	21.1 [a]	7.20
فرسایش‌پذیری خاک (Soil erodibility)	t ha h ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1}	0.029	0.044	0.030 [a]	0.002	0.027	0.046	0.031 [a]	0.003
عمق خاک (Soil depth)	m	0.40	1.80	1.04	0.350	0.45	1.75	1.10	0.038
حد قابل تحمل هدررفت خاک (Soil loss tolerance)	ton ha^{-1} $year^{-1}$	0.29	2.25	1.14 [a]	0.52	0.35	1.95	1.03 [a]	0.43

EC، CCE، MWD، PE، BD و OM به‌ترتیب قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع، کربنات کلسیم معادل، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، سرعت نفوذ آب در خاک، چگالی ظاهری و ماده آلی خاک هستند.

EC, CCE, MWD, PE, BD and OM are electrical conductivity, calcium carbonate equivalent, mean weight diameter, water infiltration rate, bulk density and organic matter, respectively.

جدول ۲- خلاصه آماری پارامترهای مدل اسکیدمور در برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک در حوضه آبخیز درودزن در استان فارس

Table 2- Summary statistic of Skidmore model parameters in estimation of soil loss tolerance limit in Doroudzan watershed in Fars province

پارامتر Parameter	واحد Unit	میانگین Mean	حداقل Min.	حداکثر Max.	انحراف معیار SD
Z (عمق نیم‌رخ خاک) Z (soil profile depth)	m	1.00	0.40	1.80	0.41
Z_1 (کم‌ترین عمق مناسب خاک برای رشد پایدار محصولات زراعی) Z_1 (the lowest soil proper depth for sustainable growth of crops)	m	0.47	0.25	0.50	0.08
Z_2 (بیش‌ترین عمق مناسب خاک برای رشد پایدار محصولات زراعی) Z_2 (the most soil proper depth for sustainable growth of crops)	m	1.72	0.80	2.00	0.36
T_1 (حد پایین حد قابل تحمل هدررفت خاک $(T_{(x,y,t)})$) T_1 (the low limit of soil loss tolerance limit, $T_{(x,y,t)}$)	mm	0.20	0.20	0.20	0.00
T_2 (حد بالای حد قابل تحمل هدررفت خاک $(T_{(x,y,t)})$) T_2 (the upper limit of soil loss tolerance limit, $T_{(x,y,t)}$)	mm	1.85	1.10	2.00	0.26
T (حد قابل تحمل هدررفت خاک) T (soil loss tolerance limit)	mm $year^{-1}$	0.14	0.029	0.225	0.05

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳- ضرایب همبستگی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های حوضه آبخیز درودزن در استان فارس

Table 3- Correlation coefficient of physical and chemical properties of Doroudzan watershed soils in Fars province

	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)	شن (Sand)	سیلت (Silt)	رس (Clay)	نفوذپذیری (PE)	پ‌هاش (pH)	قابلیت هدایت الکتریکی (EC)	جرم مخصوص ظاهری (BD)	میانگین هندسی (dg)	شاخص فرسایش پذیری (K-factor)	کربنات کلسیم معادل (CCE)	ماده آلی (OM)
شن (Sand)	0.32*											
سیلت (Silt)	0.14	-0.48*										
رس (Clay)	0.29	-0.88*	0.00									
نفوذپذیری (PE)	0.12	0.21	-0.07	-0.20								
پ‌هاش (pH)	0.34*	-0.06	0.20	-0.04	0.12							
قابلیت هدایت الکتریکی (EC)	0.11	0.12	-0.18	-0.04	-0.09	-0.47*						
جرم مخصوص ظاهری (BD)	0.17	-0.22	-0.11	0.31*	0.03	0.01	0.15					
میانگین هندسی (dg)	-0.26	0.94*	-0.31*	-0.89*	0.23	-0.03	0.07	-0.29				
شاخص فرسایش-پذیری (K-factor)	-0.31*	0.48*	0.04	-0.52*	-0.65*	0.00	0.10	-0.05	0.22			
کربنات کلسیم معادل (CCE)	-0.17	0.41*	-0.22	-0.35*	-0.12	-0.17	0.08	-0.22	0.34*	-0.32*		
ماده آلی (OM)	0.41*	-0.17	-0.06	0.22	-0.12	0.33*	0.32*	0.04	-0.15	0.24	-0.08	
حد قابل تحمل فرسایش خاک (T)	-0.53*	0.22	-0.10	-0.19	-0.21	-0.26	-0.16	-0.13	0.17	-0.31*	-0.35*	-0.77*

MWD، PE ، EC، BD، dg، K-factor، CCE، OM و T به‌ترتیب میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، سرعت نفوذ آب در خاک، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع، چگالی ظاهری، میانگین هندسی قطر ذرات، فرسایش‌پذیری خاک، کربنات کلسیم معادل، ماده آلی و حد قابل تحمل فرسایش خاک هستند (*. معنی‌دار در سطح ۵ درصد).

IWD, PE, EC, BD, dg, K-factor, CCE, OM, and T are mean weight diameter, permeability, electrical conductivity of saturated extract, bulk density, geometric mean weight diameter, soil erodibility, calcium carbonate equivalent, organic matter, and soil loss tolerance limit, respectively (*. Significant at the probability level of 0.05).

بیش‌ترین همبستگی حد قابل تحمل فرسایش خاک به میزان ۰/۷۷- با ماده آلی است. ماده‌آلی با تأثیر مثبت بر خاک‌دانه‌سازی، احتمالاً مقدار نفوذپذیری خاک را افزایش و در نتیجه پتانسیل شسته شدن و فرسایش خاک را کاهش می‌دهد (جدول ۳). سانتز و همکاران (۲۷) و تجادا و گنزالس (۲۹) نیز اثر معنی‌دار ماده‌آلی و ذرات شن در کاهش مقدار فرسایش را گزارش کردند. ویشمایر و مانرینگ (۳۲)

www.SID.ir

Archive of SID

دریافتند که مقدار خاک موجود در رواناب رابطه‌ی معکوس با مقدار ماده‌آلی خاک دارد. محتوای کربنات کلسیم معادل با فرسایش‌پذیری همبستگی منفی معنی‌دار دارد (جدول ۳). کربنات کلسیم با ضرایب همبستگی ۰/۳۲- و ۰/۳۵- به‌ترتیب با مقدار حد قابل تحمل فرسایش و فرسایش‌پذیری خاک رابطه معنی‌دار دارد. کربنات کلسیم معادل علاوه بر افزایش مقاومت خاک به جدا شدن ذرات توسط قطرات باران و رواناب، با داشتن اثر معنی‌دار بر خاک‌دانه‌سازی مقاومت خاک را افزایش داده که در نتیجه آن حد قابل تحمل فرسایش خاک افزایش می‌یابد (۱۷ و ۲۵). بین میزان فرسایش‌پذیری خاک با میزان حد قابل تحمل هدررفت خاک رابطه معنی‌دار با ضریب همبستگی ۰/۳۱- وجود دارد که نشان می‌دهد با افزایش فرسایش‌پذیری خاک (حساسیت خاک به فرسایش) حد قابل تحمل هدررفت خاک کاهش می‌یابد.

روش رگرسیونی چندگانه

بر اساس آزمون t، میانگین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده در مجموعه داده‌های اعتبارسنجی و واسنجی تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($p>0/05$). از میان ویژگی‌های زودیافت خاک، تنها ضرایب چهار ویژگی نفوذ آب در خاک، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، pH و ماده آلی معنی‌دار شد ($p<0/05$). مقدار شاخص تورم واریانس (VIF) برای هر چهار پارامتر کم‌تر از ۵ شد که نشان‌دهنده عدم هم راستایی بین متغیرهای ورودی است. جزئیات مدل تهیه شده در جدول ۴ و در رابطه (۷) ارائه شده است. در این جدول مشخص است که ماده آلی خاک با داشتن بیشترین ضریب استاندارد شده (Beta = ۰/۶۴-) مهمترین ویژگی در برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک است (مقدار پارامتر β برای ماده آلی بیشتر از سایر پارامترهاست). دلیل معنی‌دار شدن ماده آلی تاثیر این ویژگی بر میزان خاک‌دانه‌سازی و در نتیجه مقاومت خاک به فرسایش است.

چنانچه در جدول ۳ نشان داده شده است ماده آلی رابطه مثبت معنی‌دار با میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها دارد. پس از ماده آلی سرعت نفوذ آب در خاک بیشترین تأثیر را در برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک دارد. حد قابل تحمل هدررفت خاک رابطه منفی به نسبت قوی با میزان فرسایش‌پذیری خاک دارد. به این مفهوم که با افزایش فرسایش‌پذیری حد قابل تحمل هدررفت خاک کاهش می‌یابد. همان گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است فرسایش‌پذیری با سرعت نفوذ آب در خاک و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها همبستگی منفی معنی‌دار دارد. به‌عبارتی خاک‌های با سرعت نفوذ آب در خاک زیاد و خاک‌دانه‌های پایدار، فرسایش‌پذیری کم‌تر و در نتیجه حد قابل تحمل هدررفت خاک بیشتری دارند. در مطالعه واعظی و همکاران (۳۱) و استواری و همکاران (۱۷) نیز سرعت نفوذ آب در خاک مهم‌ترین عامل در برآورد فرسایش‌پذیری بود. لازم به ذکر است تاکنون مطالعه‌ای در تهیه توابع انتقالی برای برآورد حد قابل تحمل فرسایش خاک در ایران انجام نشده است. در پژوهش لاریا و همکاران (۲۰۰۸) در مدلسازی تعیین حدقابل تحمل خاک پنج ویژگی مؤثر بر مقاومت خاک در برابر نفوذ و رشد ریشه گیاه شامل نفوذپذیری، چگالی ظاهری، فرسایش‌پذیری خاک، درصد کربن آلی و pH در نظر گرفته می‌شود. لذا pH خاک با تأثیر بر قابلیت دسترسی عناصر در خاک و اثر بر رشد ریزجانداران خاک می‌تواند بر رشد ریشه گیاه و درنتیجه بر حد قابل تحمل هدرفت خاک مؤثر باشد.

جدول ٤- جزئیات روش رگرسیون گام به گام به جلو در برآورد حد قابل تحمل فرسایش خاک با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک در حوضه آبخیز سد درودزن در استان فارس

Table 4- Details of forward stepwise regression method in estimation of soil erosion tolerance limit using soil easy-measured properties Doroudzan watershed in Fars province

مدل Model	ضرایب استاندارد نشده Not standardized coefficient		ضرایب استاندارد شده Standardized coefficient	معنی‌داری Significance	شاخص تورم واریانس Variance inflation index
	B	خطای معیار SE	شاخص بتا Beta index		
مقدار ثابت Constant	6.50	16.25		0.00	
ماده آلی OM	-4.58	0.59	-0.64	0.00	2.12
پایداری خاکدانه MWD	-3.08	1.44	-0.19	0.03	1.16
نفوذ پذیری PE	-2.44	0.61	-0.33	0.00	3.35
پهاش pH	-4.75	2.06	-0.19	0.03	2.25

www.SID.ir

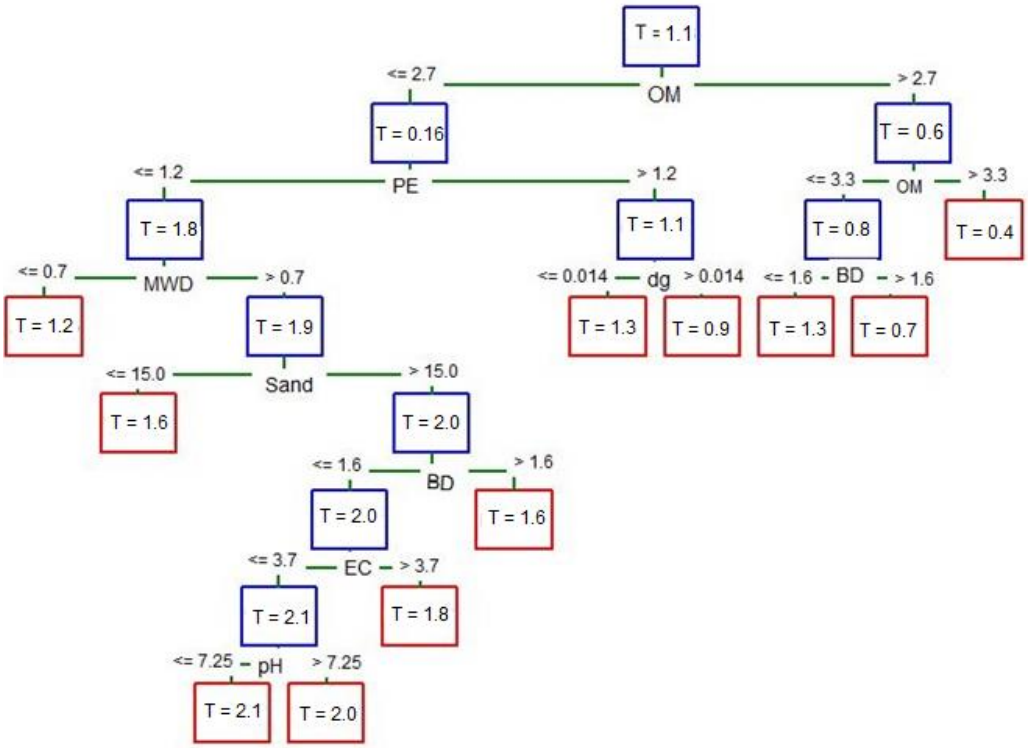
Archive of SID

$$T = 6.50 - 4.58\ OM - 2.44\ PE - 4.75\ pH - 3.08\ MWD \qquad R^2 = 0.81;\ p < 0.01 \qquad (۷)$$

که در آن MWD میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (میلی‌متر)، OM میزان ماده آلی (درصد)، PE سرعت نفوذ آب در خاک (سانتی‌متر بر ساعت) و T حد قابل تحمل فرسایش خاک (تن در هکتار در سال) است.

روش رگرسیون درختی

شکل ۴ نمودار درختی در برآورد حد قابل تحمل فرسایش خاک با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است اولین گره (گره مادری) بر اساس ماده آلی به دو گره فرزندی تقسیم شد. باتوجه به همبستگی قوی و معنی دار بین ماده آلی و حد قابل تحمل فرسایش خاک (r =-۰/۷۷) این تقسیم‌بندی کاملاً منطقی و صحیح به نظر می‌رسد. در مطالعه دهقانی و همکاران (۶) و استواری و همکاران (۱۶) نیز به‌ترتیب در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع و فرسایش‌پذیری خاک گره مادری اول بر ماده آلی و سرعت نفوذ آب در خاک که بیشترین همبستگی را با این ویژگی‌ها داشتند به دو گره فرزندی تقسیم شد. گره مادری ماده آلی به دو گره فرزندی کوچکتر-مساوی ۲/۷ درصد و بزرگتر از ۲/۷ درصد تقسیم شد. گره فرزندی سمت راست مجدد بر اساس ماده آلی به گره فرزندی تقسیم می‌شود که اهمیت و ارتباط ماده آلی با حد قابل تحمل فرسایش خاک را نشان می‌دهد. گره فرزندی سمت چپ در اولین تقسیم‌بندی بر اساس سرعت نفوذ آب در خاک به دو گره فرزندی تقسیم شده است (شکل ۴). در جدول ۴ نشان داده شده که سرعت نفوذ آب در خاک در تهیه تابع انتقالی رگرسیونی برای برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک با داشتن ضریب استاندارد شده ۰/۳۳- اهمیت ویژه‌ای دارد. با رفتن از گره‌های ابتدایی به سمت گره‌های فرزندی در پایین درخت رگرسیونی، ویژگی‌هایی ظاهر می‌شوند که اهمیت کم‌تر و همبستگی کم و غیرمعنی‌داری با حد قابل تحمل فرسایش خاک دارند. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC) اشاره کرد که در تابع تهیه شده خطی وارد نشده است.



شکل ٤- نمودار درختی برآورد حد قابل تحمل فرسایش خاک در حوضه آبخیز درودزن در استان فارس (T: میانگین حد قابل تحمل هدررفت خاک (تن در هکتار در سال)؛ OM: ماده آلی (درصد)؛ MWD: میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها (میلی‌متر)؛ EC: قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (دسی‌زیمنس بر متر)؛ BD: چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب))

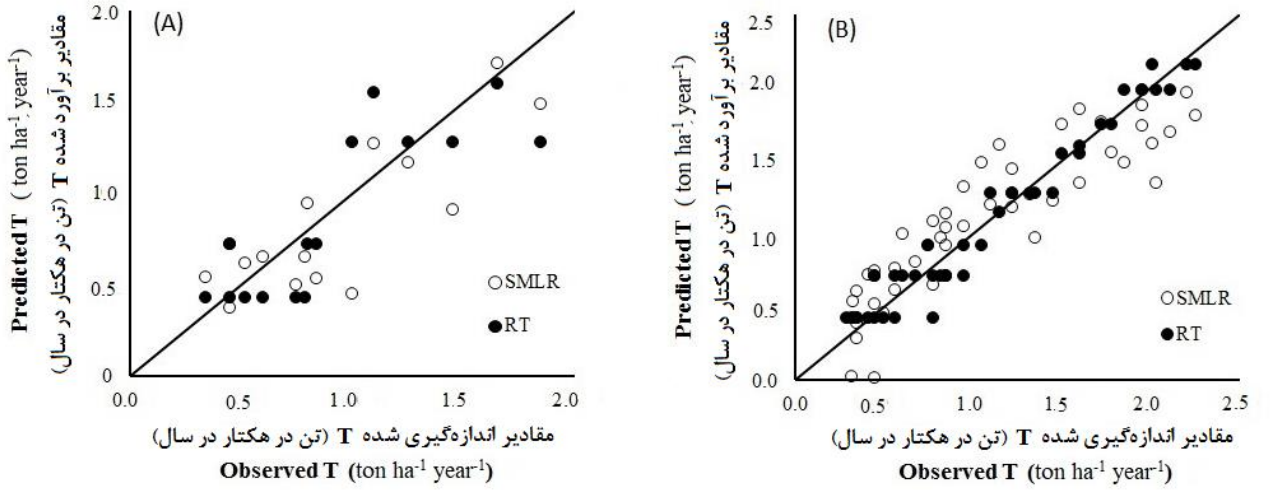
Figure 4- Tree diagram of soil loss tolerance limit estimation in Doroudzan watershed in Fars province (T: mean of soil loss tolerance limit (ton ha^{-1} year^{-1}); OM: organic matter (%); MWD: aggregates mean weight diameter (mm); EC: electrical conductivity in soil saturation extract (dS m^{-1}); BD: bulk density (g cm^{-3})

www.SID.ir

Archive of SID

اعتبارسنجی توابع انتقالی رگرسیونی خطی و درختی

شکل ۵ نمودار ۱ به ۱ مقادیر اندازه‌گیری شده حد قابل تحمل هدررفت خاک به روش اسکیدمور (۲۵) در مقابل مقادیر برآورد شده با استفاده از روش‌های رگرسیونی خطی چندگانه گام به گام (SMLR) و رگرسیون درختی (RT) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است در هر دو مجموعه داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی روش رگرسیون درختی کارآیی بسیار بیشتری در مقایسه با روش رگرسیون چندگانه دارد (پراکنش نقاط حول خطوط ۱ به ۱ در روش رگرسیون درختی کم‌تر از روش رگرسیون چندگانه است).



شکل ۵- نمودار ۱ به ۱ مقادیر اندازه‌گیری شده حد قابل تحمل هدررفت خاک (T) در مقابل مقادیر برآورد شده با استفاده از روش‌های رگرسیون خطی چندگانه گام به گام (SMLR) و رگرسیون درختی (RT) برای دو گروه داده واسنجی (A) و اعتبارسنجی (B)

Figure 5- 1 to 1 plot of measured soil loss tolerance values (T) versus estimated values using forward stepwise multiple linear regression (SMLR) and tree regression (RT) methods for two calibration (A) and validation (B) data sets

جدول ۵- آماره‌های ارزیابی† روش‌های رگرسیون خطی چندگانه (SMLR) و رگرسیون درختی (RT) برای برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک در دو مجموعه داده واسنجی و اعتبارسنجی

Table 5- Evaluation statistics† of forward stepwise multiple linear regression (SMLR) and tree regression (RT) methods for estimating soil loss tolerance limit in two calibration and validation data sets

روش‌ها Methods	R^2		RMSE (t ha^{-1} year^{-1})		ME (t ha^{-1} year^{-1})	
	اعتبارسنجی Validation	واسنجی Calibration	اعتبار سنجی Validation	واسنجی Calibration	اعتبارسنجی Validation	واسنجی Calibration
SMLR	0.67	0.81	0.27	0.28	-0.086	0.00
RT	0.78	0.96	0.26	0.125	-0.055	0.00

†: RMSE و ME به‌ترتیب ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطا می‌باشند.

†: RMSE and ME are root mean square error and mean error respectively.

جدول ۵ آماره‌های ارزیابی روش‌های رگرسیون خطی چندگانه و رگرسیون درختی در برآورد حد قابل تحمل هدررفت خاک را نشان می‌دهد. بر اساس آماره‌های ارزیابی، روش رگرسیون درختی با داشتن ضریب تعیین بیشتر در هر دو مجموعه داده واسنجی (R^2 =۰/۹۶) و اعتبارسنجی (R^2 =۰/۷۸) ، کم‌ترین مقدار خطا در داده واسنجی (۰/۲۵۹ تن در هکتار در سال =RMSE) و اعتبارسنجی ۰/۱۲۵ تن در هکتار در سال=RMSE) و اریبی ناچیز از خط ۱:۱ (۰ تن در هکتار در سال = ME) در هر دو مجموعه داده، در مقایسه با روش رگرسیون چندگانه کارآیی بیشتری دارد (جدول ۵). رائولز و پاچپسکی (۱۹) و پاچپسکی و رائولز (۱۷) کارآیی بیشتر روش رگرسیون درختی برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در برابر روش رگرسیون چندگانه را گزارش کردند. دهقانی و همکاران (۶) در پژوهش خود کارآیی

www.SID.ir

Archive of SID

بسیار خوب روش رگرسیون درختی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مقایسه با روش رگرسیون چندگانه را نشان دادند. استواری و همکاران (۱۵) نیز گزارش کردند روش رگرسیون درختی برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در مقایسه با روش رگرسیون چندگانه کارآیی بسیار بیشتری دارد.

نتیجه‌گیری

از آنجائی‌که بخش عمده‌ای از منطقه مورد مطالعه تحت کاربری کشاورزی و دشت سیلابی حاصل از رودخانه کر است، خاک این منطقه از عمق مناسبی برخوردار است. عمق خاک از ۰/۴ متر در مناطق حاشیه‌ای و دامنه‌ی کوه در اطراف دشت تا حدود ۲ متر در مرکز دشت متغیر است. بر مبنای روش عمق/ضخامت خاک و معادله پیشنهادی اسکیدمور حد قابل تحمل هدررفت خاک با میانگین ۱/۰۴ تن در هکتار در سال از حداقل ۰/۲۹ تن در هکتار در سال در بخش های شمالی و دامنه‌ها تا تا حداکثر ۰/۲۲۵ تن در هکتار در سال دشت جنوبی دشت (نزدیک به دریاچه سد درودزن) متغیر بود. به‌طور کلی مقدار هدررفت خاک در حوضه آبخیز درودزن استان فارس بسیار کمتر از مقدار حد قابل تحمل هدررفت گزارش شده توسط فائو (۸) (یعنی ۱۲ تن در هکتار در سال) است. در این مطالعه ماده آلی خاک به دلیل داشتن بیشترین همبستگی (۰/۷۷-) با حد قابل تحمل هدررفت خاک مهم‌ترین ویژگی در برآورد این شاخص خاک انتخاب شد. مدل رگرسیونی تنها بر اساس چهار ویژگی سرعت نفوذ آب در خاک، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، pH و ماده آلی توسعه یافت. اثر و ارتباط ماده آلی با حد قابل تحمل هدررفت خاک در رگرسیون درختی نیز با نمایان شدن در اولین تقسیم گره مادری در درخت رگرسیون مشاهده شد. مقایسه دو روش رگرسیونی چندگانه و درختی نشان داد که روش رگرسیون درختی (با میانگین برآورد ۱/۰۸ تن در هکتار در سال) و با داشتن آماره‌های ارزیابی بهتر در مقایسه با روش رگرسیونی چندگانه (با میانگین برآورد ۱/۱۲ تن در هکتار در سال)، کارآیی بیشتری در برآورد حد قابل تحمل خاک دارد.

سپاسگزاری

مقاله حاضر بخشی از طرح پسادکتری نویسنده اول آقای دکتر یاسر استواری با شماره ۹۶۰۰۷۲۰۳ تحت عنوان "تعیین حد قابل تحمل هدررفت خاک در مناطق کشاورزی بالادست سد درودزن در استان فارس" است که در صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور–ریاست جمهوری مصوب و با حمایت مالی این صندوق محترم و در بخش علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز انجام شده است. بدین‌وسیله نویسندگان از آن صندوق محترم و معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شیراز به سبب حمایت‌ها و فراهم آوردن امکانات لازم برای انجام طرح، صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایند.

منابع

1- Abbasi Y., Ghanbarian-Alavijeh B., Liaghat A.M., and Shorafa M. 2011. Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of saline and saline-alkali soils of Iran. Pedosphere 21(2) :230–237.
2- Ball D.F. 1964. Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils. Journal of Soil Science 15: 84–92.
3- Bazargan Lari A. 2012. Applied Statistics. Shiraz University press, Shiraz, Iran. (in Persian)
4- Carlos B., Reyes J., and Magri A. 2012. Water erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, central Chile. Chilean Journal of Agricultural Research 70(1): 159-169.
5- Chandel S., and Hada M.S. 2017. Assessment of soil loss tolerance. International Journal of Farm Sciences 7(1): 101-109.
6- Dehghani S., Ghorbani-Dashtaki S., and Khodaverdilu H. 2012. Comparing the Performance of Multiple Linear Regression and Regression Tree to Predict Saturated Hydraulic Conductivity and the Inverse of Macroscopic Capillary Length. Iranian Water Rresearch Journal 9: 199-210.
7- Duan X., Shi X., Li Y., Rong L., and Fen D. 2017. A new method to calculate soil loss tolerance for sustainable soil productivity in farmland. Agronomy for Sustainable Development 37(2): 2-13.
8- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2015. Soil erosion: the greatest challenge for sustainable soil management. Edition, Design & Publication Leadell Pennock (University of Saskatchewan, Canada). 104 pages.
9- Ghafari H., Gorji M., ArabKhedri M., Rooshani Gh., and Heidari A. 2018. Evaluation of soil loss tolerance via soil productivity and quality at a watershed scale: Haji-Ghushan watershed, Golestan province. Iranian Journal of Soil and Water Research 48: 985-994. (In Persian)
10- Ghorbani-Dashtaki S., and Homaee M. 2004. Using geometric mean particle diameter to derive point and continuous pedotransfer functions. In N. Whrle and M. Scheurer (Eds.). International Conference, 4-12 Sep. 2004. EuroSoil, Freiburg, Germany.
11- Gohardoust A., Saad-o-din A., Onagh M., and Najafinejad A. 2011. Application of Geographic informations

www.SID.ir

Archive of SID

system and Skidmore equation in determination of soil erosion limit for programming soil conservation actions in Chehel Chai- Golestan province. 1st National Conference on Modern Agricultural Science and Technologies, 10-12 Sep. 2011. Zanjan University, Zanjan, Iran. (In Persian)
12- Khajehpour M.R. 2014. Principles and Fundamentals of Crop Production. Jahad Daneshgahi press, Isfehan, Iran. (In Persian)
13- Kuznetsov M.S., and Abdulkhanova D.R. 2013. Soil loss tolerance in the central chernozemic region of the European part of Russia. Eurasian Soil Science 46(7): 802-809.
14- Lakaria B.L., Biswas H., and Mandal D. 2008. Soil loss tolerance values for different physiographic region of Central India. Soil Use and Management 24: 192–198.
15- McKenzie N.J., Jacquier D.W.1997. Improving the Field Estimation of SaturatedHydraulic Conductivity in Soil Survey. Aust. Journal Soil Research 35: 803-825.
16- Ostovari Y., Asgari K., and Motaghian H.R. 2015. Assessment of tree and multiple linear regressions in estimation of cation exchange capacity. Journal of Water and Soil 29: 683-694. (In Persian)
17- Ostovari Y., Ghorbani-Dashtaki S., Bahrami H., Naderi M., Dematte J., and Kerry R. 2016. Modification of the USLE K factor for soil erodibility assessment on calcareous soils in Iran. Geomorphology 273: 385-395.
18- Pachepsky Y., and Rawls W.J. 2006. Hydropedology and pedotransfer functions. Geoderma 131(3–4): 308-316.
19- Pimental D. 2006. Soil erosion: A food and environmental threat. Environment, Development and Sustainability 8: 119-137.
20- Rawls W.J., and Pachepsky Y. 2002. Data mining and exploration techniques, p. 21-31. In Y. Pachepsky, and M.G. Schaap (eds.). Developments in Soil Science. Chap. 2. Vol. 30. Development of pedotransfer functions in soil hydrology, Elsevier Science.
21- Refahi H.Gh. 2006. Water Erosion and Conservation. University of Tehran Press, Tehran, Iran. (In Persian)
22- Rusanov A.M. 2006. The integrated assessment of soil erosion resistance. Eurasian Soil Science 39(8): 879-884.
23- Sadeghi S.H.R. 2017. Soil erosion in Iran: state of the art, tendency, and solutions. Agriculture and Forestry 63(3): 33-37.
24- Sadeghi S.H.R., Moatamednia M., and Behzadfar M. 2011. Spatial and temporal variations in the rainfall erosivity factor in Iran. Journal of Agricultural Science and Technology 13: 451-464.
25- Santos F.L., Reis J.L., Martins O.C., Castanheira N.L., and Serralheiro R.P. 2003. Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigated soils. Biosystems Engineering 86: 355–364.
26- Skidmore E.L. 1984. Soil loss tolerance. p. 87–93. In M.K. David (ed.), Determinants of soil loss tolerance. ASA Spec. Publication., vol. 45. ASA, Madison.
27- Stamey W.L., and Smith R.M. 1964. A conservation definition of erosion tolerance. Soil Science 97: 183–186.
28- Stine R. 1995. Graphical Interpretation of Variance Inflation Factors. The American Statistician 49(1): 53-56
29- Tejada M., and Gonzalez J.L. 2006. The relationships between erodibility and erosion in a soil tratedwith two organic amendments. Soil and Tillage Research 91: 186–198.
30- Vaezi A.R., Bahrami H.A., Sadeghi S.H.R., and Mahdian M.H. 2010. Spatial variability of soil erodibility factor (K) of the USLE in North West of Iran. Journal of Agricultural Science and Technology 12: 241–252.
31- Vaezi A.R., Sadeghi S.H.R., Bahrami H.A., and Mahdian M.H. 2008. Spatial variations of runoff in a part of calcareous soils of semi-arid region in North West of Iran. Agriculture and Natural Resources 15: 213–225.
32- Wischmeier W.H., and Mannering J.V.1969. Relation of soil properties to its erodibility. Proceedings. Soil Science Society of America 33: 131–137.
33- Xingwu D., Xie Y., Liu B., Liu G., Feng Y., and Gao X. 2012. Soil loss tolerance in the black soil region of northeast China. Journal of Geographical Sciences 22(4): 737-751.
34- Yu D.S., Shi X.Z., and Weindorf D.C. 2006. Relationship between permeability and erodibility of cultivated Acrisols and Cambisols in subtropical China. Pedosphere 16: 304-311.

www.SID.ir

Archive of SID

Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 1, March-April 2020, p. 179-193

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۹، ص. ۱۹۳-۱۷۹

Estimating the Soil Loss Tolerable (T-value) Using Linear and Regression Tree Methods

Y. Ostovari [1]– A.A. Moosavi [2*]– H. Mozaffari[3]

Received: 02-09-2019
Accepted: 04-01-2020

Introduction: Soil erosion is one of the most important and serious threats to food security and as a consequence of human life. In order to perform soil protection activities against soil erosion, knowledge about the amount of soil loss tolerable is very important. In fact, the soil loss tolerable is the potential for soil erosion, loss of productivity and lost production, and the final criterion for controlling soil erosion and degradation of land. Soil thickness methods, particularly Skidmore equation, based on their ability to estimate the tolerable amount of soil loss have been widely used. In the mathematical function developed by Skidmore based on soil thickness, the soil loss tolerable is calculated based on the soil's current depth, the lowest and maximum soil depth for sustained growth of crops, and the upper limit of tolerable erosion in accordance with the environment. Since the determination of soil loss tolerance by soil thickness method and the Skidmore equation requires time, cost and energy, the researchers have tried to estimate the soil tolerance is supported by regression methods using pedotransfer functions and easily available soil properties. Therefore, the present study was carried out with the aims of determining the tolerable tolerance of soil loss by thickness method and the development of regression pedotransfer functions for estimating this property in the upstream of the dam.

Materials and Methods: The study is place on Kamfiruz Watershed with an area of 422 km^2, an average annual precipitation of 443 mm and an average annual temperature of 14 °C. It is closed to the Dorudzan Dam sub-basins and is considered as one of the five parts of Marvdasht plain in Fars province. For this work, 60 soil profiles were excavated by excavating machine. In addition to measuring the depth of soil, some physico-chemical soil properties were measured from the surface layer (0-30 cm) including; soil texture, organic matter, salinity, percentage calcium carbonate, mean weight diameter in the laboratory and filed. In order to develop regression models for estimating the tolerable soil loss, information from 60 soil profiles was divided into two data-sets. One set of the data with 42 samples (7۰% of whole samples) was used for developing the models and another set of the data with 18 soil samples (30% of whole samples) was used for validation. Multiple linear regression was used to develop the linear models. The same soil properties used in the multiple regression method were considered as inputs in the tree regression method to estimate the tolerable amount of loss.

Results and Discussion: The results showed that the minimum and maximum Z_1 parameters (the lowest soil depth for stable growth of crops in the study area) were considered as 0.25 and 0.51 m based on the current depth of soil. Organic matter of the soils with the highest standardized coefficient (Beta = 0.44) and the highest correlation (-0.77) with soil loss tolerance was the most important soil properties for estimating the soil loss tolerance. In the regression model, only the coefficients of four characteristics of permeability, soil aggregate stability, pH and organic matter appeared among the soil grazing characteristics and entered into the model. Based on the evaluation statistic, tree regression method with the highest determination coefficient in both calibration data sets (R^2 = 0.96) and validation (R^2 = 0.78) and the lowest error value in the validation data (RMSE= 0.29 ton ha^{-1} $year^{-1}$) and validation (RMSE = 0.125 ton ha^{-1} $year^{-1}$) were more efficient than the multiple regression method in estimating the tolerable soil loss.

Conclusion: Soil loss tolerance was estimated using regression methods (multiple linear regression and regression tree) in Doroudzan Watershed, Fars province. The soil loss tolerable determined using Skidmore method, was 1.04 tons per hectare per year ranging from 0.29 to 2.25 ton ha^{-1} $year^{-1}$. The soils of this area are

1, 2 and 3- Postdoc Researcher, Associate Professor and Ph.D. Student, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: aamousavi@gmail.com)
DOI: 10.22067/jsw.v34i1.82129

www.SID.ir

Archive of SID

slightly deep and their depth varies from 0.4 m in the marginal areas in the upstream parts of the catchment area of the dam and the slope of mountain up to 2 meters in the center of the plain with agricultural lands uses. In general, the tree regression method had a better performance than linear regression method for estimating the soil loss tolerance based on the statistical indices.

Keywords: Calcareous soils, Erosion, Multiple regression, Skidmore method, Soil erodibility, Transfer functions, Tree regression

www.SID.ir